



**PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO  
EM GEOCIÊNCIAS  
E MEIO AMBIENTE**

---

**ESTUDO INTEGRADO DE GEOFÍSICA E GEOLOGIA ESTRUTURAL NA  
IDENTIFICAÇÃO DO FLUXO HIDROGEOLÓGICO EM BARRAGEM E  
BACIAS DE DECANTAÇÃO DE MINA DE URÂNIO EM  
DESCOMISSIONAMENTO**

**Leonides Gureli Netto**

---

Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

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

LEONIDES GUIRELI NETTO

**ESTUDO INTEGRADO DE GEOFÍSICA E GEOLOGIA ESTRUTURAL NA  
IDENTIFICAÇÃO DO FLUXO HIDROGEOLÓGICO EM BARRAGEM E BACIAS DE  
DECANTAÇÃO DE MINA DE URÂNIO EM DESCOMISSIONAMENTO**

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

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira  
Co-Orientadores: Prof. Dr. Walter Malagutti Filho  
Dr. Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

Rio Claro (SP)

2024

N476e

Netto, Leonides Guireli

Estudo integrado de geofísica e geologia estrutural na identificação do fluxo hidrogeológico em barragem e bacias de decantação de mina de urânio em descomissionamento / Leonides Guireli Netto. -- Rio Claro, 2024

240 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: César Augusto Moreira

Coorientador: Walter Malagutti Filho, Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

1. Geofísica. 2. Hidrogeologia. 3. Geotecnia. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

### **Impacto potencial desta pesquisa**

A tese avalia o uso de métodos geofísicos no monitoramento de estruturas de armazenamento de rejeitos radioativos e contribui para a segurança em áreas mineradas e no descomissionamento de minas. O impacto abrange a prevenção de acidentes ambientais e a proteção das comunidades ao redor de barragens e bacias de decantação.

### **Potential impact of this research**

The thesis evaluates the use of geophysical methods in the monitoring of radioactive tailings storage structures and contributes to safety in mined areas and in the decommissioning of mines. The impact includes the prevention of environmental accidents and the protection of communities around dams and tailing ponds.

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

LEONIDES GUIRELI NETTO

ESTUDO INTEGRADO DE GEOFÍSICA E GEOLOGIA ESTRUTURAL NA  
IDENTIFICAÇÃO DO FLUXO HIDROGEOLÓGICO EM BARRAGEM E BACIAS DE  
DECANTAÇÃO DE MINA DE URÂNIO EM DESCOMISSIONAMENTO

Tese de Doutorado apresentada  
ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas do Câmpus de  
Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho", como parte dos  
requisitos para obtenção do título  
de Doutor em Geociências e Meio  
Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira  
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges  
IG/UnB/Brasília (DF)

Prof. Dr. Fábio André Perosi  
IMAR/UNIFESP/Santos (SP)

Prof. Dr. Jorge Luís Porsani  
IAG/USP/São Paulo (SP)

Dr. Pedro Lemos Camarero  
CCR SA/Jundiaí (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 29 de agosto de 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Injusto seria dizer que este trabalho foi desenvolvido por uma única pessoa e mais injusto ainda seria dizer que esta caminhada iniciou há apenas 4 anos. O trabalho aqui apresentado foi construído coletivamente, com diversas pessoas que fizeram esta jornada ser prazerosa e repleta de memórias que certamente jamais esquecerei. É impossível citar todos, mas saiba que você, que cruzou o meu caminho e de alguma maneira trouxe uma palavra de incentivo e apoio, faz parte deste trabalho. Como todo grande projeto, agradeço primeiramente à minha base. Aqueles que certamente foram e sempre serão a minha maior fonte de inspiração. Leonides Jr., Eliza e Lívia, vocês me fazem acreditar que nossos sonhos, por maiores que sejam, são possíveis. Aos meus melhores amigos, Kevin e Mariana, que sempre serão minha fonte inesgotável de carinho e incentivo. Lara Neves, a concorrente-amiga desde o dia 1. Giulia, Fiona e Caju, por me abrigarem com tanto carinho e amor durante seis meses.

Agradeço a toda equipe do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, do corpo administrativo, operacional e técnico. O IPT me acolheu e apostou em mim. A gratidão será eterna. Em especial ao Otávio, Bireli, Vicente, Laps e Sérgio, que não foram apenas mentores no mundo da geofísica, mas também meus amigos. Ao João Pedro, pela amizade e por ser o jovem geólogo mais competente que conheço. À Camila, pelas inúmeras conversas nos mais diversos (e infinitos) horários. Ao Daniel e ao Caio, pelo apoio. À Patrícia, por ser minha conselheira mesmo sendo engenheira civil.

Agradeço aos professores Walter Malagutti, pela parceria desde a graduação; e César Augusto Moreira, por ter aceitado me orientar durante a caminhada. Tarefa naturalmente difícil, mas não para alguém tão competente como você. Obrigado pela dedicação pessoal e por me incentivar a buscar sempre a excelência. Agradeço à professora Kamini Singha, da universidade Colorado School of Mines, por ser extremamente gentil com um jovem pesquisador cheio de ideias, sonhos e energia.

Agradeço a toda equipe da Indústrias Nucleares do Brasil – Unidade Caldas pelo apoio em campo e fornecimento de dados que foram cruciais para o pleno desenvolvimento deste trabalho. O presente trabalho contou também com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) na concessão de uma bolsa de doutorado sanduíche (SWE) – processo 201030/2022-5. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

“The world isn't in your books and maps,  
it's out there.”

J.R.R. Tolkien

## RESUMO

Os passivos ambientais gerados pela mineração incluem o acúmulo de toneladas de rejeitos de beneficiamento mineral em pilhas e barragens, além do manejo de águas ácidas de minas em bacias de decantação. A estabilidade física dessas estruturas é crucial para a segurança da sociedade, especialmente porque devem permanecer seguras por décadas após o término das operações, devido ao risco de fadiga e ruptura. Este estudo analisou o uso de métodos geofísicos de eletrorresistividade e sísmicos com o objetivo de entender a dinâmica do fluxo hidrogeológico no aquífero fraturado, que se encontra sob as fundações de empreendimentos mineiros durante o descomissionamento da primeira mineração de urânio do Brasil, localizada no complexo industrial das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) em Minas Gerais. O mapeamento das orientações das principais fraturas no maciço rochoso adjacente foi realizado a partir do uso de bússola e fotogrametria digital, cujos dados foram comparados com levantamentos estruturais regionais e locais. A metodologia mostrou ser eficaz para caracterizar o padrão estrutural, fator essencial para a interpretação dos dados geofísicos elétricos e sísmicos. Os resultados da sísmica de refração indicaram anomalias com variações nos valores de velocidade das ondas compressoriais, associadas às fraturas de alto ângulo próximas à barragem, enquanto as fraturas de baixo ângulo não apresentaram alterações significativas nos estratos sísmicos. As anomalias geoelétricas condutivas corroboraram essas interpretações, e sugeriram a presença de fraturas na rocha. O método de sísmica de refração também mostrou ser eficiente na identificação de diferentes camadas de materiais nas bacias de decantação, e a tomografia elétrica identificou anomalias condutivas associadas às fraturas de alto ângulo. As variações nos valores de velocidade das ondas sísmicas indicaram a presença de blocos de rocha próximos à fundação dos sistemas de armazenamento, os quais podem comprometer a estabilidade. Os resultados demonstram a viabilidade dos métodos geofísicos na avaliação de formações geológicas, em especial em barragens de rejeitos e bacias de decantação, fundamentais para o monitoramento e mitigação de riscos ambientais e de segurança.

**Palavras-chave:** Radioativos. Mineração. Sísmica de refração. MASW. Eletrorresistividade. Segurança de barragens.

## ABSTRACT

The environmental liabilities generated by mining include the accumulation of tons of mineral processing tailings in piles and dams, as well as the management of acid mine waters in settling basins. The physical stability of these structures is crucial for the safety of society, especially as they must remain safe for decades after the end of operations, due to the risk of fatigue and rupture. This study analyzed the use of electroresistivity and seismic geophysical methods in order to understand the dynamics of hydrogeological flow in the fractured aquifer found beneath the foundations of mining projects during the decommissioning of Brazil's first uranium mine, located in the Indústrias Nucleares do Brasil (INB) industrial complex in Minas Gerais. The orientations of the main fractures in the adjacent rock mass were mapped using a compass and digital photogrammetry, and the data was compared with regional and local structural surveys. The methodology proved to be effective in characterizing the structural pattern, an essential factor for interpreting the electrical and seismic geophysical data. The refraction seismic results indicated anomalies with variations in the velocity values of the compressional waves, associated with the high-angle fractures near the dam, while the low-angle fractures showed no significant changes in the seismic strata. The conductive geoelectric anomalies corroborated these interpretations and suggested the presence of fractures in the rock. The refraction seismic method also proved to be efficient in identifying different layers of material in the settling basins, and electrical tomography identified conductive anomalies associated with high-angle fractures. Variations in seismic wave velocity values indicated the presence of rock blocks near the foundations of the storage systems, which could compromise stability. The results demonstrate the viability of geophysical methods in assessing geological formations, especially in tailings dams and settling ponds, which are essential for monitoring and mitigating environmental and safety risks.

**Keywords:** Radioactive materials. Mining. Seismic refraction. MASW. Electroresistivity. Dam safety.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Anomalias de urânio e tório mapeadas no Planalto de Poços de Caldas e a localização da área da INB .....	26
<b>Figura 2</b> - Imagem aérea da disposição do complexo industrial INB/Caldas, com destaque para a barragem de rejeitos e as bacias de contenção de águas ácidas (D-1 e D-2) .....	27
<b>Figura 3</b> - Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas, com destaque (em vermelho) para o complexo industrial INB/Caldas .....	29
<b>Figura 4</b> - Sequência evolutiva do Maciço Alcalino de Poços de Caldas segundo modelo geológico de formação de caldeiras .....	30
<b>Figura 5</b> - Mapa geológico em detalhe da área da cava da mina Osamu Utsumi .....	33
<b>Figura 6</b> - Mapa geológico da cava da mina e levantamento estrutural .....	34
<b>Figura 7</b> - Concentrações médias de urânio em alguns tipos de rocha .....	36
<b>Figura 8</b> - Esquema geológico da chaminé e mineralizações de urânio na MOU .....	38
<b>Figura 9</b> - Seções esquemáticas dos corpos mineralizados na MOU .....	39
<b>Figura 10</b> - Principais sistemas hidrográficos que compõem a região do Planalto de Poços de Caldas e a área da INB .....	40
<b>Figura 11</b> - Seção transversal da cava da MOU e o contexto hidrogeológico .....	41
<b>Figura 12</b> - Rede hidrográfica original e o divisor de bacias hidrográficas da UTM-Caldas .....	42
<b>Figura 13</b> - Visão geral do complexo industrial da INB e suas principais instalações e localização das barragens e bacias de armazenamento de rejeito e água .....	46
<b>Figura 14</b> - Esquema da produção de combustível nuclear a partir de minério de urânio com destaque em vermelho para a etapa do processo desenvolvida na INB – Caldas.....	47
<b>Figura 15</b> - Distribuição de estruturas de armazenamento de águas ácidas e radioisótopos na área da UTM – Unidade Caldas. A) Vista lateral de uma pilha de rejeito; B) Vista da base de uma pilha de rejeito; C) Barragem de armazenamento de radioisótopos e drenagem ácida; D) Vista lateral da barragem de armazenamento de radioisótopos e drenagem ácida.....	50
<b>Figura 16</b> - Localização dos poços de monitoramento de águas subterrâneas na cava. Importante notar na foto aérea de 2024 a presença de um lago na área da cava por conta do atingimento do lençol freático. Os furos de sondagem foram realizados antes da implantação da mina, ou seja, sem a presença do lago.....	54
<b>Figura 17</b> - Estruturas de armazenamento de passivos ambientais oriundos da atividade de mineração em diferentes pontos da UTM – Unidade Caldas. Bacias de contenção de águas ácidas (A e B) e radioisótopos (C) .....	57

<b>Figura 18</b> - Imagem aérea do corpo do barramento da barragem de rejeito da MOU .....	59
<b>Figura 19</b> - Esquema da seção transversal típica da barragem de rejeitos .....	60
<b>Figura 20</b> - Localização dos poços de monitoramento próximos a barragem de rejeito .....	62
<b>Figura 21</b> - Perfil geológico dos poços de monitoramento ao redor da barragem de rejeito .....	63
<b>Figura 22</b> - Imagem aérea das bacias de contenção de águas ácidas da MOU .....	64
<b>Figura 23</b> - Disposição das estruturas hidráulicas no barramento e o ponto de liberação de águas ácidas para as bacias D1 e D2 .....	65
<b>Figura 24</b> - Localização do poço de monitoramento da bacia de contenção de águas ácidas .....	66
<b>Figura 25</b> - Gráfico de concentração de elementos químicos (metais e sulfato) na fração solúvel de águas superficiais das bacias de contenção de águas ácidas D1 e D2 .....	68
<b>Figura 26</b> - Gráfico de concentração de elementos químicos (Th, Ra <sub>226</sub> , Ra <sub>228</sub> e Pb <sub>210</sub> ) na fração solúvel de águas subterrâneas das bacias de contenção de águas ácidas D1 e D2 .....	69
<b>Figura 27</b> - Gráfico de concentração do elemento químico urânio (U) na fração solúvel de águas superficiais das bacias de contenção de águas ácidas D1 e D2 .....	70
<b>Figura 28</b> - Vantagens e desvantagens das técnicas de monitoramento de barragens .....	78
<b>Figura 29</b> - Esquema de uma barragem e os principais pontos de estudos geofísicos .....	78
<b>Figura 30</b> - Preenchimento de água em diferentes meios porosos .....	85
<b>Figura 31</b> - Experimento e expressão matemática de Darcy .....	86
<b>Figura 32</b> - Modelo conceitual de um sistema rochoso fraturado e o volume elementar representativo da condutividade hidráulica do sistema .....	87
<b>Figura 33</b> - Modelos conceituais de meios fraturados .....	88
<b>Figura 34</b> - Exemplo de projeções estereográfica e tridimensional de elementos planares .....	89
<b>Figura 35</b> - Propagação das ondas diretas e refletidas no interior da Terra e os respectivos sismogramas .....	93
<b>Figura 36</b> - Exemplo de sismograma e as chegadas das ondas de corpo e superficiais .....	93
<b>Figura 37</b> - Comportamento e propagação das ondas de corpo em meios sólidos ....	94
<b>Figura 38</b> - Comportamento e propagação das ondas superficiais em meios sólidos .....	95

<b>Figura 39</b> - a) Deslocamentos individuais dos componentes verticais e horizontais das ondas Rayleigh em função da profundidade; b) Movimento elíptico resultante da composição dos movimentos verticais e radiais .....	96
<b>Figura 40</b> - Distribuição dos movimentos das ondas de tensão a partir de uma base circular vibratória em um meio homogêneo, isotrópico e elástico .....	97
<b>Figura 41</b> - Tendências velocidade-densidade para rochas sedimentares .....	99
<b>Figura 42</b> - Relação entre as velocidades das ondas sísmicas e o coeficiente de Poisson ( $\sigma$ ) .....	102
<b>Figura 43</b> - Refração da onda sísmica de acordo com a Lei de Snell .....	104
<b>Figura 44</b> - a) Refração da onda sísmica em contextos geológicos simples; b) utilização da distância cruzada para determinar a espessura da camada geológica .....	106
<b>Figura 45</b> - a) Refração da onda sísmica em contextos geológicos mais complexos; b) interceptação do tempo ou distância cruzada em diferentes espessuras de camada .....	107
<b>Figura 46</b> - Esquema da aquisição de dados sísmicos de refração .....	108
<b>Figura 47</b> - Esquema do caráter dispersivo das ondas superficiais .....	110
<b>Figura 48</b> - Esquema da aquisição de dados sísmicos de MASW .....	111
<b>Figura 49</b> - Circuito elétrico simples e representação da Lei de Ohm .....	113
<b>Figura 50</b> - Variações da resistividade e condutividade elétricas em diferentes materiais geológicos .....	115
<b>Figura 51</b> - Propagação de campo elétrico em um meio tridimensional .....	117
<b>Figura 52</b> - Esquema dos arranjos geoeletricos .....	118
<b>Figura 53</b> - Esquema de aquisição dos dados geoeletricos na técnica de caminhamento elétrico a partir do uso do arranjo do tipo Wenner .....	120
<b>Figura 54</b> - Esquema do princípio da análise do caminho de menor custo .....	123
<b>Figura 55</b> - Posição das linhas de aquisições sísmicas na barragem de rejeito de urânio .....	126
<b>Figura 56</b> - Receptores na linha 1 (posição de tiro – fonte sísmica 9,5 metros) .....	127
<b>Figura 57</b> - Esquema da aquisição MASW na barragem de armazenamento de rejeito .....	128
<b>Figura 58</b> - Posição das linhas de aquisições sísmicas nas bacias de decantação D1 e D2 .....	129
<b>Figura 59</b> - Receptores na linha 5 (posição de tiro – fonte sísmica 12,5 metros) .....	130
<b>Figura 60</b> - Esquema da aquisição MASW nas bacias de decantação de água ácida .....	131
<b>Figura 61</b> - Posição das linhas de aquisições geoeletricas na barragem .....	133

<b>Figura 62</b> - Posição das linhas de aquisições geolétricas nas bacias de decantação .....	134
<b>Figura 63</b> - Localização do afloramento utilizado para aquisições de dados estruturais. a) Vista frontal do afloramento. b) Afloramento em detalhe (homem em escala: 1,77 metros) .....	135
<b>Figura 64</b> - a) medida estrutural com bússola em detalhe; b) dimensão do afloramento; c) maciço rochoso fraturado em detalhe (bússola em escala) .....	136
<b>Figura 65</b> - a) aquisição do GPS digital; b) pontos de controle (PC) .....	138
<b>Figura 66</b> - a) Migração da posição correta no espaço do refrator; b) separação do receptor local em cada geofone a partir dos ângulos das ondas direta e indireta .....	141
<b>Figura 67</b> - Etapas de processamento dos dados de refração sísmica .....	143
<b>Figura 68</b> - Sismogramas gerados na aquisição de sísmica de refração (onda P) na área da barragem de armazenamento de rejeito; a) linha 1; b) linha 2; c) linha 3 e d) linha 4 .....	144
<b>Figura 69</b> - Gráfico tempo x distância para cada geofone da linha 1 .....	144
<b>Figura 70</b> - Número de raios sísmicos na linha 4 .....	145
<b>Figura 71</b> - Número de raios sísmicos na linha 3, com variações topográficas .....	145
<b>Figura 72</b> - Sismogramas gerados na aquisição de sísmica de refração (onda P) na área das bacias de decantação de água ácida, a) linha 5 e b) linha 6 .....	146
<b>Figura 73</b> - Gráfico tempo x distância para cada geofone da linha 5 .....	146
<b>Figura 74</b> - Número de raios sísmicos na linha de aquisição 5 da bacia de decantação .....	147
<b>Figura 75</b> - Número de raios sísmicos na linha de aquisição 6 da bacia de decantação .....	147
<b>Figura 76</b> - Etapas de processamento dos dados de MASW.....	150
<b>Figura 77</b> - Esquema das etapas de processamento no software ResIPy .....	151
<b>Figura 78</b> - a) Disposição das linhas ERT em um modelo 3D; b) Visão superior das linhas de ERT na barragem de armazenamento de rejeito .....	153
<b>Figura 79</b> - a) Malha de elementos finitos retangular utilizada no processamento das linhas ERT da barragem de armazenamento de rejeito; b) Detalhe dos nódulos da malha .....	154
<b>Figura 80</b> - Resultado RMS da inversão de dados geolétricos da barragem de armazenamento de rejeito .....	155
<b>Figura 81</b> - a) Disposição das linhas ERT em um modelo 3D; b) Visão superior das linhas de ERT na bacia de decantação de águas ácidas .....	155
<b>Figura 82</b> - a) Malha de elementos finitos tetraédrica utilizada no processamento das linhas ERT das bacias de decantação; b) Detalhe dos nódulos da malha .....	156
<b>Figura 83</b> - Resultado RMS da inversão de dados geolétricos da bacia de decantação de águas ácidas: arranjo Schlumberger .....	157

<b>Figura 84</b> - Resultado RMS da inversão de dados geolétricos da bacia de decantação de águas ácidas: arranjo dipolo-dipolo .....	157
<b>Figura 85</b> - Sensibilidade do processamento dos diferentes arranjos geolétricos ....	158
<b>Figura 86</b> - Nuvem de pontos do afloramento obtida por fotogrametria digital .....	159
<b>Figura 87</b> - <i>Digital Outcrop Model</i> (DOM) obtido a partir de fotogrametria digital .....	159
<b>Figura 88</b> - DOM com a posição da câmera do VANT e PC's/CPs no solo .....	160
<b>Figura 89</b> - Mapeamento de traço de descontinuidade (pontos amarelos) usando a ferramenta <i>Trace</i> no <i>plug-in Compass</i> no software <i>CloudCompare</i> .....	162
<b>Figura 90</b> - Plano de melhor ajuste (em verde) e vetor normal à descontinuidade mapeada da Figura 89, com orientação estimada de 223/24 (direção do mergulho/mergulho) .....	162
<b>Figura 91</b> - Planos de melhor ajuste (em verde) e vetores normais para vários pontos escolhidos na superfície da inclinação, a partir da ferramenta <i>Plano</i> no <i>plug-in Compass</i> , software <i>CloudCompare</i> .....	163
<b>Figura 92</b> - Diagrama de contorno com todas as 181 medidas coletadas no afloramento na área de estudo através de bússola e VANT .....	164
<b>Figura 93</b> - Resultados do levantamento estrutural com bússola e VANT .....	165
<b>Figura 94</b> - Levantamento estrutural e SRT no afloramento de maciço rochoso .....	167
<b>Figura 95</b> - Número de raios sísmicos na linha de aquisição 4 no afloramento .....	168
<b>Figura 96</b> - Resultados da SRT obtidos na Linha 1 do corpo do barramento .....	169
<b>Figura 97</b> - Posicionamento do vertedouro desativado em superfície e o resultado sísmico .....	170
<b>Figura 98</b> - Perfil de tamponamento do antigo sistema extravasor da barragem de armazenamento de rejeito de urânio .....	171
<b>Figura 99</b> - Número de raios sísmicos na linha de aquisição 1 no barramento .....	171
<b>Figura 100</b> - Resultados da SRT obtidos na Linha 2 do corpo do barramento .....	172
<b>Figura 101</b> - Resultado dos MASW 1D interpolados para resultar em um MASW 2D na linha de aquisição da 2ª berma do talude de jusante do barramento .....	174
<b>Figura 102</b> - Resultados da SRT obtidos na Linha 3 do corpo do barramento .....	175
<b>Figura 103</b> - Número de raios sísmicos na linha de aquisição 3 no barramento .....	176
<b>Figura 104</b> - Disposição 3D das linhas ERT e a seção típica do barramento .....	177
<b>Figura 105</b> - Linha ERT 03 comparada com a seção típica do barramento e a o perfil de tamponamento do sistema extravasor .....	179
<b>Figura 106</b> - Resultado das linhas ERT 03 e 04 .....	180
<b>Figura 107</b> - Resultados da SRT obtidos na linha 5 no maciço da bacia D1 .....	181

<b>Figura 108</b> - Número de raios sísmicos na linha de aquisição 5 de SRT da bacia D1 .....	182
<b>Figura 109</b> - Resultados da SRT obtidos na linha 6 no maciço da bacia D2 .....	183
<b>Figura 110</b> - Número de raios sísmicos na linha de aquisição 6 de SRT da bacia D2 .....	184
<b>Figura 111</b> – Resultado dos MASW 1D interpolados para resultar em um MASW 2D nas linhas de aquisições das bacias D1 e D2 .....	185
<b>Figura 112</b> - Disposição 3D das linhas ERT e a seção esquemática das bacias D1 e D2 .....	186
<b>Figura 113</b> - Resultados da ERT obtidos na linha 05 na bacia D2 .....	187
<b>Figura 114</b> - Resultado das linhas ERT 07 e 08: a) vista aérea lateral; b) vista aérea superior .....	188
<b>Figura 115</b> - Disposição 3D das linhas ERT nas bacias D1 e D2 .....	189
<b>Figura 116</b> - Resultado das linhas ERT 06, 08 e 09 (arranjo Schlumberger) .....	190
<b>Figura 117</b> - Anomalias elétricas condutivas em profundidade (arranjo Schlumberger) .....	191
<b>Figura 118</b> - Disposição das bacias D1 e D2 e fluxo água à jusante das estruturas. A) Afloramento de rocha alterada localizado próximo a base da bacia D2. B) Fluxo d'água à jusante das bacias. C) Registro fotográfico do vertedouro seco durante a aquisição dos dados. Em escala: homem em pé de 1,77 metros .....	192

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Grau de alteração das rochas da área da cava da MOU .....	32
<b>Tabela 2</b> - Características dos corpos mineralizados na região da MOU .....	37
<b>Tabela 3</b> - Disposição dos rejeitos de mineração na UTM .....	51
<b>Tabela 4</b> - Parâmetros físico-químicos encontrados nas águas subterrâneas da MOU .....	55
<b>Tabela 5</b> - Localização dos poços de monitoramento na área da barragem de urânio .....	61
<b>Tabela 6</b> - Parâmetros físico-químicos anuais encontrados nas águas subterrâneas do poço PM5 localizado a jusante da bacia de decantação de águas ácidas.....	67
<b>Tabela 7</b> - Parâmetros geotécnicos e ambientais e a correlação com dados geofísicos .....	74
<b>Tabela 8</b> - Classificação das constantes elásticas .....	98
<b>Tabela 9</b> - Trabalhos de correlações entre velocidades de ondas sísmicas e parâmetros físicos de solo e rocha em estudos geotécnicos .....	103
<b>Tabela 10</b> - Configurações das aquisições sísmicas na barragem de rejeito de urânio .....	128
<b>Tabela 11</b> - Configurações das aquisições sísmicas nas bacias de decantação .....	131
<b>Tabela 12</b> - Especificações técnicas drone Mavic Air .....	137
<b>Tabela 13</b> - Resultados da precisão absoluta do <i>Digital Outcrop Model</i> .....	161
<b>Tabela 14</b> - Parâmetros e funções de custo simples .....	161

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**ANAC** - Agência Nacional de Aviação

**ANM** - Agência Nacional de Mineração

**Ci** - Curie

**CIPC** - Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas

**CNEN** - Comissão Nacional de Energia Nuclear

**CNPq** - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

**CODEMIG** - Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais

**CPRM** - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico Brasileiro)

**DAM** - Drenagem Ácida de Mina

**EPA** - *Environmental Protection Agency*

**ERT** - *Electrical Resistivity Tomography*

**GRM** - *Generalized Reciprocal Method*

**INB** - Indústrias Nucleares do Brasil

**IPT** - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

**MASW** - Análise Multicanal de Ondas Superficiais

**MOU** - Mina Osamu Utsumi

**NUCLEBRÁS** - Empresas Nucleares Brasileiras

**PEAD** - Polietileno de alta densidade

**PM** – Poços de monitoramento

**PRAD** - Plano de Recuperação de Áreas Degradadas

**SRT** - Sísmica de refração tomográfica

**TBq** - Terabecquerel

**UFMG** - Universidade Federal de Minas Gerais

**URA** - Unidade de Concentração de Urânio

**UTM** - Unidade de Tratamento de Minério

**VANT** - Veículo aéreo não tripulado

**WET** - *Wavepath Eikonal Travelttime*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 Justificativa .....	22
1.2 Hipóteses .....	23
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>24</b>
2.1 Objetivos Gerais.....	24
2.2 Objetivos Específicos .....	24
<b>3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>25</b>
3.1 Contexto histórico dos minerais radioativos e a importância da área de estudo no Brasil .....	25
3.2 Contexto geológico .....	28
3.2.1 Geologia do Planalto de Poços de Caldas .....	28
3.2.2 Geologia da Mina Osamu Utsumi (MOU).....	30
3.2.3 Mineralização da Mina Osamu Utsumi (MOU) .....	35
3.3 Contexto hidrogeológico.....	39
3.4 Contexto hidrológico .....	42
3.6 Vegetação e clima.....	43
3.7 Aspectos fisiográficos .....	45
<b>4. ASPECTOS GERAIS DA MINA OSAMU UTSUMI .....</b>	<b>46</b>
4.1 Contexto histórico das operações da Mina Osamu Utsumi .....	46
4.1.1 Gerenciamento de estéril e rejeito na Mina Osamu Utsumi .....	49
4.1.2 Gerenciamento de águas ácidas com altos teores de metais e radioisótopos na Mina Osamu Utsumi .....	51
<b>5. DEFINIÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS MINEIROS ALVOS DO ESTUDO .....</b>	<b>58</b>
5.1 Caracterizações dos empreendimentos mineiros .....	59
5.1.1 Barragem de armazenamento de radioisótopos .....	59
5.1.2 Bacias de decantação de radioisótopos .....	63
<b>6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>71</b>
6.1 Passivos ambientais da atividade de mineração .....	71
6.1.1 Geofísica aplicada em estudos de passivos ambientais de mineração ..	73
6.1.1.1 Métodos geofísicos aplicados em pilhas de rejeitos .....	74
6.1.1.2 Métodos geofísicos aplicados em barragens .....	76
6.1.1.3 Métodos geofísicos aplicados em bacias de decantação .....	83

6.2 Hidrogeologia e geologia estrutural .....	84
<b>7. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>90</b>
7.1 Métodos sísmicos .....	90
7.1.1 Tipos e comportamentos de ondas sísmicas .....	90
7.1.2 Relação entre as ondas sísmicas e os parâmetros geotécnicos .....	97
7.1.3 Sísmica de refração .....	103
7.1.4 Análise multicanal de ondas superficiais (MASW) .....	108
7.2 Métodos elétricos .....	111
7.2.1 Resistividade elétrica e os materiais geológicos .....	114
7.2.2 Técnica da tomografia elétrica .....	116
7.3 Fotogrametria digital aplicada em estudos geológicos .....	121
<b>8. AQUISIÇÕES DOS DADOS GEOFÍSICOS E MEDIDAS ESTRUTURAIS .....</b>	<b>125</b>
8.1 Aquisições de dados sísmicos .....	125
8.1.1 Barragem de armazenamento de rejeito de urânio .....	125
8.1.2 Bacias de decantação de radioisótopos .....	128
8.2 Aquisição de dados geoeletricos .....	132
8.2.1 Barragem de armazenamento de rejeito de urânio .....	132
8.2.2 Bacias de decantação de radioisótopos .....	133
8.3 Aquisições de dados estruturais .....	135
8.3.1 Medidas estruturais com bússola .....	136
8.3.2 Medidas estruturais com VANT .....	136
8.3.2.1 Aquisição de imagens com VANT .....	137
<b>9. PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS E DE FOTOGAMETRIA DIGITAL .....</b>	<b>140</b>
9.1 Tomografia de refração sísmica .....	140
9.1.1 Barragem de armazenamento de rejeito de urânio .....	143
9.1.2 Bacias de decantação de radioisótopos .....	146
9.2 Análise multicanal de ondas superficiais .....	148
9.3 Tomografia elétrica .....	151
9.3.1 Barragem de armazenamento de rejeito de urânio .....	153
9.3.2 Bacias de decantação de radioisótopos .....	155
9.4 Fotogrametria digital e geração de nuvem de pontos .....	159
9.4.1 Extração das descontinuidades .....	161
<b>10. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>164</b>

10.1 Análise estrutural local .....	164
10.2 Análise estrutural local e os métodos geofísicos .....	166
10.2.1 Barragem de rejeito .....	167
10.2.2 Bacias de decantação de radioisótopos.....	180
<b>11. CONCLUSÕES .....</b>	<b>193</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>197</b>
ANEXO I .....	217
ANEXO II .....	218
ANEXO III .....	220
ANEXO IV .....	221
ANEXO V .....	223
ANEXO VI .....	224
ANEXO VII .....	229
ANEXO VIII .....	235
ANEXO IX .....	236
ANEXO X .....	237

## 1. INTRODUÇÃO

A atividade de mineração tem como principal objetivo fornecer produtos básicos a outros setores importantes da economia, como as indústrias de metalurgia, siderurgia e química, além da agricultura e construção civil (COULSON, 2012). Nas cinco décadas após a Segunda Guerra Mundial, o volume de minerais consumidos excedeu o total extraído da Terra durante todo o restante da história humana até então (AZCUE, 1999). Esse cenário de crescimento também foi observado nas minerações de minerais radioativos. Em 1960, fomentada principalmente para abastecer a indústria bélica e a produção de energia nuclear, a produção mundial anual de óxido de urânio apresentou um relevante crescimento (EIDEMÜLLER, 2021). Para suprir essa demanda, o empreendimento mineiro necessita de uma cadeia que inclui a busca por técnicas de lavra e beneficiamento mais eficientes, e também metodologias para disposição de rejeitos cada vez mais seguras (HERRINGTON, 2021).

No Brasil, um dos principais países mineradores da América do Sul e a maior economia da América Latina, os números do setor mineral seguem uma tendência crescente, o que evidencia a importância da atividade no país (LOTTERMOSER, 2010). Antes do período da pandemia de COVID-19, o setor compreendia mais de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) e cerca de 20% das exportações brasileiras (MME, 2016). Em 2018, a produção mineral brasileira atingiu US\$ 34 bilhões; em 2019, US\$ 38 bilhões. Em 2020, apesar da pandemia de COVID-19, a indústria de mineração apresentou receita de R\$ 37 bilhões. Os resultados evidenciam a resiliência e a importância do setor na economia do país (ANM, 2021), o qual engloba uma cadeia de produção vasta e ramificada, desde pesquisas de novas áreas para exploração até ampliações de reservas já existentes, lavra e beneficiamento (RAJENDRAN & MURTY, 2023).

O desenvolvimento da atividade de mineração muitas vezes foi associado a um processo desarmônico com o meio ambiente. Independentemente do tamanho da mina ou refinaria, o processamento de minérios com reagentes representa alguns dos maiores perigos ambientais da atividade (AZCUE, 1999; KHOBRAGADE, 2020). Fato é que por mais efetivas sejam as etapas de lavra e beneficiamento, sempre é gerada uma quantidade considerável de rejeito. Este material é composto por partículas finas derivadas da rocha explorada, e que não são aproveitados após o processo de beneficiamento (AZAM & LI, 2010). A etapa de disposição de rejeitos consiste em

identificar a melhor maneira de armazenar as toneladas de passivos ambientais gerados pelo empreendimento (ERCIKDI et al., 2017). A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), promulgada em 2010, é aplicada em barramentos que apresentem pelo menos uma das quatro características determinadas na lei: altura acima de 15 m, volume superior a 3.000.000 m<sup>3</sup> reservado, acúmulo de resíduos perigosos e/ou categoria de dano potencial associado médio ou alto (BRASIL, 2010). É neste contexto que os proprietários e concessionárias que operam barragens buscam atender ao que está estabelecido em normas, diretrizes e leis de órgãos fiscalizadores para a inserção no cadastro nacional e/ou desenvolver estudos e melhorias quanto à segurança dessas construções.

A instalação de uma vasta malha de instrumentação geotécnica é indispensável. Entretanto, por mais detalhada que seja a malha de instrumentação existirão áreas com ausência de dados, visto que os dados diretos são coletados de forma pontual (KANJI & FIGUEIRA, 1990; ASTHANA & KHARE, 2022). Fato é que os acontecimentos recentes de rupturas de barragens de rejeito no estado de Minas Gerais alertaram para a necessidade de estudos e uso de técnicas tradicionais aplicadas em conjunto com novos métodos de investigação nesse setor, uma vez que, além das perdas sociais e econômicas, os resultados de uma eventual contaminação pelo passivo são, em alguns casos, irreversíveis, necessitando de prevenção e controle da estrutura de armazenamento (ISLAM & MURAKAMI, 2021; KOPPE, 2021).

Todo passivo acumulado na forma de barragens e pilhas necessita de monitoramento, classicamente por meio de instrumentos como piezômetros e inclinômetros para garantia da integridade física da estrutura (FELL et al., 2005). A aplicação de métodos indiretos, como é o caso dos métodos geofísicos, na investigação de barragens e pilhas de rejeitos é cada vez mais empregada no Brasil. A ampla cobertura de dados em um curto período, resulta em uma ótima relação custo/benefício (CORWIN, 1990; CAMARERO et al., 2019; MOREIRA et al., 2022). Outra questão relevante é o caráter não invasivo dos métodos diante da possibilidade de aquisição de dados por instrumentação e sensores posicionados em superfície.

Entretanto, existem poucos estudos durante a etapa de descomissionamento de obras civis em empreendimentos mineiros. Após finalizadas as operações de extração de minério e beneficiamento, independente de qual seja a utilização da área da mineração, as estruturas utilizadas para destinação de rejeito e águas ácidas permanecem. Estruturas como barragens, pilhas de rejeito e bacias de decantação

devem apresentar condições construtivas e estruturais que possibilitam a manutenção da integridade física por décadas após o término das operações (MIZUNO & HIROSE, 2017; SENGUPTA, 2021). Este aspecto deve envolver o diagnóstico de alterações hidrogeológicas ou estruturais provocadas pelo acúmulo de grandes cargas de água em rocha, frequentemente sobre maciços rochosos fraturados, com fenômenos que podem resultar em novos caminhos de fluxo hidrogeológico, sobrepressões, surgências e outras alterações na dinâmica de fluxo, com riscos a integridade física de barramentos e pilhas de rejeitos imprevistos durante o planejamento destas estruturas de contenção de grande porte (ABRAHÃO, 2020; OWEN et al., 2020).

A Mina Osamu Utsumi é a primeira mineração de urânio da América do Sul. Localizada na região sudeste do Brasil, mais precisamente no estado de Minas Gerais, por muitos anos teve papel crucial no setor energético do país através do fornecimento de insumos para a geração de combustível nuclear no século XX. Atualmente, o complexo industrial está em fase de descomissionamento. A etapa de descontaminação e recuperação ambiental de uma instalação onde foram dispostos materiais radioativos possui desafios específicos atrelados a complexidade do material explorado e a ausência na literatura de estudos geofísicos, especialmente com métodos sísmicos, durante essa fase. O complexo industrial possui diferentes passivos ambientais associados a atividade de mineração, os quais precisam ser monitorados a fim de assegurar a integridade física das estruturas de armazenamento e fazem parte deste estudo.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

As barragens e as bacias de decantação armazenam água e outros materiais, como rejeitos de mineração e radioisótopos. Estudos nesses empreendimentos mineiros durante a fase de operação da mina cresceram consideravelmente no Brasil após rompimentos recentes de barragens de mineração. Além das perdas humanas, sociais e econômicas, os resultados de uma eventual contaminação em eventos que envolvam a liberação de rejeitos são altamente danosos, aspectos que justificam ações de prevenção e controle da estrutura de armazenamento. As estruturas devem apresentar condições construtivas que possibilitem a manutenção da integridade física por décadas após o término das operações e início da etapa de descomissionamento.

Os monitoramentos geofísicos podem auxiliar diagnósticos prévios de processos que possam causar instabilidades e o rompimento de barramentos e bacias de decantação. São necessários estudos durante a etapa de descomissionamento da mina que mostrem as vantagens e desvantagens dos métodos geofísicos como ferramenta não invasiva de diagnóstico das alterações hidrogeológicas ou estruturais provocadas pelo acúmulo de grandes cargas de água em rocha, frequentemente sobre maciços rochosos fraturados, com fenômenos que podem resultar em novos caminhos de fluxo hidrogeológico, sobrepressões, surgências e outras alterações na dinâmica de fluxo. Essas alterações impactam a estabilidade geotécnica de barramentos de água e rejeitos de mineração imprevistos durante o planejamento destas estruturas de contenção de grande porte e necessitam de novas tecnologias de monitoramento

## **1.2 HIPÓTESES**

Esta pesquisa é baseada em duas premissas sequenciais:

- As operações desenvolvidas por décadas durante a atividade da mina foram suficientes para induzirem artificialmente alterações na dinâmica do fluxo hidrogeológico no aquífero fraturado disposto sob as fundações dos empreendimentos mineiros alvos do estudo?

- É viável o uso de métodos geofísicos em estudos hidrogeológicos de aquíferos fraturados sob pressão de grandes cargas para análise do impacto da integridade física de empreendimentos mineiros ao longo do tempo?

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

A presente tese pretende compreender o padrão estrutural do maciço rochoso e a dinâmica hidrogeológica sob a fundação de obras civis em empreendimentos mineiros de uma mina em fase de descomissionamento, especialmente barragem e bacias de decantação de águas ácidas, através da aplicação de investigações geofísicas com diferentes métodos: sísmicos e elétricos, e análise estrutural de afloramento presente na área de estudo. A partir dos resultados obtidos, o projeto almeja avaliar a aplicabilidade da geofísica em estudos hidrogeológicos de aquíferos fraturados sob pressão de grandes cargas e assegurar o uso da geofísica como metodologia de auxílio aos estudos de estabilidade geotécnica comumente aplicados nessas estruturas de armazenamento, especialmente durante a fase de descomissionamento.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos desta tese:

- Determinar o padrão estrutural de maciço rochoso posicionado sob barramentos que armazenam rejeito de urânio e água ácida de uma mineração em fase de descomissionamento através de levantamentos de bússola e fotogrametria digital (veículo aéreo não tripulado).
- Comparar os resultados das metodologias de levantamento estrutural utilizadas: levantamento tradicional realizado a partir do uso de bússola e levantamento realizado a partir do uso de veículo aéreo não tripulado e posterior processamento digital das fotos aéreas.
- Compreender a dinâmica hidrogeológica em sistema aquífero fraturado pela combinação de análise estrutural e métodos geofísicos.
- Avaliar as vantagens e limitações do uso de geofísica em estudos hidrogeológicos de aquíferos fraturados sob pressão de grandes cargas e o impacto na integridade física de barramentos por alteração artificialmente induzidas na dinâmica de fluxo hidrogeológico em aquífero fraturado.

### **3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.1 CONTEXTO HISTÓRICO DOS MINERAIS RADIOATIVOS E A IMPORTÂNCIA DA ÁREA DE ESTUDO NO BRASIL**

A radioatividade foi descoberta em 1896 pelo acaso, assim como muitas outras descobertas na ciência, graças ao trabalho de Henri Becquerel. O cientista estudava outro fenômeno, a fluorescência de sais duplos de urânio e potássio. Após uma série de experimentos sistemáticos, foi observada uma nova radiação invisível emitida por todos os compostos de urânio, inclusive os não fluorescentes. Além disso, a nova radiação não foi observada em outras substâncias fluorescentes não urânicas (GARCÍA-LEÓN, 2022). A descoberta foi precursora para diversos estudos químicos e geoquímicos na busca de novos minerais radioativos além do urânio, entre eles o tório e o rádio (BOYLE, 1982; HORE-LACY, 2016).

No mundo, a busca de minerais radioativos foi fomentada principalmente para suprir a indústria bélica e a produção de energia nuclear (EIDEMÜLLER, 2021). Entre o período de 1906 e 1939, a extração mundial total de rádio foi cerca de 1000 g e a de urânio aproximadamente de 4000 ton. Depois de um curto período histórico, de cerca de dez anos, a indústria de extração e processamento de urânio foi estabelecida em muitos países. De acordo com os dados de 1960, a produção anual de óxido de urânio nos EUA atingiu 15.000 ton, 13.000 ton no Canadá, mais de 6.000 ton na África do Sul, 1.000 ton na República do Congo e Austrália e 750 ton na França (YEMEL'YANOV, V.S. & YEVSTYUKHIN, 1969; EIDEMÜLLER, 2021).

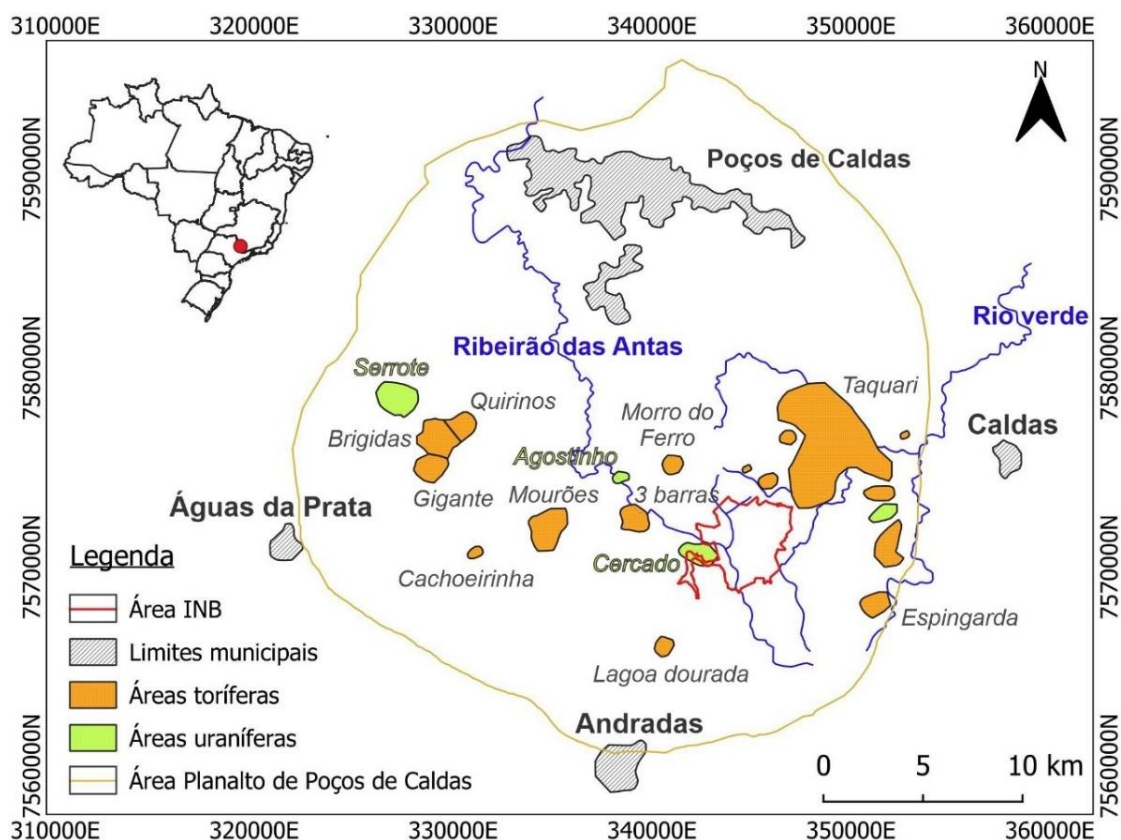
O aumento da demanda de energia devido ao crescimento da população global e uma ênfase crescente em tecnologias de baixa emissão de carbono, a energia nuclear emergiu como um elemento importante de qualquer solução sustentável para atender necessidades energéticas (PIRES, 2013). No Brasil, a pesquisa e a lavra das jazidas dos minérios nucleares são consideradas atividades estratégicas, e, portanto, tem sua mineração controlada pela União, através da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (BRASIL, 1962). A primeira prospecção sistemática de minerais radioativos no Brasil foi realizada pelo Conselho Nacional de Pesquisas – CNPq, em 1952.

A partir de 1956, o processo de prospecção mineral passou a ser feito através da criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Devido a aplicação

substancial de recursos financeiros e a participação da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM na execução das atividades de exploração, foram identificadas 44 ocorrências radioativas na área do Planalto de Poços de Caldas. Em 1974 as reservas do país somavam um total de 11.040 ton de  $U_3O_8$  (HEIDER, 2009).

Após a criação da Nuclebrás no final de 1974, as descobertas de novas reservas nucleares brasileiras foram direcionadas às metas do Programa Nuclear Brasileiro de busca por autonomia energética. Grandes investimentos foram destinados à prospecção, pesquisa, desenvolvimento de métodos e técnicas de trabalho e lavra de jazidas de urânio no país (HEIDER, 2009). Em 1988, a Nuclebrás foi transformada em Indústrias Nucleares Brasileiras – INB. Atualmente, as atividades da INB englobam o ciclo do combustível nuclear desde a mineração, enriquecimento e fabricação do combustível nuclear. As unidades em Lagoa Real/Caetité (BA) e Santa Quitéria (CE) estão em operação e a unidade de Caldas (MG) em fase de descomissionamento (INB, 2021). A presença de radioatividade no Planalto de Poços de Caldas foi detectada em minerais de zircônio em 1948 (SESMG, 2009) (Figura 1).

**Figura 1:** Anomalias de urânio e tório mapeadas no Planalto de Poços de Caldas e a localização da área da INB.

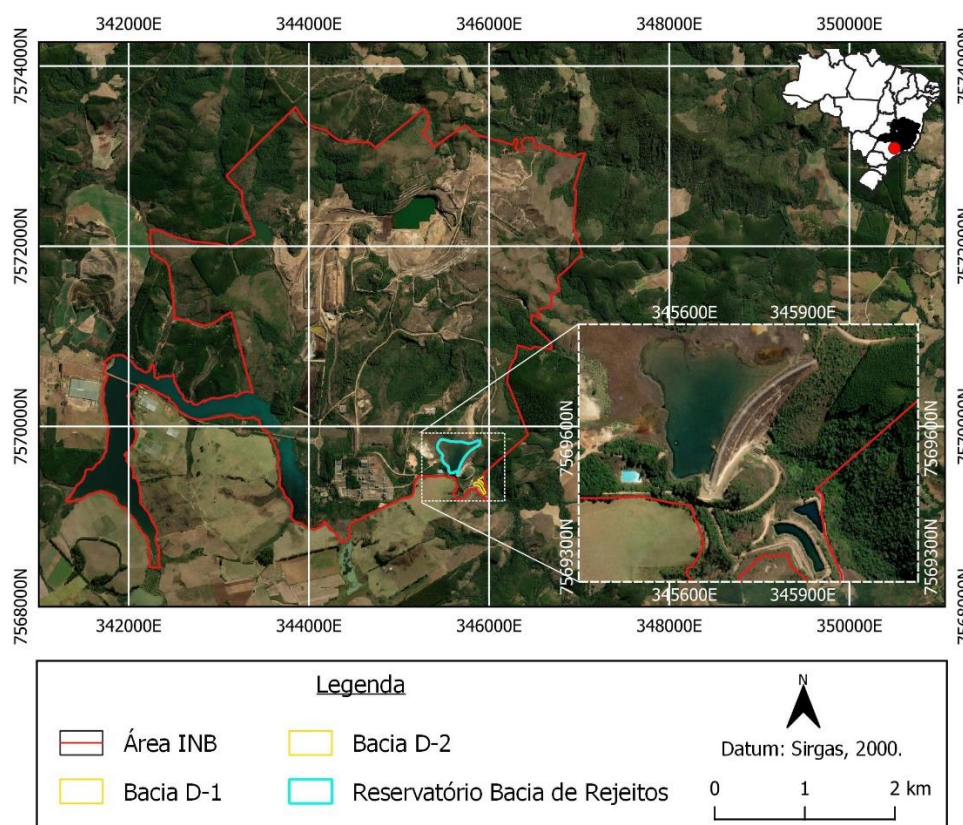


Fonte: modificado de Frayha, 1962.

As primeiras atividades de investigação geológica e prospecção mineral descobriram jazidas no Campo do Agostinho (urânio e molibdênio) em 1965 e de urânio no Campo do Cercado em 1970. A exploração de urânio no Campo do Cercado iniciou em 1982. Localizada no município de Caldas, estado de Minas Gerais, a área mais tarde recebeu o nome de Mina Osamu Utsumi. As operações de lavra e beneficiamento atuaram por 13 anos e terminaram em 1995. Durante muitos anos foi a principal mina de urânio do Brasil para suprir as demandas de insumos da geração de combustível nuclear no país (PIRES, 2013).

As atividades de extração, operação e produção do minério resultaram em diversos passivos ambientais, alvos deste estudo. Os empreendimentos mineiros estudados consistem em uma barragem de rejeito e duas bacias de contenção de águas ácidas localizadas nas extremidades sudeste e oeste das instalações da Unidade de Tratamento de Minérios (UTM), de propriedade da Indústrias Nucleares do Brasil (INB). O complexo industrial está localizado no município de Caldas, mais precisamente na região sudeste do Planalto de Poços de Caldas (Figura 2).

**Figura 2:** Imagem aérea da disposição do complexo industrial INB/Caldas, com destaque para a barragem de rejeitos e as bacias de contenção de águas ácidas (D-1 e D-2).



**Fonte:** modificado de Google Earth (2021).

## 3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

### 3.2.1 GEOLOGIA DO PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS

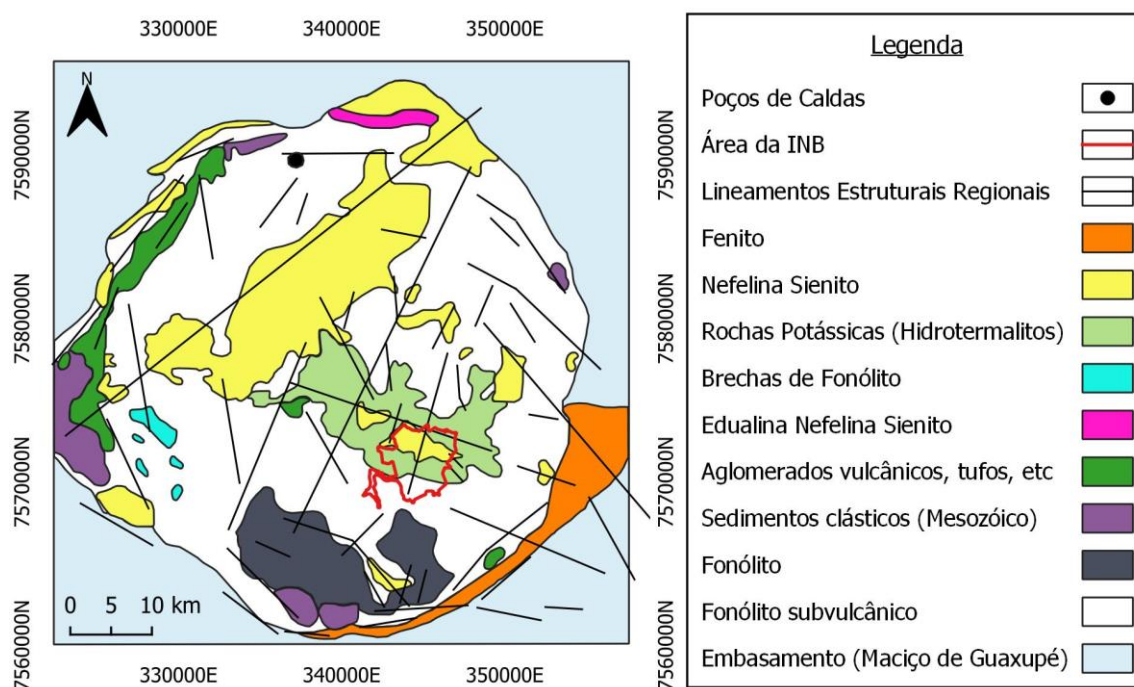
O Planalto de Poços de Caldas está inserido entre os limites do Estado de São Paulo e Minas Gerais, no divisor de águas entre os rios Pardo, Grande e Moji-Guaçu (IPT, 1976). De acordo com Christofolletti (1973), o Planalto de Poços de Caldas pode ser localizado na borda ocidental da Mantiqueira, em contato com os extremos orientais da Bacia Sedimentar do Paraná. É definido como um conjunto morfoestrutural perfeitamente caracterizado e descrito como uma estrutura circular em forma de domo, o qual possui em suas bordas escarpas de falhas que poderiam ter influências sobre o embasamento cristalino, fazendo com que a intrusão da chaminé fosse facilitada em uma zona de fraqueza do embasamento (COSTA et al., 2001).

O contexto geológico encontrado no Planalto de Poços de Caldas é bastante conhecido, graças a diversos trabalhos que foram realizados desde o final da década de 80 até os dias atuais. Derby (1887) apresentou os primeiros resultados a partir do estudo de rochas vulcânicas (fonólitos) na área, entretanto, não envolveu pesquisa a respeito dos minerais radioativos presentes no complexo alcalino de Poços de Caldas. Estudos mais recentes, propostos por Tolbert (1966), Oliveira (1974), Ulbrich (1984) e Leonardi et al. (2011), envolvem análises geoquímicas em diversos pontos da área do Planalto, com estudos focados na delimitação de depósitos minerais importantes, e, em alguns trabalhos, análises a respeito dos minerais radioativos presentes no complexo alcalino de Poços de Caldas.

Segundo o Relatório “Caracterização Geotécnica do Maciço da Mina de Urânio Osamu Utsumi”, emitido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) em 1976, as rochas mais abundantes no maciço de Poços de Caldas são os tipos alcalinos: tinguaitos, foiaitos e fonólitos. As três litologias possuem composição mineralógica similar. São constituídas essencialmente de ortoclásio, sanidina e nefelina, com diferenças baseadas no tamanho dos grãos. As informações coletadas pelo IPT (1976) são coerentes com o mapeamento geológico realizado por Fraenkel et al. (1985) na região para delimitação de uma jazida de urânio. Segundo este mapeamento, as principais litologias encontradas no Planalto de Poços de Caldas são rochas vulcânicas, como fonólitos e foiaitos, por exemplo; tinguaitos

(considerados uma variedade hipoabissal de fonólitos), chibinitos, rochas potássicas e rochas sedimentares, como arenitos e, por fim, tufos/rochas piroclásticas (Figura 3).

**Figura 3:** Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas, com destaque (em vermelho) para o complexo industrial INB/Caldas.



**Fonte:** adaptado de Capovilla (2001), modificado de Ellert (1959) e Fraenkel et al. (1985).

O contexto estrutural do Planalto de Poços de Caldas é marcado por descontinuidades, falhas e fraturas definidos em dois grandes sistemas de falhas com direções predominantes N40E e N60W (FRAENKEL et al., 1985). O primeiro grande sistema está relacionado com a formação da estrutura circular em forma de domo. O segundo grande sistema de falhas está relacionado com a tectônica regional. Os mapeamentos geológicos realizados também evidenciam a presença de falhas de direção transversal à estrutura anelar que afetaram toda a área do maciço alcalino (ALMEIDA, 1986).

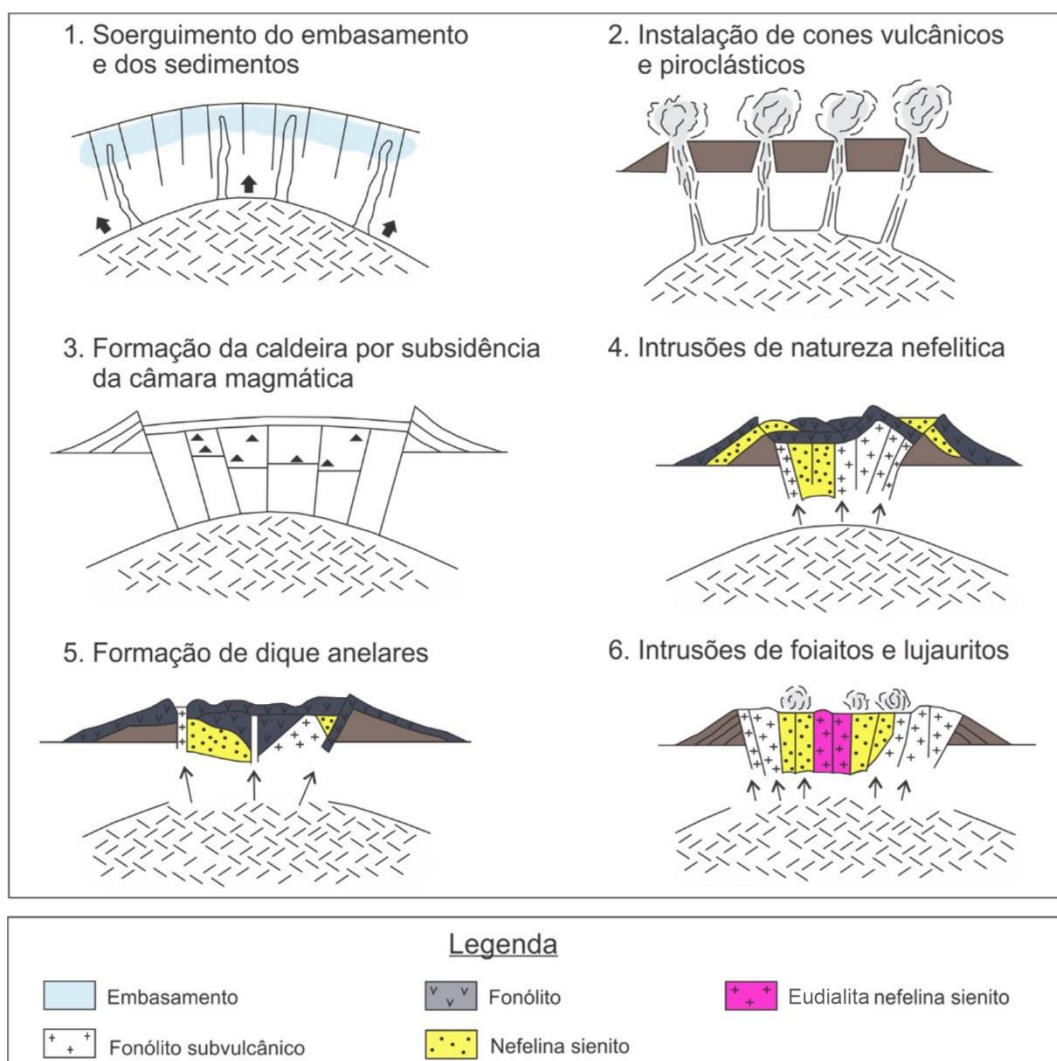
Esse comportamento das falhas e fraturas ocorrem por todo o complexo alcalino e prolongam pelas encaixantes com direções predominantes ENE, NE e NW (ALMEIDA & PARADELLA, 1977) (Figura 3). Dessa maneira, as estruturas geológicas do Planalto, como falhas, fraturas e zonas de cisalhamento, desempenham um papel fundamental na determinação da permeabilidade do subsolo. A presença de estruturas geológicas pode criar caminhos preferenciais para o fluxo de água

subterrânea, as quais afetam os processos de recarga e descarga dos aquíferos na região (FERNANDES et al., 2023).

### 3.2.2 GEOLOGIA DA MINA OSAMU UTSUMI (MOU)

O contexto geológico da Mina Osamu Utsumi sofre forte influência de uma grande chaminé de brecha, em forma de cone e seção horizontal ovalada. As dimensões desta estrutura em superfície atingem valores de 1,2 km x 0,6 km (BIONDI, 1976). De acordo com Ellert (1959), o processo de formação da chaminé alcalina de Poços de Caldas segue o modelo geológico de formação de caldeiras e pode ser dividido em seis fases (Figura 4).

**Figura 4:** Sequência evolutiva do Maciço Alcalino de Poços de Caldas segundo modelo geológico de formação de caldeiras.



**Fonte:** modificado de Holmes et al. (1992).

A primeira etapa de formação da chaminé de brecha é marcada pelo soerguimento do embasamento e dos sedimentos, que resultaram em diversos falhamentos na área. Após esta etapa, ocorreram atividades vulcânicas por um longo período, caracterizadas por processos mais lentos como derrames de lavas, e processos mais enérgicos através de tufos e brechas vulcânicas. A parte central da câmara magmática sofre subsidência após o processo de intensa atividade vulcânica, junto à processos de brechificação, milonitização e fortes ações tectônicas. A reativação da área ocorre a partir de intrusões de natureza nefelítica através de fendas radiais e circulares. No fim do processo ocorrem ainda a formação de diques anelares e intrusão de chibinitos, foiaitos e lujauritos (Figura 4).

O resultado do processo de formação da chaminé alcalina na área da MOU é a geração de uma assembleia de rochas com baixa variedade petrográfica, composta em sua maioria por nefelina sienitos; tinguaitos/fonólitos; foiaitos; brechas; e rochas ultrabásicas (MAGNO JÚNIOR, 1985). Predominantemente são encontrados nefelina sienitos na área da mina (Figura 4). Essas rochas ígneas são ricas em feldspatos sódicos, praticamente livre de quartzo, com a presença de minerais ferromagnesianos, tais como piroxênio sódico, o anfibólio alcalino e a biotita (SAMPAIO et al., 2008).

O mapeamento geológico-geotécnico realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT, 1976) durante o processo de implantação da atividade de mineração teve como objetivo determinar a distribuição espacial dos estratos geotécnicos ao longo da área da cava da mina, bem como determinar as propriedades físicas destes materiais geológicos. Essas informações foram fundamentais para a análise da estabilidade dos taludes da cava da jazida. Os estudos geotécnicos na área da cava foram realizados através de sondagens mecânicas da seguinte maneira: 4 sondagens rotativas e 10 sondagens a percussão. Essas investigações permitiram uma primeira identificação do contexto geológico-geotécnico. As sondagens rotativas foram distribuídas em um eixo NW-SE e a profundidade de investigação alcançada foi da ordem do perfil final da cava, em torno de 200 metros. Os testemunhos de sondagens foram descritos em termos litológicos (tinguaito, foiaito e brecha), medido o grau de fraturamento e designado a qualidade da rocha (RQD). Foram realizadas 163 reinterpretações em termos geotécnicos de testemunhos de sondagens rotativas. Essas sondagens foram executadas em

diferentes campanhas e as classificações quanto ao grau de alteração foram descritas na Tabela 1.

**Tabela 1** - Grau de alteração das rochas da área da cava da MOU.

<b>Grau de alteração</b>	<b>Características</b>
<b>Rocha não alterada (A1)</b>	Não foram verificados sinais visíveis de intemperismo. Rocha fresca, cristais brilhantes. Geralmente com poucas fraturas, podem apresentar ligeira descoloração nas paredes. Elevada resistência ao impacto do martelo.
<b>Rocha pouco alterada (A2)</b>	Intemperismo penetrante revelado nas superfícies das fraturas com indícios de percolação d'água. Elevada resistência ao impacto do martelo.
<b>Rocha alterada (A3)</b>	Alteração mineralógica marcante através de toda a rocha. As fraturas encontram-se manchadas e com preenchimentos de material incoerente, produzido pela alteração da própria rocha. Resistência ao impacto do martelo muito reduzido em relação ao A1.
<b>Rocha muito alterada (A4)</b>	Alteração mineralógica muito acentuada através de toda a rocha. Fraturas geralmente pouco individualizadas devido à intensa alteração de suas paredes originais. Geralmente friável, quando em fragmentos pequenos quebra sob pressão dos dedos.

As litologias encontradas foram classificadas da seguinte forma (IPT, 1976) e são apresentadas na Figura 5:

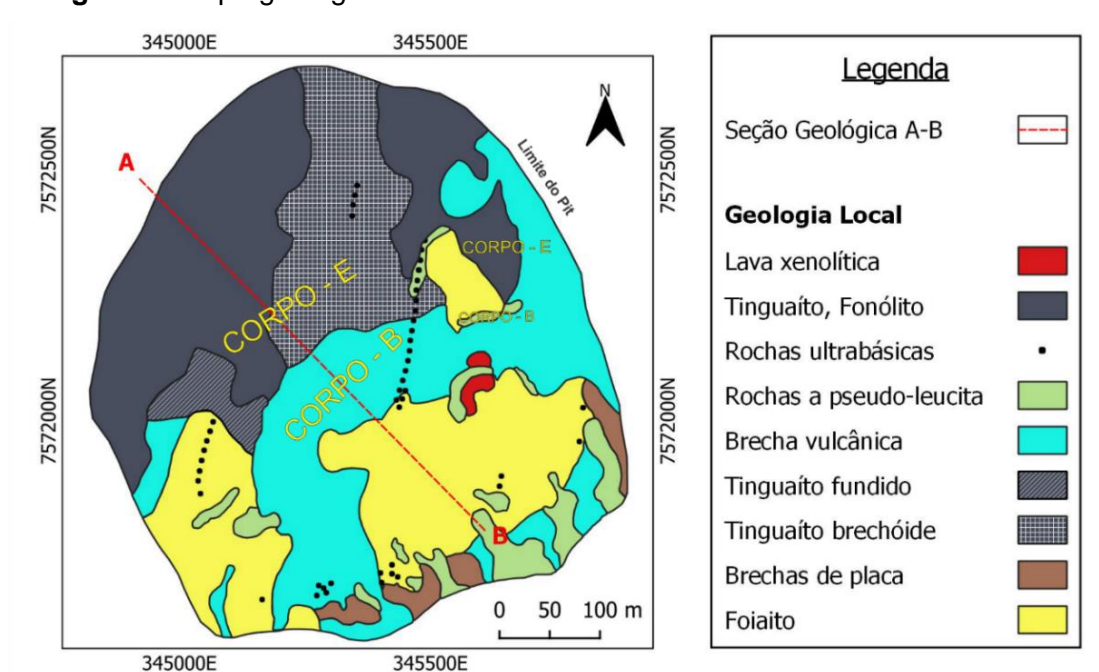
- *Aluvião*: depósito constituído em sua maioria por argilominerais e cascalhos com muita matéria orgânica. Ocorre de maneira restrita aos vales da área da mina.
- *Solo de rocha alcalina*: solo feldspático e argiloso, resultado da alteração da rocha local sob ação de agentes de intemperismo físico e químico.
- *Substrato rochoso*: constituído por rochas alcalinas do tipo tinguaito, foiaito e brechas, com fraturamento e integridade variadas.

Na parte NW da mina, há uma predominância de rochas do tipo tinguaito (até a cota de 1.220m). Os tinguaitos são rochas holocristalinas, afaníticas, de granulação fina a densa, estrutura maciça e homogênea, de cor cinza clara, castanha ou amarela.

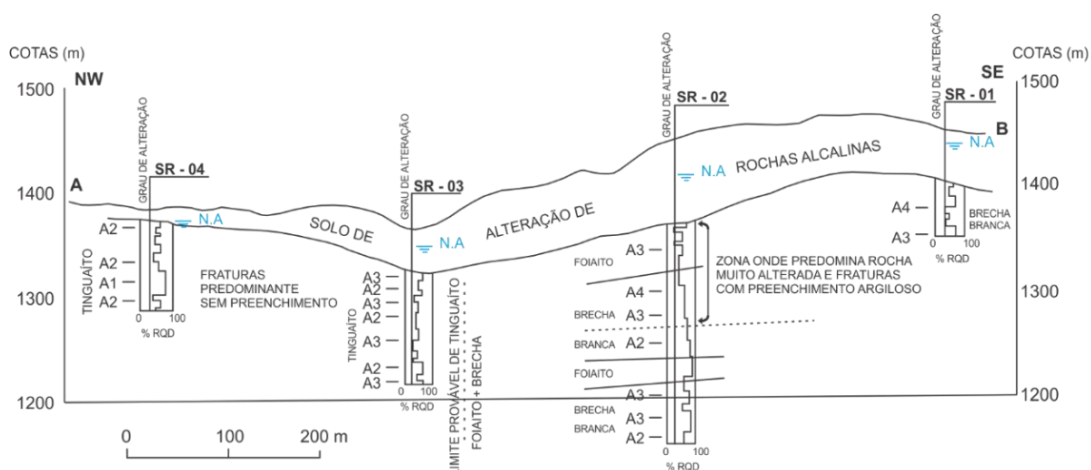
Na parte SE e central da mina, ocorrem camadas e lentes superpostas e interdigitadas de foiaitos e brechas (Figura 5).

A variedade extrusiva do nefelina sienitos, classificada como fonólito, ocorre principalmente na porção norte da área da cava. A variedade hipoabissal do fonólito, classificada com tinguaito, comumente porfiríticos, exibem feldspato potássico como principal fenocristal e são encontrados na porção norte na forma brechóide e fundido (MAGNO JÚNIOR, 1985; FRAENKEL et al., 1985). Outra variação textural do nefelina sienito, leucocrática com sinais evidentes de alteração hidrotermal, é classificada como foiaito e ocorre na porção sul da área da cava (Figura 5).

**Figura 5:** Mapa geológico em detalhe da área da cava da mina Osamu Utsumi.



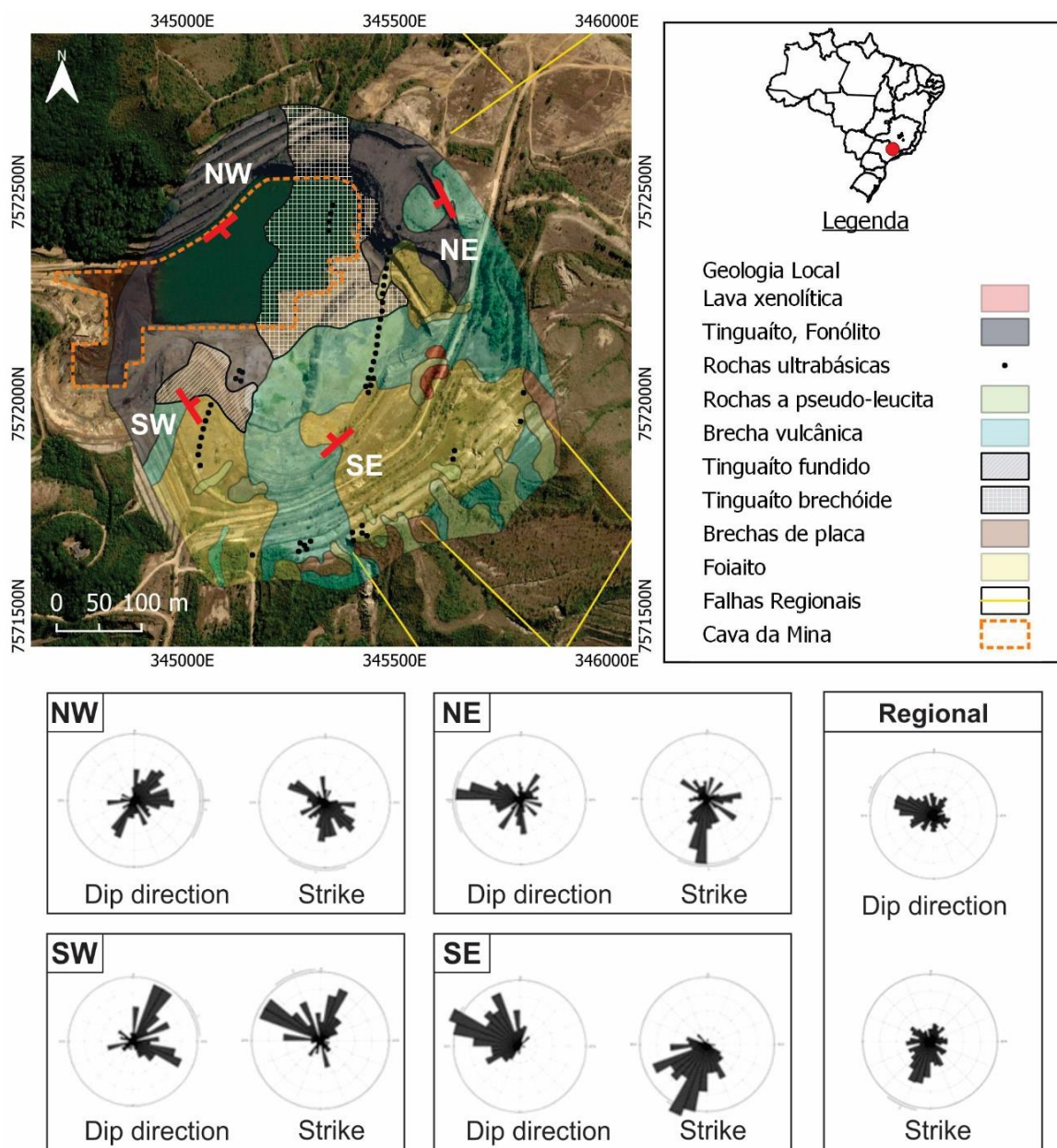
### SEÇÃO GEOLÓGICA GEOTÉCNICA A-B



Fonte: modificado de IPT (1976) e Magno Júnior (1985).

Os estudos de mapeamento estrutural ao longo de diferentes afloramentos do Planalto de Poços de Caldas evidenciaram o contexto estrutural regional marcado pela presença de dois sistemas de falhas principais de direções NE-SW e NW-SE (ALMEIDA & PARADELLA, 1977; FRAENKEL et al., 1985; ALMEIDA, 1986). Esse comportamento é observado ao longo de todo o Planalto. Os trabalhos de campo realizados por Targa (2018) e Camarero et al. (2021) nos afloramentos rochosos da frente de cava da mina Osamu Utsumi coletaram valores de direção e mergulho das fraturas condizentes com o contexto estrutural regional (Figura 6).

**Figura 6:** Mapa geológico da cava da mina e levantamento estrutural.



**Fonte:** modificado de Targa (2018).

A descrição geotécnica realizada pelo IPT (1976) a partir de testemunhos de sondagens mecânicas, prospecção geofísica e ensaios laboratoriais de materiais terrosos e rochosos constatou a existência de importantes descontinuidades estruturais na cava da MOU. Foram observados lineamentos bem evidentes, salientados pela existência de baixos estruturais, as quais foram desenvolvidos segundo as direções NW e NE. Tais lineamentos, principalmente as de direção NE, coincidiram com as zonas de maior alteração do maciço rochoso.

A descrição geotécnica foi realizada antes da operação da MOU. Em um cenário posterior as atividades de lavra, outros trabalhos realizaram medidas estruturais ao longo dos diferentes setores da frente de cava da MOU e apresentaram resultados condizentes com os estudos prévios e os desenvolvidos em escala regional. A partir de um levantamento estrutural com 755 medidas de fraturas nas quatro frentes da cava (NW, NE, SE e SW), foi observado que o principal sistema de fraturas na área tem direções preferenciais NE-SW com direção de mergulho para NW e direção NW-SE com mergulhos para NE e SW (Figura 6). Esta configuração é compatível com o contexto estrutural regional (TARGA, 2018; CAMARERO et al., 2021).

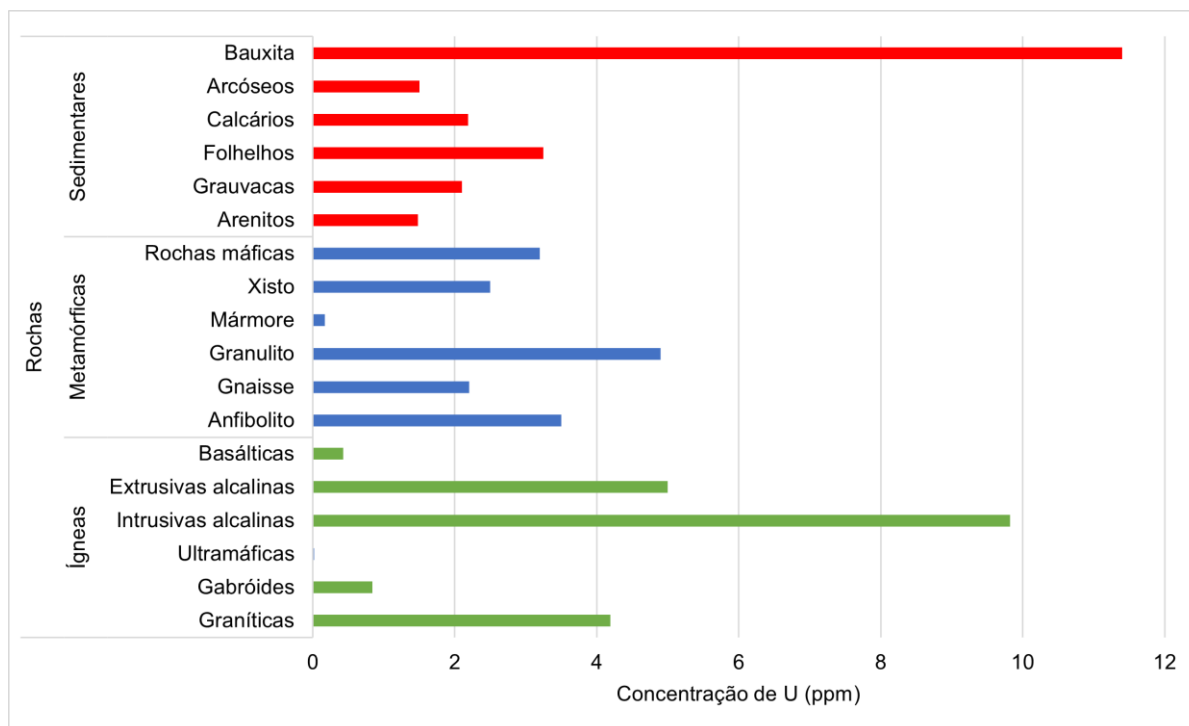
### **3.2.3 MINERALIZAÇÃO DA MINA OSAMU UTSUMI (MOU)**

O urânio ocorre em pequenas concentrações em quase todos os tipos de rocha, dessa maneira é um elemento relativamente abundante na Terra (Figura 7). Essa abundância é resultado da presença do elemento urânio como constituinte essencial de aproximadamente 100 minerais (LAUF, 2008). A uraninita (óxido de urânio) e a pechblenda (variedade não cristalina) são os minerais mais comuns (CASAGRANDE, 2019). Apesar da presença do urânio em pequenas concentrações em grande parte das rochas terrestres, contextos geológicos específicos são necessários para a ocorrência de concentrações mais altas e, por consequência, viabilizarem economicamente sua exploração enquanto recurso mineral (HEIDER, 2009).

Os processos geológicos que podem levar à formação de um depósito de urânio são classificados em pelo menos 15 tipos diferentes, que incluem desde a concentração por processos sedimentares até a formação de jazidas por processos magmáticos, metassomáticos ou intempéricos (NEA, 2018). Em rochas ígneas, o

urânio ocorre principalmente em minerais acessórios e forma soluções sólidas com elementos tetravalentes, como por exemplo, Ce, Zr e Th (BONOTTO, 2004).

**Figura 7:** Concentrações médias de urânio em alguns tipos de rocha.



**Fonte:** modificado de Duarte (2002).

O processo de mineralização da mina Osamu Utsumi está relacionado com a presença de rochas vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas da suíte alcalina (Figura 8). A assembléia de rochas possui baixa variedade petrográfica e é composta predominantemente por nefelina sienitos; tinguaitos/fonólitos; foiaítos; brechas; e rochas ultrabásicas (WABER et al., 1992). A datação argônio-argônio realizada nos diques lamproíticos, que cortam as mineralizações, estabeleceram um limite mínimo para a idade do evento hidrotermal de aproximadamente 76 Ma (SHEA, 1991; ULBRICH, 1984; FRANKLIN, 2007). Os mapeamentos geológicos realizados na região da mina Osamu Utsumi definiram a presença de três unidades mineralizadas designadas como corpos A, B e E. Os corpos mineralizados apresentam diferenças principalmente quanto a sua localização, teor médio de óxido de urânio ( $U_3O_8$ ) e composição litológica (MAGNO JÚNIOR, 1985; WABER et al., 1992), como mostra a Tabela 2 a seguir.

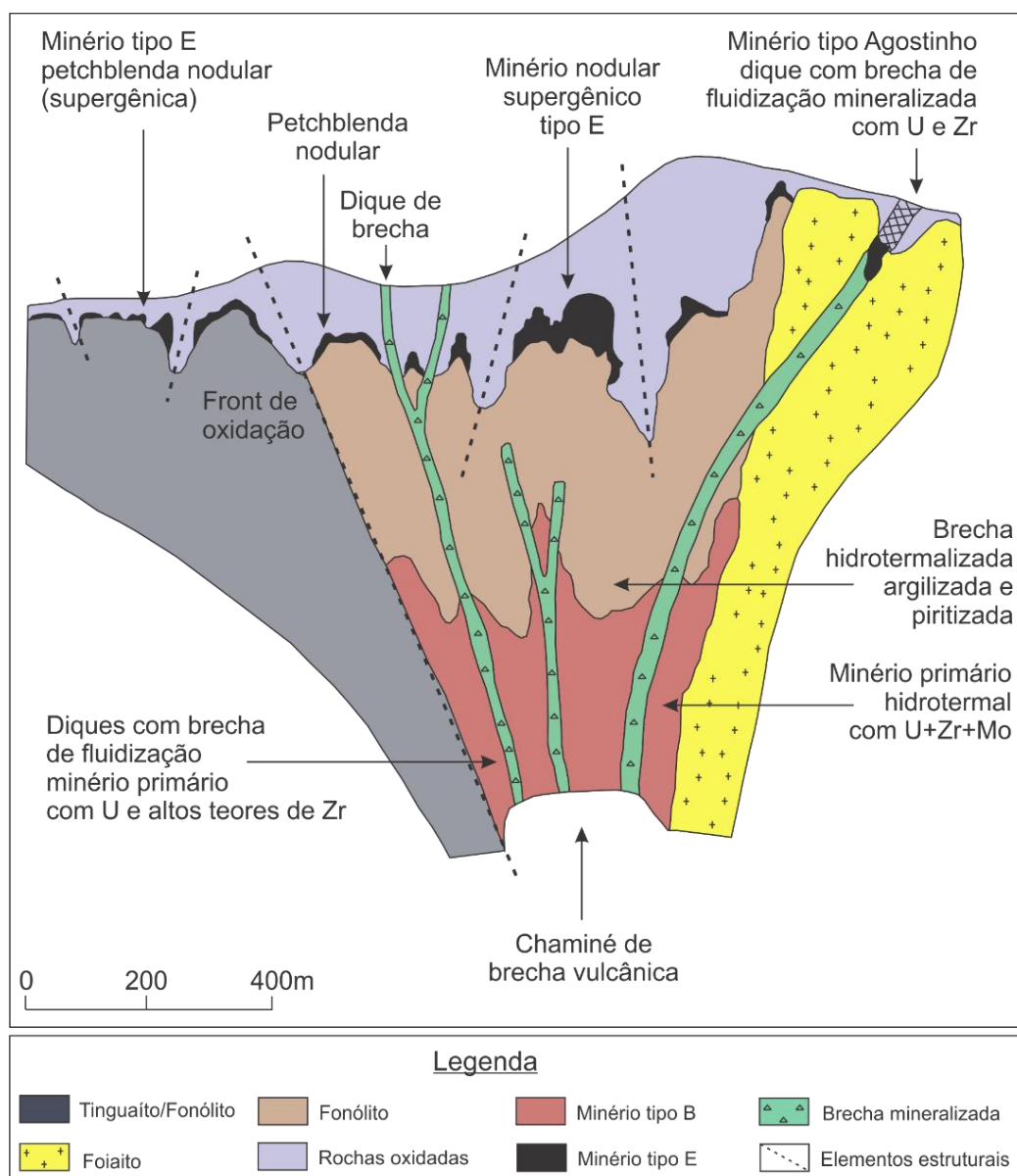
**Tabela 2** – Características dos corpos mineralizados na região da MOU.

<b>Corpo A</b>	
<b>Localização</b>	Parte interna de um dos pipes vulcânicos.
<b>Composição litológica</b>	Tinguaítos e fonolitos.
<b>Teor médio de <math>U_3O_8</math></b>	700 ppm.
<b>Corpo B</b>	
<b>Localização</b>	Parte externa do pipe.
<b>Composição litológica</b>	Depósito de piroclastos com uma litologia variada que inclui fonolitos, fonolitos porfiríticos, pseudoleucita-fonolitos, tufos, brechas, cinzas e rochas ultrabásicas.
<b>Teor médio de <math>U_3O_8</math></b>	800 ppm.
<b>Corpo E</b>	
<b>Localização</b>	De caráter secundário relacionada a processos hidrotermais.
<b>Composição litológica</b>	Apresenta semelhança litológica com o corpo A. Parte superior: constituída por pequenas concentrações de baixo teor, formadas em ambiente oxidante, no qual o urânio foi fixado por adsorção nas argilas e óxidos de ferro. Parte inferior: mineralização ocorre na forma de manchas escuras de óxidos de urânio (pitchblenda).
<b>Teor médio de <math>U_3O_8</math></b>	1.200 ppm.

**Fonte:** Waber et al. (1992).

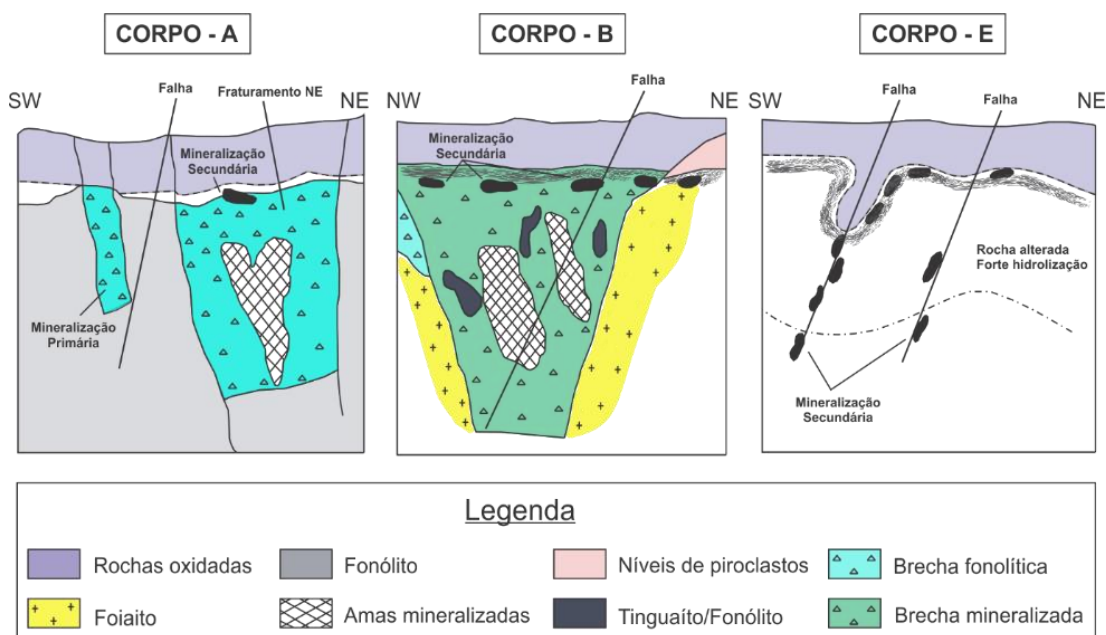
A estrutura do depósito mineral da MOU é descrita pela presença de intrusões de foiaítos e tinguaítos em encaixantes de fonólitos, seguido de processos hidrotermais pós-magmáticos em larga escala (MAGNO JÚNIOR, 1985). Os corpos mineralizados formaram no interior de uma chaminé de brecha, de formato cônico e seção horizontal ovalada. Essa estrutura possuía dimensões, em superfície, de aproximadamente 1.200 m x 600 m. A chaminé é preenchida por brechas tinguaíticas, entrecortadas por vários diques e apófises de tinguaíto e fonolito (BIONDI, 1976). Os corpos foiaíticos foram inseridos a partir de eventos explosivos, o que resultou na alteração das rochas encaixantes e geração de um grande pacote de brechas, cujo complexo processo de intrusão/explosão/brechação envolve alterações na pressão e temperatura do sistema (Figura 8) (SCHORSCHER & SHEA, 1992).

**Figura 8:** Esquema geológico da chaminé e mineralizações de urânio na MOU.



**Fonte:** modificado de Biondi (1976).

As alterações físico-químicas, associadas a emissões gasosas e soluções termais, geraram brechas com diversos padrões estruturais (CASAGRANDE, 2019). As brechas, por possuírem alta permeabilidade, permitiram a ascensão de soluções hidrotermais mineralizadas e consequente mineralização em U-Th-Zr-ETR-F (Figura 9) (WABER et al., 1992; CAPOVILLA, 2001).

**Figura 9:** Seções esquemáticas dos corpos mineralizados na MOU.

**Fonte:** modificado de Magno Júnior (1985).

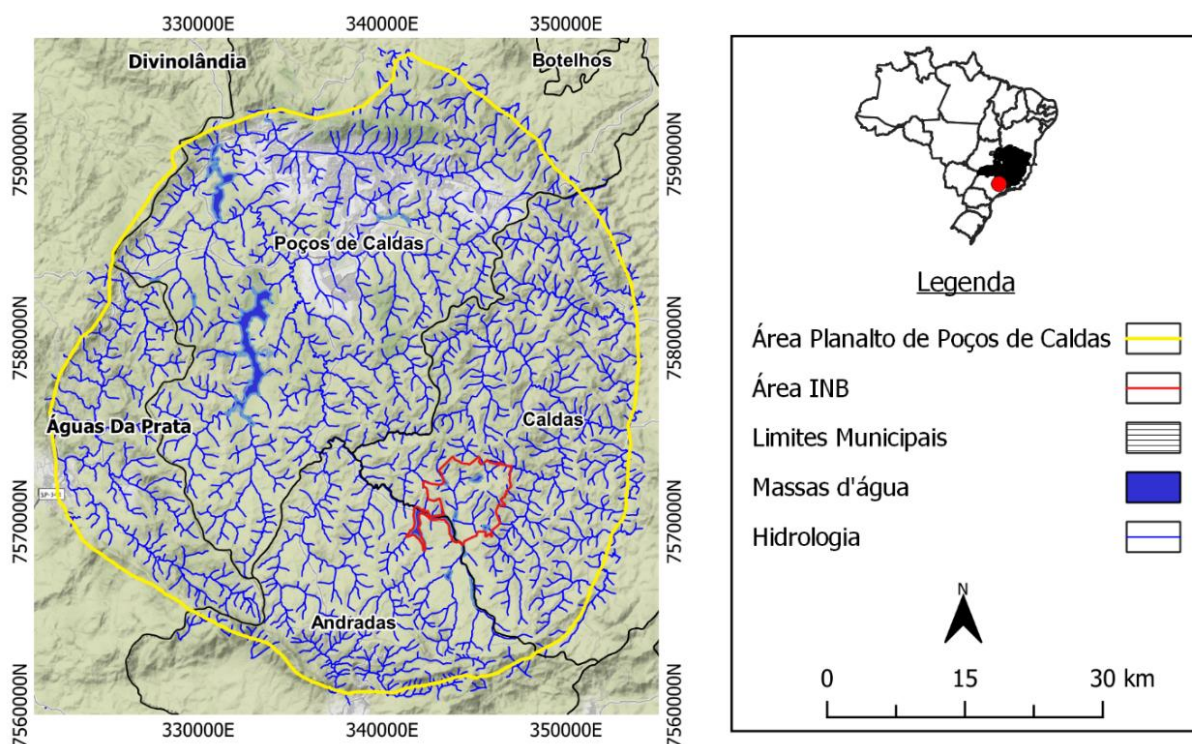
### 3.3 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

O Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas (CIPC) está inserido no contexto geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas (Figura 10). O CIPC é caracterizado pela presença de um sistema aquífero do tipo misto (GOLDER, 2012). A hidrogeologia na área da MOU é condicionada por fatores litológicos e estruturais. Dessa maneira, o padrão das juntas nos maciços rochosos define os caminhos preferenciais de fluxo (FRANKLIN, 2007).

A área de estudo faz parte da Província Escudo Oriental do Sudeste que, juntamente com a Província Escudo Oriental do Nordeste, é definida como uma subdivisão de uma unidade maior, a Província Escudo Oriental (MENTE & MONTALVERNE, 1982). Nesta unidade hidrogeológica ocorrem rochas cristalinas como gnaisses, xistos, migmatitos, granitos, quartzitos etc. de diferentes contextos geológicos e potencial hidrogeológico relativamente fraco. O complexo mineiro foi caracterizado como um sistema aquífero do tipo misto por possuir um aquífero poroso no manto de intemperismo, o qual está sobreposto e hidráulicamente conectado a um aquífero fraturado constituído pelos nefelina-sienitos não alterados (GOLDER, 2012). As rochas presentes no interior da chaminé de brecha foram alteradas pela reação da água hidrotermal com as fases sólidas dos minerais que compõem essas rochas. A

alteração hidrotermal torna as rochas plásticas ou friáveis. O aumento da plasticidade e friabilidade das rochas resultou no aumento da porosidade e permeabilidade em relação as demais rochas da mina Osamu Utsumi (ALBERTI, 2017).

**Figura 10:** Principais sistemas hidrográficos que compõem a região do Planalto de Poços de Caldas e a área da INB.



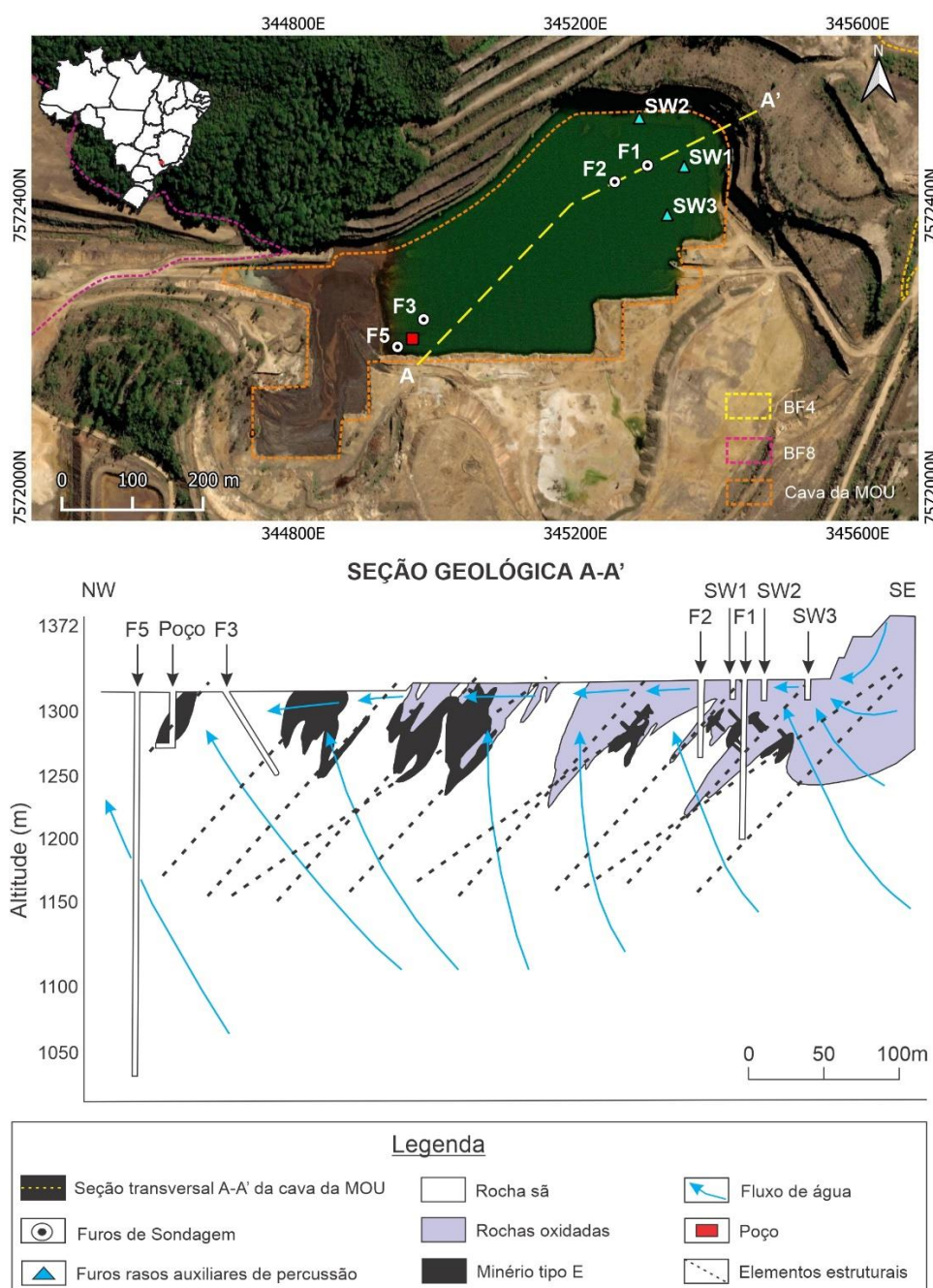
**Fonte:** elaborado pelo autor.

Outro fator importante para o condicionamento hidrogeológico na área da MOU é o contexto estrutural (Figura 11). Os esforços regionais atuantes no Planalto de Poços de Caldas resultaram em descontinuidades, falhas e fraturas definidas em dois grandes sistemas de falhas profundas, que favoreceram a percolação e infiltração de água no maciço rochoso (FRAENKEL et al., 1985). O padrão das juntas, resultado de deformações sofridas pela rocha quando submetida a esforços tensionais de naturezas diversas, define os caminhos preferenciais de fluxo subterrâneo (FRANKLIN, 2007) (Figura 11). Devido ao processo de lavra, o solo residual foi removido e depositado nos vales adjacentes. O resultado é a exposição das rochas alcalinas da cava da MOU aos agentes intempéricos (ALBERTI, 2017).

O processo de exploração dos recursos minerais é feito através do desmonte das rochas com utilização de explosivos. Essas explosões provocam alterações no

arranjo natural das fraturas próximas a superfície do terreno, além de provocar alterações topográficas. As alterações fisiográficas provocam mudanças nos fluxos de água subterrânea e na drenagem superficial (NORDSTROM et al., 1992; ALBERTI, 2017). Esse comportamento das falhas e fraturas ocorrem por todo o complexo alcalino e prolongam pelas encaixantes (ALMEIDA & PARADELLA, 1977). As zonas de descontinuidades de caráter rúptil configuram um meio de porosidade secundária que permite que as águas subterrâneas fluam por fraturamento (TARGA, 2021).

**Figura 11:** Seção transversal da cava da MOU e o contexto hidrogeológico.

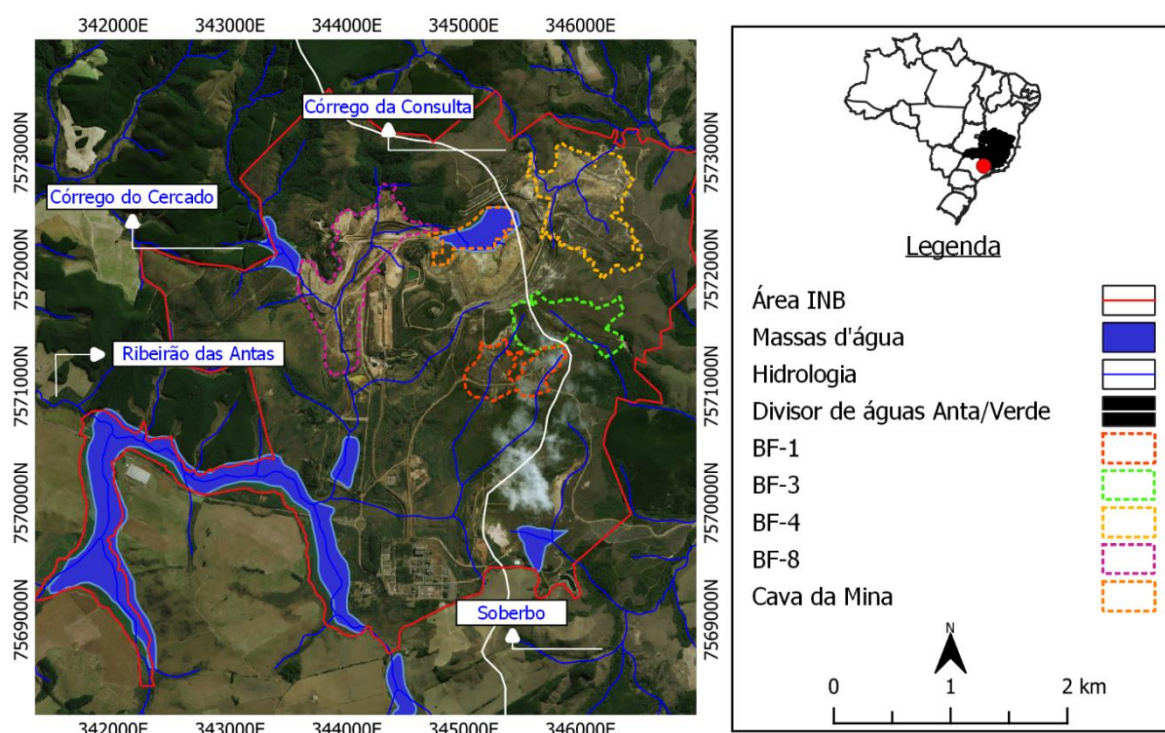


**Fonte:** modificado de Nordstrom et al. (1992).

### 3.4 CONTEXTO HIDROLÓGICO

O contexto hidrológico da área onde a UTM-Caldas está instalada é marcado pelo divisor de águas de duas importantes bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas: Ribeirão das Antas e Rio Verde, ambas afluentes do Rio Pardo (Figura 12). Todas estas bacias hidrográficas estão inseridas na grande bacia hidrográfica do Rio Paraná (ALBERTI, 2017).

**Figura 12:** Rede hidrográfica original e o divisor de bacias hidrográficas da UTM-Caldas.



**Fonte:** elaborado pelo autor.

A bacia hidrográfica do Ribeirão das Antas está localizada na entrada principal das instalações da Unidade de Tratamento de Minérios (UTM), na porção oeste da área. Nesse ponto, o curso hídrico original foi desviado a partir da construção de um reservatório de águas. A água armazenada era usada no processo de mineração de urânio. Parte da água armazenada é liberada de forma controlada para a Bacia do Rio das Antas, onde mais a jusante do curso da drenagem, forma a represa Bortolan, utilizada como usina hidrelétrica e área de lazer da população local (CIPRIANI, 2002).

O Córrego do Cercado é um dos afluentes da margem direita do rio das Antas. Essa microbacia foi alterada a partir do desvio e aterramento parcial do leito natural. A alteração fisiográfica foi realizada para a disposição de rejeito no antigo vale do

Córrego do Cercado. Atualmente a água infiltra na pilha BF-8 em condições de pH neutro e reaparece na porção sul (à jusante) na forma de drenagem ácida (TARGA, 2021).

Outra importante bacia hidrográfica na área de estudo é a bacia hidrográfica do Rio Verde. Na área de influência da MOU, dois cursos d'água estão inseridos nessa bacia: o Ribeirão Soberbo e seu afluente, o Córrego da Consulta. O Ribeirão Soberbo deságua no rio Taquari, afluente do rio Verde, e é utilizado para irrigação, pecuária e pesca (CASAGRANDE, 2019). O Córrego da Consulta, em procedimento parecido ao realizado no Córrego do Cercado, foi utilizado para a disposição de material estéril e rejeito sobre o vale na forma de pilha (BF-4).

### **3.6 VEGETAÇÃO E CLIMA**

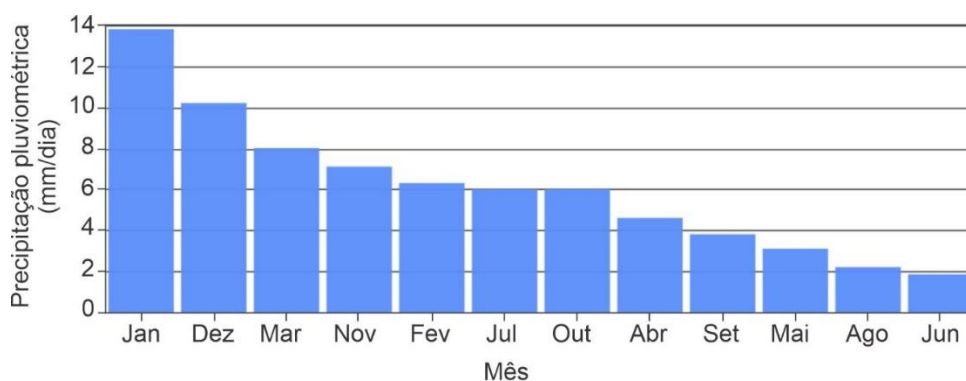
A vegetação florestal predominante no Planalto de Poços de Caldas é classificada como floresta pluvial de altitude, também denominada como Floresta Atlântica. É um tipo de domínio fitogeográfico caracterizado por receber uma grande quantidade de chuvas e apresentar elevados índices de biodiversidade e de evapotranspiração (RIZZINI, 1979; MORAES & JIMÉNEZ-RUEDA, 2008). Os elevados valores de umidade e das chuvas frequentes, fazem com que a amplitude térmica não costume ser muito elevada nessas localidades. No interior da INB, a vegetação característica é composta basicamente por cerrado e gramíneas rústicas. São identificados campos de altitude constituídos de gramíneas rústicas e vegetação arbórea e arbustiva disseminada em pequenas manchas ao longo das vertentes (CIPRIANI, 2002).

A Unidade de Tratamento de Minérios de Caldas está instalada na porção centro-oeste do Planalto de Poços de Caldas em uma região com cotas topográficas superiores a 1.300 m. Os altos valores altimétricos na área de estudo influenciam diretamente no clima da área, classificado como tropical de altitude (Classificação climática de Köppen-Geiger). Nesse clima existem duas estações bem definidas. A primeira estação bem definida na área de influência da MOU ocorre durante os meses de outubro a março. Neste período são registradas chuvas intensas e temperaturas amenas. Em um ano, o índice pluviométrico médio é de 1.700 mm, com 80% dessa precipitação concentrada nos meses desta estação (HOLMES et al., 1992; CIPRIANI, 2002). A segunda estação bem definida ocorre durante os meses de abril a setembro

e é definida por períodos de estiagem e temperaturas relativamente baixas (FAGUNDES, 2005).

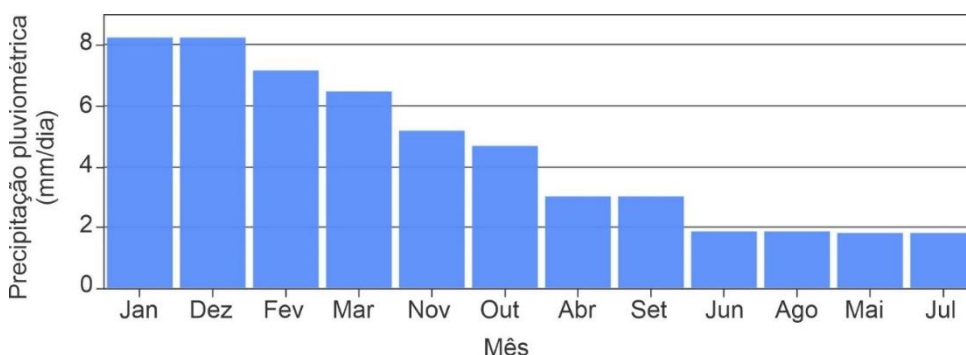
A INB dispõe de um sistema de monitoramento ambiental para análise dos índices pluviométricos ao longo do ano. O gráfico da somatória da taxa de precipitação média diária para cada mês do ano evidencia os maiores valores nos meses de dezembro e janeiro. Especialmente em janeiro, os valores observados de 13,8 mm/dia estão bem acima do valor médio anual de 5,5 mm/dia (FRANKLIN, 2007). Os índices pluviométricos ao longo do ano obtidos pelo monitoramento ambiental são coerentes com a caracterização elaborada com base nos dados de 1965 a 2019 da estação 02246047 (Beira de Santa Rita) (Gráfico 2). Essa estação, localizada próxima a barragem de armazenamento de rejeitos, também fornece valores das precipitações médias mensais, disponibilizados no Plano de Ação de Emergência da barragem (INB, 2022).

**Gráfico 1:** Precipitações médias mensais (mm/dia) no período de 1977 a 1988 na área da mineração (em ordem decrescente).



**Fonte:** modificado de Franklin (2007).

**Gráfico 2:** Precipitações médias mensais (mm/dia) na região da barragem de rejeitos (em ordem decrescente).



**Fonte:** modificado de INB (2022).

### 3.7 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

No contexto dos aspectos fisiográficos, de acordo com o mapeamento geológico em semidetalhe das Folhas CALDAS SF.23-V-D-IV e POÇOS DE CALDAS SF.23-V-C-VI, realizado em 2015 através da parceria entre o Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMIG), como parte do Projeto Fronteira de Minas, o domínio do Planalto de Poços de Caldas é marcado por cotas superiores a 1.300 m, com padrão de drenagens circulares e um relevo predominantemente suave. As bordas da estrutura possuem cotas maiores e são constituídas por litologias mais resistentes (fonólitos e tinguaítos). O interior é levemente deprimido (nefelina sienitos e rochas piroclásticas), representando assim feições esculpidas por erosão diferencial.

Na área de estudo, a partir da instalação e início das atividades da Unidade de Tratamento de Minérios de Caldas foram realizadas alterações drásticas na paisagem. Uma das primeiras mudanças perceptíveis foi a alteração do meio físico da área de instalação da mina a céu aberto, onde foram escavadas e removidas consideráveis quantidades de solo e rocha para acessar os depósitos minerais subterrâneos. Além dessa alteração fisiográfica, os estéreis e boa parte dos rejeitos foram dispostos em pilhas de rejeitos, as quais também alteraram o contexto fisiográfico natural da área. Além das pilhas de rejeitos dispostas no interior da mineração, parte das águas compostas por radionúclídeos e metais foi armazenada em uma barragem instalada em um córrego.

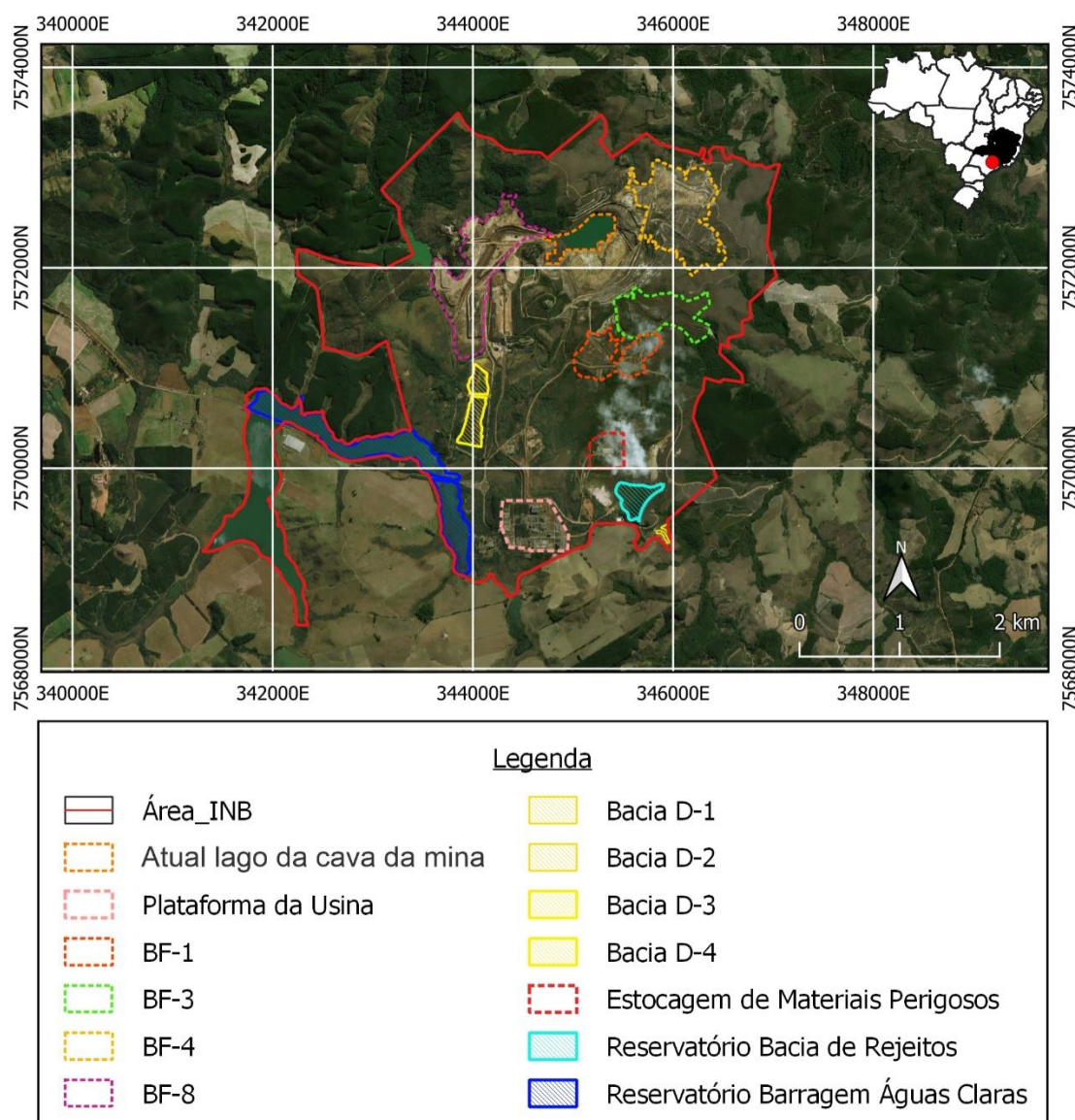
Dessa maneira, o padrão de drenagem natural foi alterado. Associado a operação da mineração, a vegetação, como árvores e plantas, foram removidas. Isso não apenas reduz a biodiversidade da região, mas também aumenta o risco de erosão do solo. Sem a cobertura vegetal, o solo fica mais suscetível à erosão pela chuva e pelo vento, o que pode levar à perda de nutrientes e atuar como agente facilitador dos processos de dinâmica superficial.

## 4. ASPECTOS GERAIS DA MINA OSAMU UTSUMI

### 4.1 CONTEXTO HISTÓRICO DAS OPERAÇÕES DA MINA OSAMU UTSUMI

O Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas (CIPC), atualmente designado como Unidade de Tratamento de Minérios (UTM) - Unidade Caldas, pertence as Indústrias Nucleares do Brasil (INB). O complexo está localizado na região sudoeste do Estado de Minas Gerais, mais especificamente no município de Caldas, com uma área de 15 km<sup>2</sup> (Figura 13).

**Figura 13:** Visão geral do complexo industrial da INB e suas principais instalações e localização das barragens de armazenamento de rejeito e água.

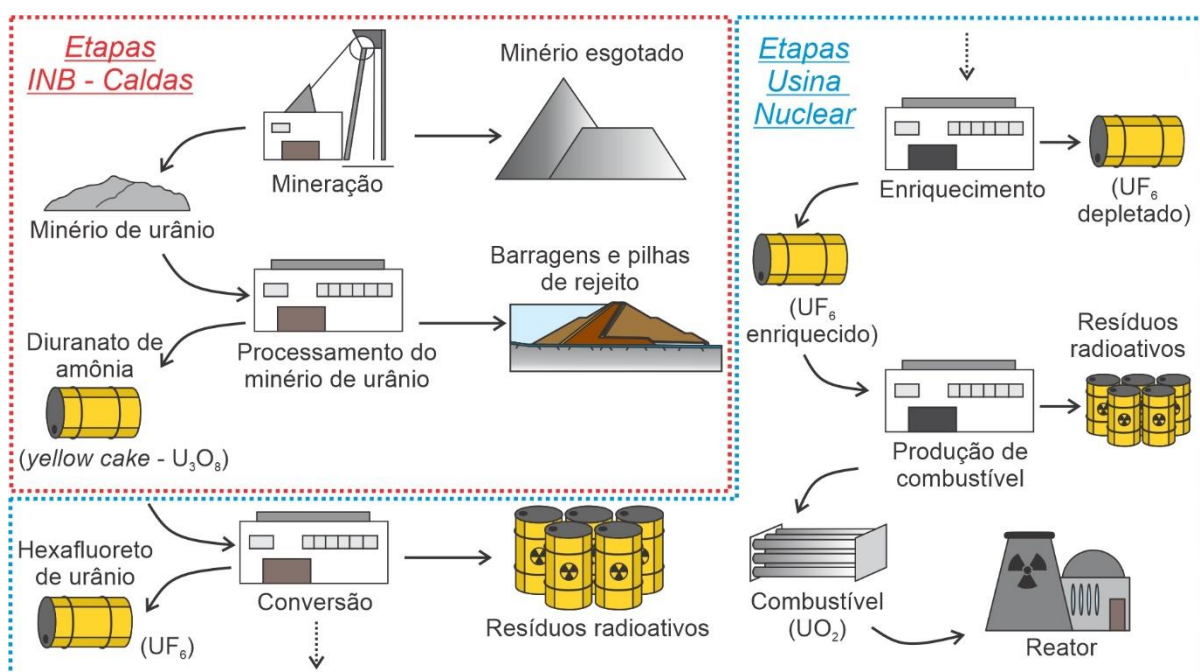


Fonte: modificado de Alberti (2017).

As instalações do complexo compreendem a antiga cava de exploração, as áreas de pilhas de estéril e material de decapagem da mina, a usina de beneficiamento físico, a usina de beneficiamento químico para extração de urânio, as barragens de rejeito e água, os prédios administrativos e de suporte operacional (TARGA, 2021). As principais atividades desenvolvidas pelo Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas foram a lavra e o beneficiamento do minério de urânio. A mina Osamu Utsumi contempla a primeira lavra para produção do *yellow-cake* (concentrado de urânio) do Brasil, usado como matéria prima para a produção de combustível nuclear. Entre os anos de 1982 e 1995, parte da demanda de minério de urânio das usinas nucleares do país, Angra I e Angra II, foram atendidas pela INB Caldas (Figura 14).

As operações da mina Osamu Utsumi eram divididas em três etapas: etapa de mineração, etapas de beneficiamentos físico e químico e etapa de disposição final dos resíduos gerados. As atividades de mineração na MOU foram iniciadas em 1977, com abertura de mina a céu aberto em formato circular de 1,2 km de diâmetro (CIPRIANI, 2002). Devido ao pouco conhecimento das características da mineralização local, a instalação funcionou de maneira descontínua até 1995, com uma produção total de 1030 ton de urânio (CIPRIANI, 2002).

**Figura 14:** Esquema da produção de combustível nuclear a partir de minério de urânio com destaque em vermelho para a etapa do processo desenvolvida na INB – Caldas.



**Fonte:** modificado de Eidemüller (2021).

A etapa de beneficiamento físico consistia em submeter o minério às etapas de britagem (primária e secundária), moagem e espessamento. O objetivo era reduzir a granulometria do minério a 800  $\mu\text{m}$ . O produto desta etapa era uma polpa neutra adequada ao transporte através de dutos para a planta da mina. Após o processo físico, a polpa mineral era submetida a um processo químico de extração por solventes orgânicos, seguida da separação por precipitação, para a produção de concentrado de urânio. O resultado era a produção de diuranato de amônia – DUA (*yellow cake*). Esse concentrado de urânio, composto predominantemente por  $\text{U}_3\text{O}_8$ , era secado e acondicionado em tambores. Posteriormente, o elemento era transportado e utilizado como combustível para reatores nucleares (CIPRIANI, 2002).

O concentrado de óxidos de urânio serve de matéria prima para o processo de enriquecimento de urânio. Nessa etapa, o objetivo é aumentar a proporção do isótopo  $^{235}\text{U}$  no material, de modo potencializar sua fissibilidade. Na usina nuclear, o urânio enriquecido é levado aos reatores, onde é submetido a processos controlados de fissão nuclear (KUCHENBECKER, 2018). Esta etapa libera grande quantidade de calor, utilizado para aquecer água e gerar vapor que, por sua vez, movimentam turbinas geradoras de energia elétrica.

A INB constatou a inviabilidade das operações no CIPC e encerrou as atividades em 1995. Em 2005 foi iniciada a descontaminação de suas instalações e terrenos. Em 2012 o IBAMA aprovou o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), elaborado a partir de estudos nas áreas de hidrologia, geoquímica, hidroquímica e radioproteção (ALBERTI, 2017). Estes estudos têm como objetivo definir as obras a serem realizadas e as ações de recuperação ambiental que deveriam ser desenvolvidas na unidade. A INB considerou aproveitar as instalações da CIPC, porém os passivos ambientais resultado das atividades de exploração impossibilitaram o atendimento aos requisitos ambientais das áreas da mina, pilhas de estéréis, barragem de rejeito e usina de processamento do minério (CASAGRANDE, 2019). Atualmente a cava da mina possui 180 metros de profundidade e recebe toda a drenagem ácida produzida nas pilhas de rejeito, posteriormente bombeada até uma estação de tratamento de efluentes.

A INB monitora as águas que passam através da unidade e o meio ambiente nas suas vizinhanças, em um círculo de aproximadamente 10 km de raio. As matrizes monitoradas são: água, sedimento, poeira no ar, solo, peixes e produtos agropecuários. Os parâmetros analisados são: o pH; parâmetros físicos e químicos

das águas; os elementos estáveis; e os elementos radioativos, ou radionuclídeos (INB, 2021). O monitoramento destes parâmetros visa assegurar a qualidade ambiental da área e arredores, entretanto, não servem como estudos da estabilidade física das estruturas. Dessa maneira, o presente estudo será realizado em duas barragens construídas com diferentes finalidades. O primeiro barramento foi construído para a disposição de rejeito oriundo da lavra de urânio. O segundo é responsável por armazenar águas ácidas em duas bacias de contenção.

#### **4.1.1 GERENCIAMENTO DE ESTÉRIL E REJEITO NA MINA OSAMU UTSUMI**

A usina de beneficiamento mineral e de extração de urânio da MOU foi projetada para tratar aproximadamente 750 mil ton/ano de minério. Essa projeção foi realizada para atender a demanda de matéria prima utilizada na produção de combustível nuclear (HEIDER, 2009). Durante os 11 anos de operação, a mineração lavrou cerca de 2,3 Mton de minério (FILHO, 2014). É estimada uma remoção de  $94,5 \times 10^6$  ton de rocha e solos durante a operação da INB Caldas e que apenas 2% desse montante removido foram encaminhados para a etapa de beneficiamento (CIPRIANI, 2002). O restante do material, em torno de  $89 \times 10^6$  ton, foi disposto em pilhas de estéreis a céu aberto chamadas de bota foras (BF), ou utilizados em construções auxiliares na instalação (Figura 15A). A primeira pilha de estéril foi construída em 1981. No final das operações, a MOU dispunha de 4 pilhas de estéril (BF1, BF-3, BF-4 e BF-8). Além desse material, 2,1 ton de minério esgotado foram dispostos na barragem de rejeito, após serem britados e lixiviados na Usina de Beneficiamento (Figuras 15C e 15D) (GERAÇÃO..., 2019, p.24).

Na INB, as pilhas de estéril eram dispostas em vales em porções próximas as nascentes, executadas por via seca, pelo método ascendente. A deposição deste material era projetada de modo a garantir sua estabilidade física. Dessa maneira, as pilhas possuem rede de drenagem superficial e de fundo, o que permite o gerenciamento dos líquidos resultantes de precipitações pluviométricas que incidem em sua área de captação (GERAÇÃO..., 2019, p.24). Os drenos de fundo têm o papel de coletar os líquidos que infiltraram na pilha de estéril (Figura 15B). Esse material era direcionado para uma Bacia de Sedimentação de Finos, impermeabilizada com manta de PEAD, e foram monitorados. No caso de chuvas intensas, ocorre a liberação desses líquidos para o meio ambiente, na forma de efluentes. Entretanto, essa

situação só ocorre se as concentrações de radionuclídeos (U-nat, Ra-226 e Pb-210) estiverem dentro dos níveis de referência estabelecidos junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (GERAÇÃO..., 2019, p.24).

**Figura 15:** Distribuição de estruturas de armazenamento de águas ácidas e radioisótopos na área da UTM – Unidade Caldas. A) Vista lateral de uma pilha de rejeito; B) Vista da base de uma pilha de rejeito; C) Barragem de armazenamento de radioisótopos e drenagem ácida; D) Vista lateral da barragem de armazenamento de radioisótopos e drenagem ácida.



**Fonte:** arquivo pessoal.

Os últimos levantamentos realizados pela diretoria de Recursos Minerais da INB a respeito da disposição dos rejeitos de mineração na UTM mostram que o volume total de rejeito era 110,4 Mton, divididos entre estéril, minério esgotado e fração sólida do tratamento de águas marginais (Tabela 3). O minério esgotado é classificado dessa maneira após o minério ser britado e lixiviado na Usina de Beneficiamento. O resultado é um rejeito com baixo teor de urânio. Na Unidade de Concentração de Urânio (URA), localizada em Caetité (BA), esse minério é disposto em pilhas no depósito de estéril,

onde fica encapsulado entre a encosta do terreno e o estéril. Na UTM, localizada em Caldas (MG), o minério esgotado era depositado em uma barragem de rejeitos.

Atualmente, o monitoramento geotécnico das pilhas e barragem de rejeitos da mina Osamu Utsumi consiste na utilização de instrumentos de auscultação tradicionalmente implantados nesses tipos de empreendimentos, como piezômetros, inclinômetros, medidores de nível d'água, vazão e recalques; em inspeções visuais de campo que visam observar possíveis anomalias que possam colocar em risco a integridade física da estrutura; e em investigações geofísicas que coletam variações de parâmetros físicos do subsolo, os quais posteriormente são processados e interpretados.

**Tabela 3** – Disposição dos rejeitos de mineração na UTM.

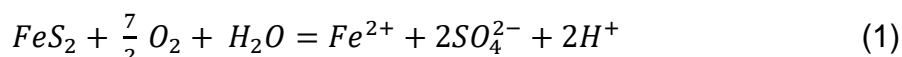
<b>Unidade</b>	<b>Material</b>	<b>Local de Estocagem</b>	<b>Massa (Mton)</b>
<b>UTM</b>	Estéril	Pilhas de estéril BF-4 e BF-8	108,2
	Minério esgotado		2,1
	Fração sólida do tratamento de águas superficiais	Barragem de Rejeitos	0,1
	<b>Total UTM</b>		<b>110,4</b>

**Fonte:** GERAÇÃO..., 2019, p.24.

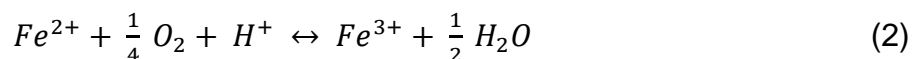
#### **4.1.2 GERENCIAMENTO DE ÁGUAS COM ALTOS TEORES DE METAIS E RADIOISÓTOPOS NA MINA OSAMU UTSUMI**

O termo “Drenagem Ácida de Minas (DAM)” é amplamente utilizado como definição à maioria dos tipos de águas influenciadas pela mineração: marginais, de processamentos minerais e residuais (JACOBS et al., 2014). Entretanto, nem toda água utilizada nas operações mineiras e industriais possuem características geoquímicas que permitam serem classificadas como DAM (SCHMIERMUND & DROZD, 1997). As águas naturais influenciadas pela mineração também podem ser neutras ou alcalinas. Apenas as águas que apresentem parâmetros geoquímicos com valores de potencial hidrogeniônico (pH) inferiores a 7 são classificadas como soluções de acidez crescente e, portanto, drenagem ácidas de minas (WILDEMAN & SCHMIERMUND, 2004).

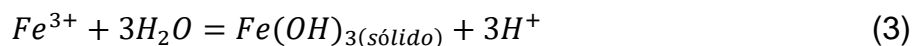
O fenômeno de drenagem ácida ocorre a partir do contato entre o oxigênio ( $O_2$ ), a água ( $H_2O$ ) e microrganismos com minerais de sulfeto, principalmente a pirita ( $FeS_2$ ). O contato entre esses elementos químicos resulta na oxidação dos minerais sulfetados para a forma iônica  $Fe^{2+}$ , íon sulfato e hidrogênio, de acordo com a equação química (AKCIL & KOLDAS, 2006):



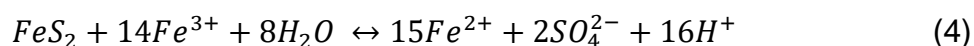
A velocidade da reação química (1) está relacionada com a superfície dos minerais de pirita expostos, a disponibilidade e concentração de oxigênio no meio e a temperatura (ALBERTI, 2017). Essa reação de oxidação química produz o aumento do total de sólidos dissolvidos, os quais influenciam nos aumentos da condutividade elétrica e fluidez do efluente (BRAM & KLEMETSUD, 2023). O contato dos íons de  $Fe^{2+}$  com um ambiente de abundância de oxigênio, atividade bacteriana e pH adequado, resultará na oxidação do metal, da seguinte forma:



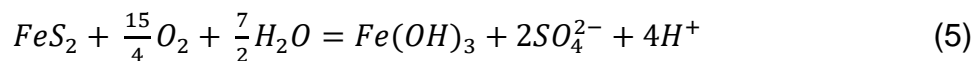
Após a oxidação do ferro, a precipitação do  $Fe^{3+}$  ocorre em condições específicas de pH (entre 2,3 e 3,5), sob a forma de hidróxido de ferro ( $Fe(OH)_3$ ) e sulfato hidratado de ferro e potássio (jarosita). Dessa maneira, ocorre a redução da concentração dos íons de ferro e, por consequência, diminuição do pH:



Como parte dos íons de  $Fe^{3+}$  não é precipitada, os íons remanescentes na solução estimulam a oxidação do ferro ferroso. O estímulo contribui para a oxidação de minerais de pirita (sulfeto de ferro –  $FeS_2$ ). Essa reação auto catalítica está associada à presença de ambientes com pH ácidos e pode ser exposta pela seguinte reação (FRANKLIN, 2007):



As equações (1) e (3) podem ser combinadas para demonstrar a produção de ferro, o qual será precipitado na forma de hidróxido ( $Fe(OH)_3$ ) a partir do contato do sulfeto de ferro, água e oxigênio:



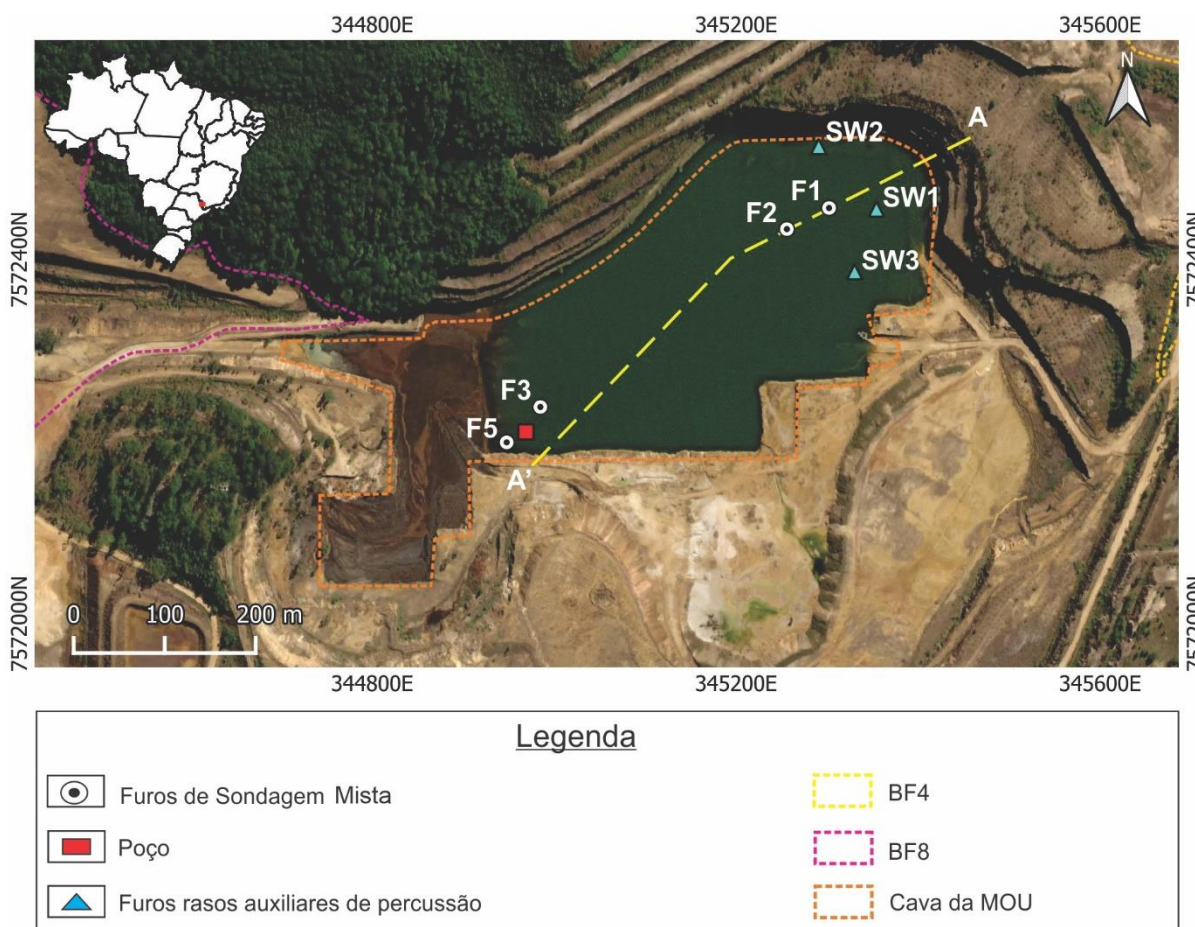
De maneira geral, o principal problema ambiental está no contato do ácido sulfúrico com os metais de minério. O ácido sulfúrico gerado dissolve os metais presentes nos minerais, liberando íons metálicos na solução. Esses metais podem incluir elementos como ferro, alumínio, manganês, zinco, cobre e outros. O material lixiviado, que agora contém ácido sulfúrico e metais dissolvidos, pode infiltrar no solo e atingir corpos d'água próximos. Esse processo é particularmente problemático quando ocorre em áreas de aquíferos, pois a água contaminada pode atingir os lençóis freáticos. Mineradoras estão cada vez mais focadas em estratégias de prevenção e mitigação da drenagem ácida de mina. Isso inclui práticas de gestão de resíduos, tratamento de efluentes, encapsulamento de rejeitos, monitoramento ambiental e a implementação de tecnologias para reduzir a formação de ácido sulfúrico durante as operações de mineração. (STUMM & MORGAN, 1989; JOHNSON & HALLBERG, 2005).

Os recentes estudos focados na prevenção e remediação de drenagem ácida de mina desenvolveram novas tecnologias para evitar ou minimizar a geração de águas ácidas durante a etapa de beneficiamento ou disposição final do rejeito de mineração (BRAM & KLEMETSrud, 2023). Os estudos, muitas vezes desenvolvidos em laboratórios, comparam a geração de lixiviado de rochas ricas em sulfetos após a adição de outros materiais, como o pó de forno de cal, para avaliar a capacidade do material carbonático em manter o pH da água próximo ao neutro e reduzir a oxidação de sulfeto (NYSTRÖM et al., 2019). A neutralização da acidez dos materiais oriundos da atividade de mineração é uma das principais técnicas de remediação e busca por novas metodologias. A neutralização pode ocorrer através da instalação de barreiras físicas compostas por materiais de composições químicas capazes de neutralizar o comportamento ácido da drenagem ácida de mina (LI et al., 2021).

Os primeiros trabalhos de análise da composição química das águas subterrâneas e modelagem geoquímica de interações água-rocha realizados já com

a mina aberta na área da cava da mina Osamu Utsumi encontraram valores de composição química atípicos para determinados elementos químicos, como altos valores de K, Fe,  $\text{SO}_2^{-4}$  e  $\text{F}^-$  e baixas concentrações de  $\text{Cl}^-$  (WABER et al., 1992; NORDSTROM et al., 1992) (Figura 16). As localizações dos poços de monitoramento de água subterrânea são apresentadas na Figura 16 e os valores dos principais parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas da cava da mina Osamu Utsumi são apresentados na Tabela 4. Os valores de pH em alguns poços de monitoramento coletaram leituras de 2,9 para águas rasas. Todos os parâmetros físico-químicos da água subterrânea analisados no estudo pioneiro de NORDSTROM et al., 1992 foram apresentados no Anexo I.

**Figura 16:** Localização dos poços de monitoramento de águas subterrâneas na cava. Importante notar na foto aérea de 2024 a presença de um lago na área da cava por conta do atingimento do lençol freático. Os furos de sondagem foram realizados antes da implantação da mina, ou seja, sem a presença do lago.



**Fonte:** modificado de Nordstrom et al. (1992).

Os valores máximos de concentração de metais pesados em corpos hídricos são estabelecidos de acordo com critérios, normas e padrões que assegurem a qualidade da água ingerida pelos seres vivos. A manifestação dos efeitos tóxicos dos metais está associada à dose ingerida e pode distribuir por todo o organismo. A ingestão de altas doses desses elementos pode afetar diversos órgãos, alterar os processos bioquímicos e organelas celulares (CETESB, 2001). De acordo com os valores de referência definidos pela *Environmental Protection Agency* (EPA), a qual estabelece os valores limites de concentração de determinadas substâncias na água subterrânea, não possui um limite específico para potássio (K) em água potável. Entretanto, os limites para os seguintes elementos químicos são: Ferro total (Fe tot), 0,3 mg/L, estabelecido como um padrão secundário que aborda efeitos estéticos como gosto e cor na água; Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), 250 mg/L, também como um padrão secundário, visando evitar gosto desagradável e efeitos laxativos; Fluoreto ( $\text{F}^-$ ), 4,0 mg/L como limite primário para proteger a saúde pública contra efeitos adversos, e 2,0 mg/L como limite secundário para prevenir manchas nos dentes e Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), 250 mg/L, definido como um padrão secundário para evitar sabor salgado na água. Os valores acima dos valores de referência foram escritos em vermelho na Tabela 4.

**Tabela 4** - Parâmetros físico-químicos encontrados nas águas subterrâneas da MOU.

Poços de Monitoramento	pH*	K (mg/L)	Fe (tot) (mg/L)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	$\text{F}^-$ (mg/L)	$\text{Cl}^-$ (mg/L)
F1	5,0	12,7	1,33	16,0	0,41	3,0
F2	5,8	13,5	1,70	14,0	2,57	<2,0
F3	5,3	42,5	88,9	540,0	7,05	<0,2
F5	6,3	11,8	6,27	28,0	6,0	<2,0
SW1	3,1	37,7	53,5	1200,0	14,9	<2,0
SW2	2,9	29,9	8,53	458,0	8,98	1,1
SW3	3,4	29,0	0,14	500,0	12,4	2,2

Fonte: Nordstrom et al. (1992).

Em um estudo mais recente realizado no reservatório da cava da MOU, Tedeschi (2005) analisou a composição química das águas ácidas e identificou os seguintes elementos como predominantes, com concentrações superiores a 1,0 mg/L: Al, Fe, Mn, Zn, Na, K, Ca, Mg, Sr, Si e Y. O ânion  $\text{SO}_4^{2-}$  foi destacado como o mais

significativo, uma vez que a presença de sulfato em concentrações elevadas é um indicador direto da oxidação de minerais sulfetados e da conseqüente acidificação da água, característica típica da drenagem ácida de mina. Outros elementos como Cu, Mo, Sn, V, Zr, Sb e Bi apresentaram concentrações abaixo dos limites de quantificação, enquanto Pb e Cr tiveram valores próximos a esses limites. Por fim, os elementos Cd, Co, Li, Sc, Ni e Be foram classificados como traços.

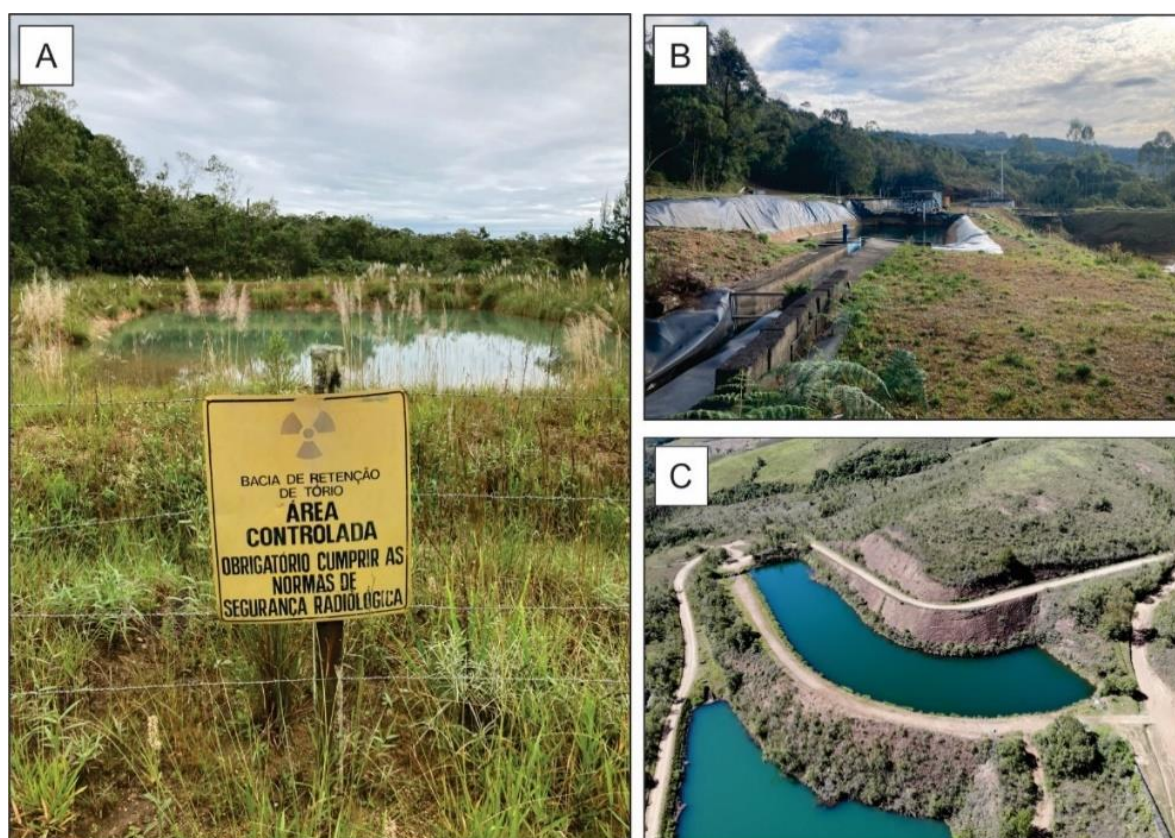
O monitoramento da concentração de elementos radioativos e metais na fração solúvel no entorno e dentro da Unidade de Tratamento de Minérios tem como principal objetivo garantir que as concentrações destes elementos não ultrapassem os valores máximos permitidos pelos órgãos ambientais (CETESB, 2001). Toda a água ácida armazenada em bacias de contenção e cava da mina é bombeada até a Estação de Tratamento de Águas Ácidas (ETA) para receber o devido tratamento antes de ser lançada ao meio ambiente (NÓBREGA et al., 2008). Na UTM - Unidade Caldas, as águas ácidas influenciadas pela atividade de mineração primeiramente foram dispostas em bacias de contenção em diversos pontos da unidade (Figura 17). Após o término das atividades de lavra da mina, parte das águas com acidez e teor de metais muito elevados foram canalizadas para o interior da área da cava da MOU (NÓBREGA, 2007).

Na barragem da mina, além da presença de águas ácidas, foram armazenadas águas com radioisótopos. A presença de radioisótopos em águas provenientes de minerações de elementos radioativos, como o urânio, é uma preocupação ambiental significativa devido aos riscos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente. Quando o urânio e outros minerais radioativos são extraídos durante a mineração, os radioisótopos associados a esses elementos podem ser liberados e contaminar as águas superficiais e subterrâneas nas proximidades das minas. Os radioisótopos mais comuns encontrados em águas de mineração de urânio incluem o urânio-238 (U-238) e o urânio-235 (U-235), bem como seus produtos de decaimento, como o rádio-226 (Ra-226) e o rádio-228 (Ra-228). Esses radioisótopos são altamente radioativos e podem representar riscos à saúde humana se ingeridos, inalados ou em contato prolongado com a pele.

A contaminação das águas por radioisótopos pode ocorrer de várias maneiras durante a atividade de mineração de urânio. Por exemplo, a drenagem ácida de mina além de liberar águas com ácido sulfúrico e metais pesados em sua composição, também pode conter urânio e seus produtos de decaimento. Além disso, os resíduos

de mineração muitas vezes contêm altas concentrações de radioisótopos e podem representar uma fonte contínua de contaminação caso não sejam adequadamente gerenciados e tratados. A infiltração desses rejeitos no solo pode contaminar os aquíferos subterrâneos, enquanto o escoamento superficial pode transportar os radioisótopos para rios, lagos e outros corpos d'água, e afetar a vida aquática e potencialmente expondo as comunidades que dependem dessas fontes de água.

**Figura 17:** Estruturas de armazenamento de passivos ambientais oriundos da atividade de mineração em diferentes pontos da UTM – Unidade Caldas. Bacias de contenção de águas ácidas (A e B) e radioisótopos (C).



**Fonte:** arquivo pessoal.

## 5. DEFINIÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS MINEIROS ALVOS DO ESTUDO

Os locais de estudo foram definidos de acordo com o interesse na investigação dessas estruturas, tanto academicamente como do ponto de vista de mercado. Atualmente, em minerações é comum o uso da geofísica como uma ferramenta complementar de investigação das condições de integridade física da estrutura (ARCILA et al., 2021; OLIVEIRA, 2021). Entretanto, estudos sob barramentos com a integração da análise estrutural e a utilização de métodos geofísicos ainda não foram realizados, o que traz interesse e inovação para essa área de estudo. Foram determinadas duas áreas focais de investigação: a barragem de reservatório de rejeito de urânio e duas bacias de contenção de águas ácidas da mineração. As áreas foram definidas de acordo com os seguintes critérios:

I. *Porte das estruturas:*

A barragem de rejeito de urânio da MOU é a primeira barragem de exploração de urânio do Brasil. Os materiais oriundos da atividade de exploração foram armazenados durante anos. O resultado é uma estrutura robusta, bem instrumentada, com material que exerce considerável pressão no aquífero fraturado.

II. *Conectividade entre os empreendimentos mineiros:*

Além da barragem de rejeito armazenar minério esgotado e fração sólida do tratamento de águas superficiais, boa parte do material armazenado é água de composição ácida. Essas águas são transportadas a partir de tubulações até as bacias de contenção investigadas no estudo.

III. *Questões ambientais:*

A área de estudo possui duas bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas próximas: Ribeirão das Antas e Rio Verde. Além desse fator, o barramento foi instalado no vale do Córrego do Soberbo, utilizado para irrigação, pecuária e pesca. Portanto, estudos de possíveis percolações do material represado são relevantes a fim de identificar contaminações da água ao redor da área da mineração.

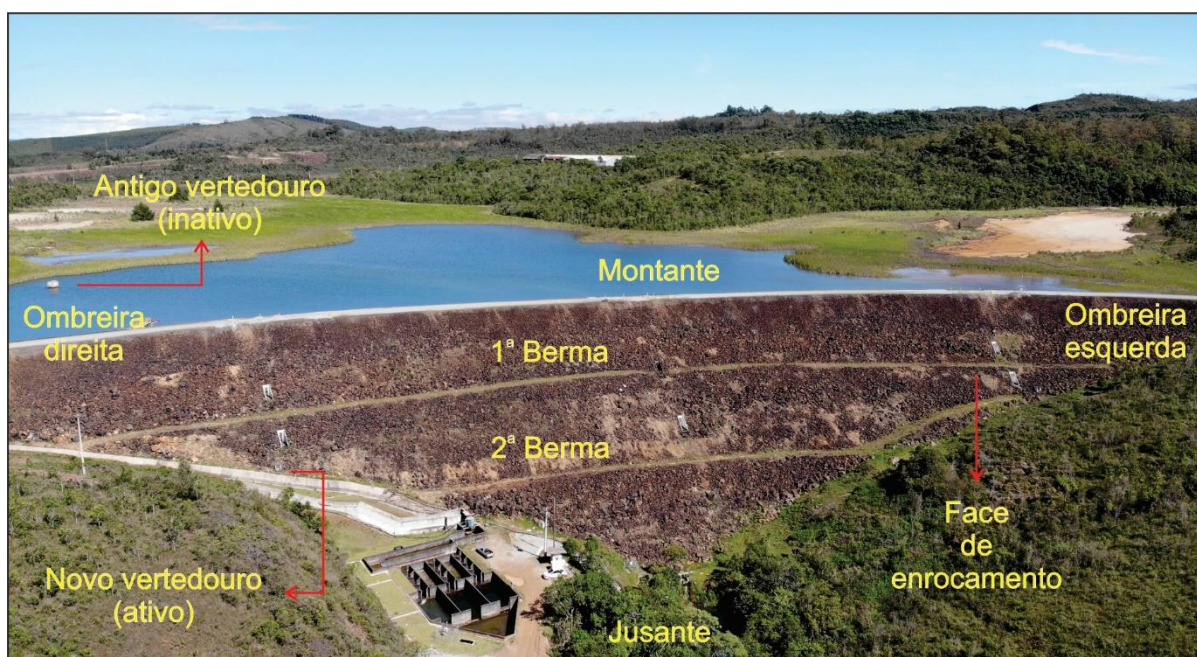
## 5.1 CARACTERIZAÇÕES DOS EMPREENDIMENTOS MINEIROS

### 5.1.1 BARRAGEM DE ARMAZENAMENTO DE RADIOISÓTOPOS

A barragem de rejeitos está localizada na região sudeste da mina em uma área de 29,2 ha (Figura 18). O barramento foi construído no início da década de 1980 e conta com uma capacidade de volume real de 1 milhão de m<sup>3</sup>. Durante a fase de operação, aproximadamente 4,8 TBq (130 Ci) de <sup>238</sup>U, 15 TBq (405 Ci) de <sup>226</sup>Ra e 4,2 TBq (112 Ci) de <sup>228</sup>Ra foram descartados neste reservatório (INB, 2021). Desde 1995, após o encerramento das operações da UTM, o reservatório não recebe rejeitos.

Os estudos mais recentes mostraram que a barragem armazena em torno de 2,1 ton de minério esgotado (GERAÇÃO..., 2019, p.24). Este material recebia essa classificação após ser britado e lixiviado na Usina de Beneficiamento. O resultado era um rejeito com baixo teor de urânio. O reservatório abriga também 0,1 ton de fração sólida do tratamento de águas marginais. Os efluentes líquidos da Usina de Beneficiamento foram tratados e os sólidos resultantes eram lançados na forma de polpa na bacia de rejeitos (GERAÇÃO..., 2019, p.24).

**Figura 18:** Imagem aérea do corpo do barramento da barragem de rejeito da MOU.

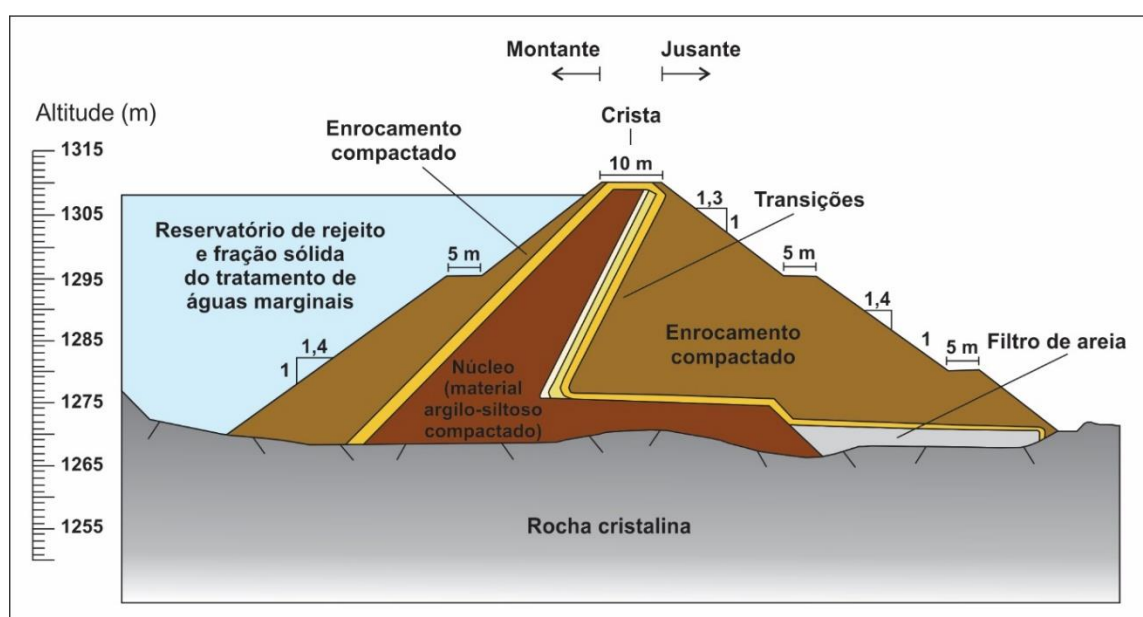


**Fonte:** elaborado pelo autor.

O maciço da barragem não foi construído com os rejeitos da atividade de mineração. O corpo é constituído por um maciço de enrocamento compactado e núcleo argiloso inclinado para montante. A estrutura possui eixo curvo, com concavidade voltada para jusante, dois níveis de construção visíveis a jusante, 380 metros de raio, 435 metros de comprimento e 42 metros de altura máxima (Figura 19). A barragem possui sistema de filtros e transições entre o núcleo argiloso e os enrocamentos de montante e de jusante, ambos conectados a um tapete de drenagem horizontal (Figura 19). Esse sistema hidráulico capta as águas percoladas pela barragem e fundação e as conduz de maneira controlada para jusante, onde são coletadas por meio de caixas de passagem e conduzidas para um sistema de chicanas. As águas percoladas, juntamente com as águas superficiais, são tratadas com solução de cloreto de bário ( $BaCl_2$ ) para reduzir a concentração de rádio (Ra) através de sua decantação. Após o tratamento, são restituídas ao curso d'água natural (GERAÇÃO..., 2019, p.24).

A instrumentação geotécnica disposta ao longo do barramento foi instalada em diferentes etapas do empreendimento mineiro. Durante o processo construtivo foram instalados 23 piezômetros pneumáticos de resposta rápida a poropressão gerada: 9 no núcleo argiloso, 2 no tapete drenante e 12 na fundação. O objetivo era controlar o comportamento da estrutura durante a construção do barramento.

**Figura 19:** Esquema da seção transversal típica da barragem de rejeitos.



**Fonte:** adaptado de Arcila (2020); modificado de projeto executivo da barragem de rejeitos da Mina Osamu Utsumi (INB, 2012).

Durante a fase operacional e após o descomissionamento, foram instalados 20 piezômetros tipo Casagrande no núcleo argiloso de montante. Além dos piezômetros, a barragem possui outras instrumentações, como uma placa medidora de vazão da saída de água do tapete drenante, medidores de vazão na saída do tapete drenante, 25 marcos topográficos e medidor do nível de água do reservatório (GERAÇÃO..., 2019, p.24).

O projeto da barragem estabelecia a construção de um vertedouro do tipo tulipa. Esta estrutura era conectada a uma galeria de concreto, apoiada na ombreira direita, sob o maciço da barragem no trecho sub-horizontal e assentado sobre a encosta, de acordo com a topografia original, no trecho subvertical (ARCILA, 2020). A passagem da água sentido jusante era realizada por meio de tubos de concreto com escoamento livre. Entretanto, em maio de 2019 foi construído um novo vertedouro à céu aberto na ombreira direita, seguido pela desativação do antigo sistema (ARCILA, 2020).

Ao redor da área da barragem foram instalados quatro poços de monitoramento (PM1, PM2, PM3 e PM4). O objetivo da instalação desses poços é monitorar os parâmetros físico-químicos da água na área, visto que possíveis alterações nas concentrações de determinados elementos químicos podem indicar um fluxo do material armazenado. A Tabela 5 apresenta os pontos de localização dos poços, a cota de boca e profundidade do poço e a profundidade do nível d'água (N.A) durante a execução e instalação do poço de monitoramento.

**Tabela 5** – Localização dos poços de monitoramento na área da barragem de urânio.

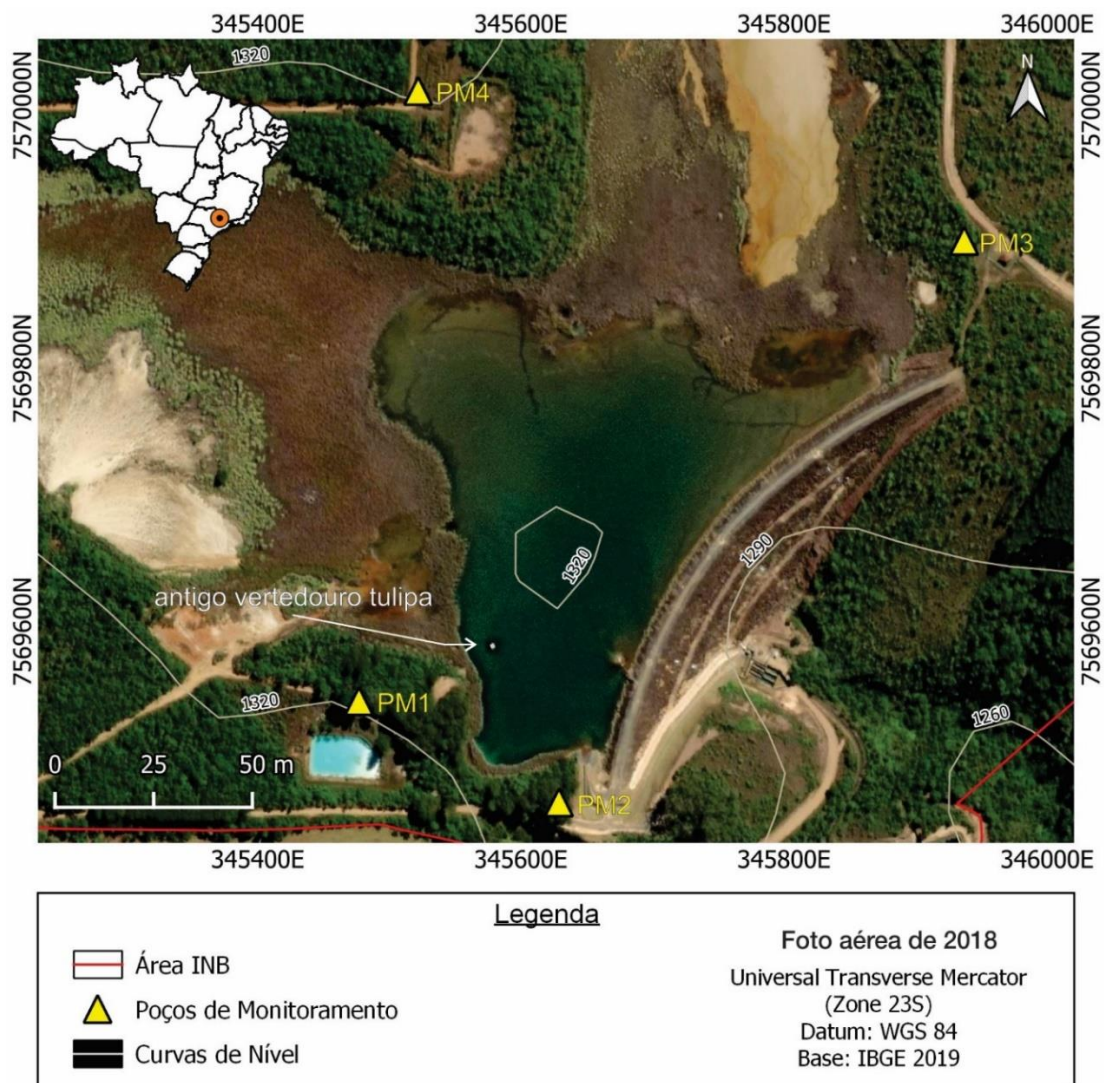
Poço	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)	Altitude (m)	Prof. (m)	Prof. do N.A (m)	Cota N.A (m)
PM1	345477	7569547	1314	17	7,06	1306,94
PM2	345629	7569470	1313	12	9,18	1303,82
PM3	345937	7569897	1310	15	4,04	1305,96
PM4	345522	7570011	1323	18	2,99	1320,01

**Fonte:** dados fornecidos pela INB.

Os poços de monitoramento foram instalados em regiões estratégicas ao redor do reservatório e das extremidades das ombreiras do barramento. Embora não apresentados na imagem, existem outros poços de monitoramento na região oeste e

leste do reservatório. Dessa maneira, foi instalada uma rede de monitoramento da água subterrânea em toda a área da barragem (Figura 20).

**Figura 20:** Localização dos poços de monitoramento próximos a barragem de rejeito.



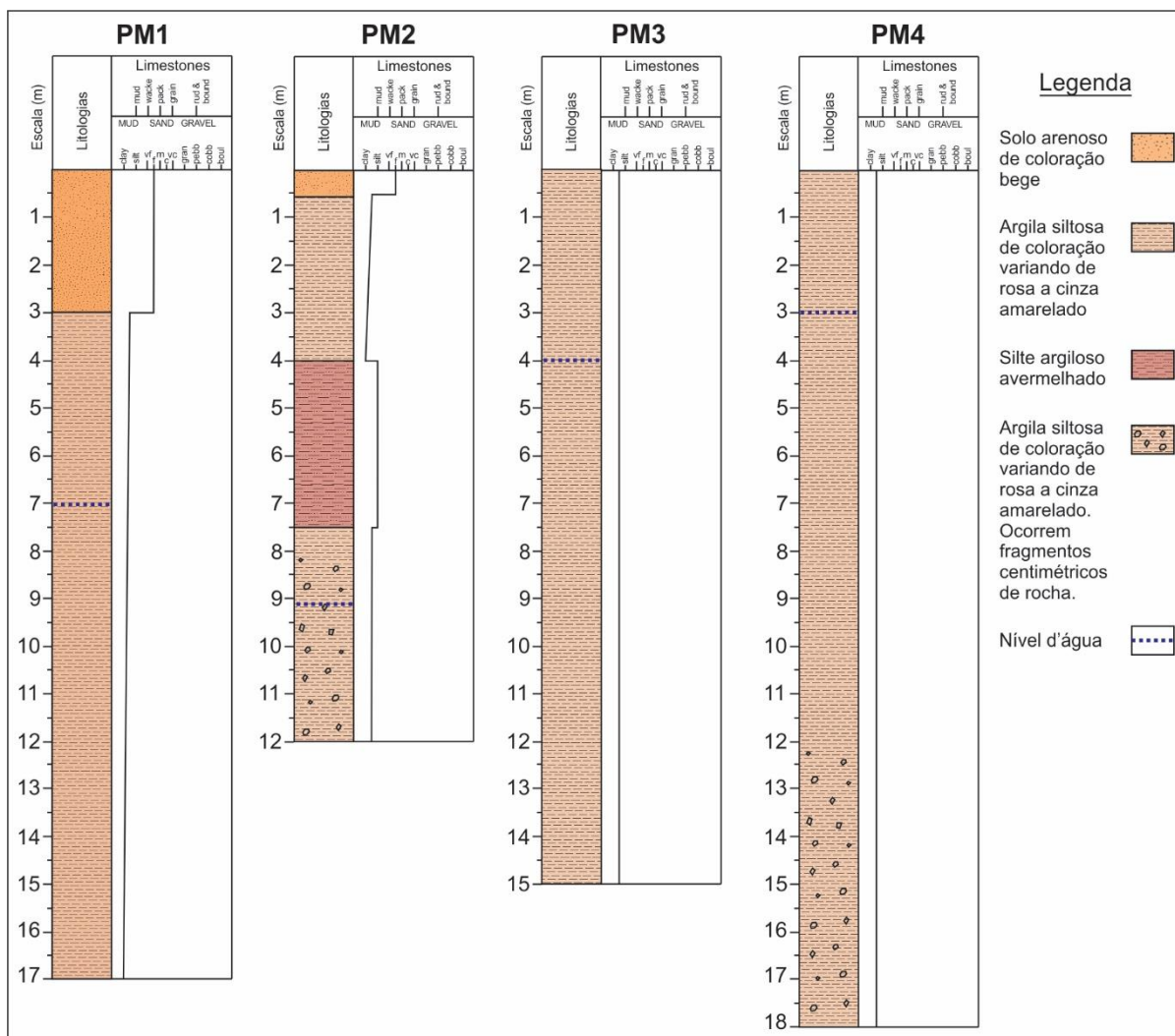
**Fonte:** elaborado pelo autor.

A execução dos poços de monitoramento permitiu analisar e descrever os materiais coletados durante a perfuração. O resultado foi a caracterização de 4 camadas estratigráficas no entorno da barragem: solo arenoso, argila siltosa, silte argiloso e argila siltosa com fragmentos centimétricos de rocha (Figura 21).

A caracterização estratigráfica da área apresentou um material mais arenoso nas camadas mais superficiais (até 3 metros de profundidade) nos poços PM1 e PM2. De maneira geral, a área apresenta materiais de pequena granulometria, com variações entre silte e argila. Embora os poços de monitoramento apresentem

informações rasas, com maiores profundidades de investigação de 17 metros e 18 metros, foram observados fragmentos centimétricos de rocha nos poços PM2 e PM4. Essa informação permite interpretar que o topo rochoso na área do barramento está disposto em profundidades rasas (Figura 21).

**Figura 21:** Perfil geológico dos poços de monitoramento ao redor da barragem de rejeito.



**Fonte:** elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela INB.

### 5.1.2 BACIAS DE DECANTAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

As águas oriundas da atividade de mineração com altos valores de acidez (pH inferiores a 7) e teores de metais foram armazenadas em bacias de decantação de águas ácidas em diversos pontos da UTM - Unidade Caldas. Dentre essas bacias, duas bacias de decantação (D1 e D2) estão localizadas na região sudeste da mina e foram escolhidas para o estudo devido ao fato de represarem as águas provenientes

do extravasamento do reservatório da barragem de rejeito de urânio (Figura 22). As duas estruturas foram construídas a partir do processo de escavação do terreno natural e compactação do solo.

**Figura 22:** Imagem aérea das bacias de contenção de águas ácidas da MOU.



**Fonte:** elaborado pelo autor.

O nível d'água armazenado no reservatório de rejeito de urânio é controlado pelo vertedouro à céu aberto instalado na ombreira direita do barramento. Dessa maneira, o nível do reservatório permanece em uma faixa segura durante os períodos de chuvas fortes e/ou prolongadas. A água que extravasa pelo vertedouro é direcionada até um reservatório localizado na base do talude de jusante. Devido a variação topográfica, foi instalado no reservatório um sistema de chicana formado por placas verticais de concreto responsáveis por diminuir a velocidade da água oriunda do reservatório. Nas chicanas ocorre adição de sulfato de bário ( $BaSO_4$ ) na água de saída da barragem de rejeitos. Após essa etapa, a água do reservatório é canalizada até uma tubulação e disposta na bacia de contenção D1 (Figura 23).

As bacias de contenção D1 e D2 foram dispostas em cotas topográficas diferentes: a bacia D1 foi instalada em cotas topográficas maiores que a bacia D2. Essa disposição teve como objetivo conectar as bacias a partir de um vertedouro localizado na região sudeste da bacia D1. Ambas as bacias foram construídas a partir da escavação da área. A água do reservatório é armazenada primeiramente na bacia D1. Conforme o nível d'água desta bacia aumenta, ao atingir o limite do vertedouro instalado, as águas fluem devido à força gravitacional até a bacia D2, onde são represadas e monitoradas. Nas bacias D1 e D2 ocorre a precipitação do sulfato com radioisótopos em condição de pH alcalino. No final do processo químico, a água é liberada em condições físico-químicas adequadas para o ambiente.

**Figura 23:** Disposição das estruturas hidráulicas no barramento e o ponto de liberação de águas com radioisótopos para as bacias D1 e D2.

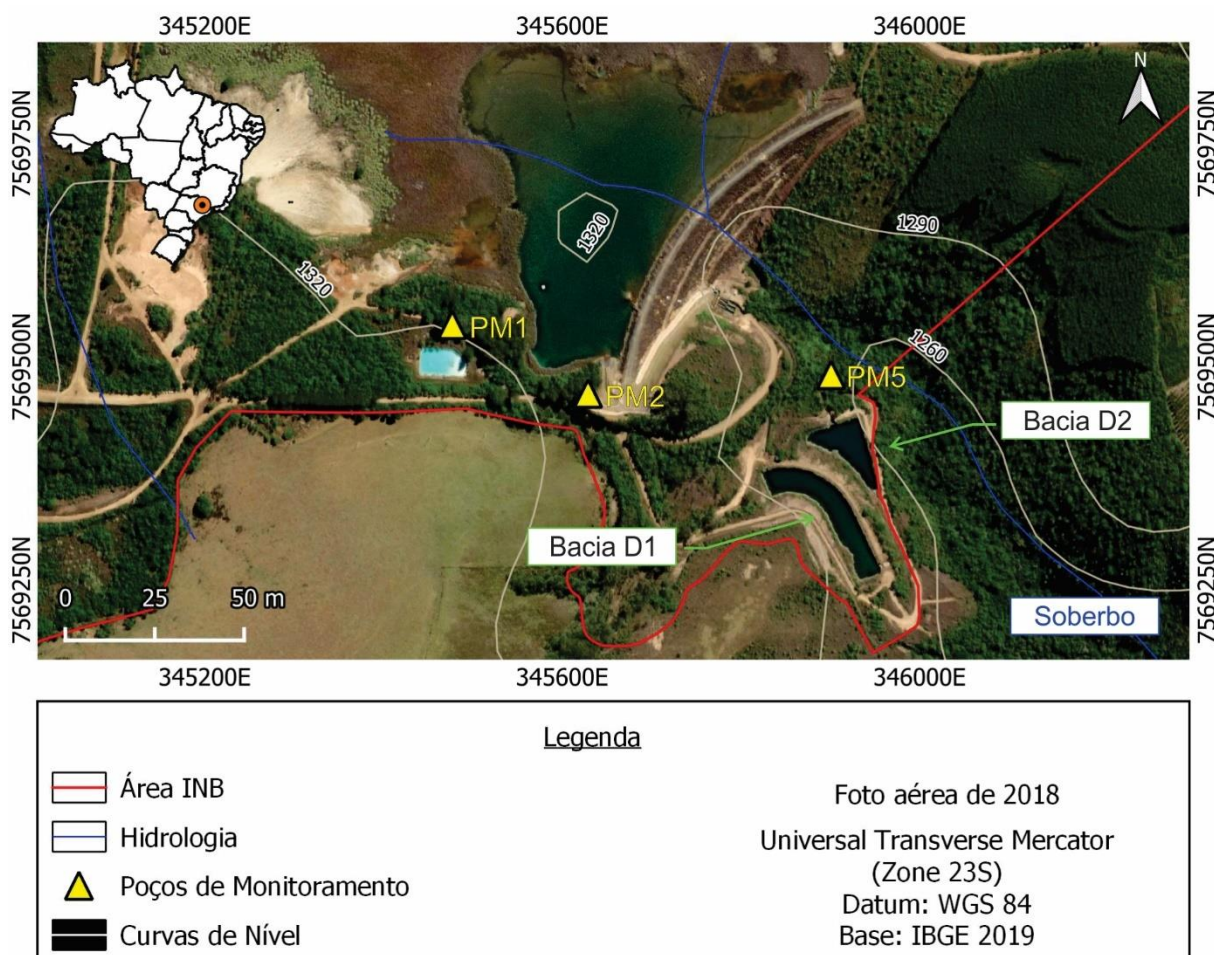


**Fonte:** elaborado pelo autor.

O monitoramento dos parâmetros físico-químicos das águas subsuperficiais na região de instalação das bacias D1 e D2 é realizado através da coleta de efluentes líquidos de um poço de monitoramento (PM5). O poço foi instalado estrategicamente

na área a jusante da bacia D2 (Figura 24). O monitoramento visa identificar possíveis alterações nas concentrações de determinados elementos químicos radioativos e metais.

**Figura 24:** Localização do poço de monitoramento da bacia de contenção de águas ácidas.



**Fonte:** elaborado pelo autor.

Nos últimos anos foram realizadas coletas semestrais nos anos de 2014 e 2015 e anuais nos anos de 2017 e 2019. O monitoramento das concentrações de diferentes metais em água subterrânea é importante pois visa identificar variações anômalas ao longo do período de monitoramento. Caso sejam observados valores superiores aos aceitáveis pelas diretrizes de monitoramento ambiental, medidas de remediação e tratamento das águas são tomadas para diminuição da concentração de elementos.

As coletas de monitoramento consistiram em obter amostras de 5 litros de água no poço PM5. As amostras de efluentes líquidos foram analisadas em laboratório e os principais parâmetros investigados foram: os valores de concentração de

determinados elementos químicos radioativos na fração solúvel em Bq/L, como tório (Th), rádio ( $Ra_{226}$  e  $Ra_{228}$ ), chumbo ( $Pb_{210}$ ) e urânio (natural); os valores de concentração de determinados metais, como ferro, zinco, manganês e alumínio; e sais, como o sulfato. Além dos valores de concentração dos elementos químicos, outros parâmetros físico-químicos também foram analisados e monitorados, como os valores de pH, potencial de oxirredução, condutividade elétrica e vazão (Tabela 6).

**Tabela 6** - Parâmetros físico-químicos anuais encontrados nas águas subterrâneas do poço PM5 localizado a jusante da bacia de decantação de águas ácidas.

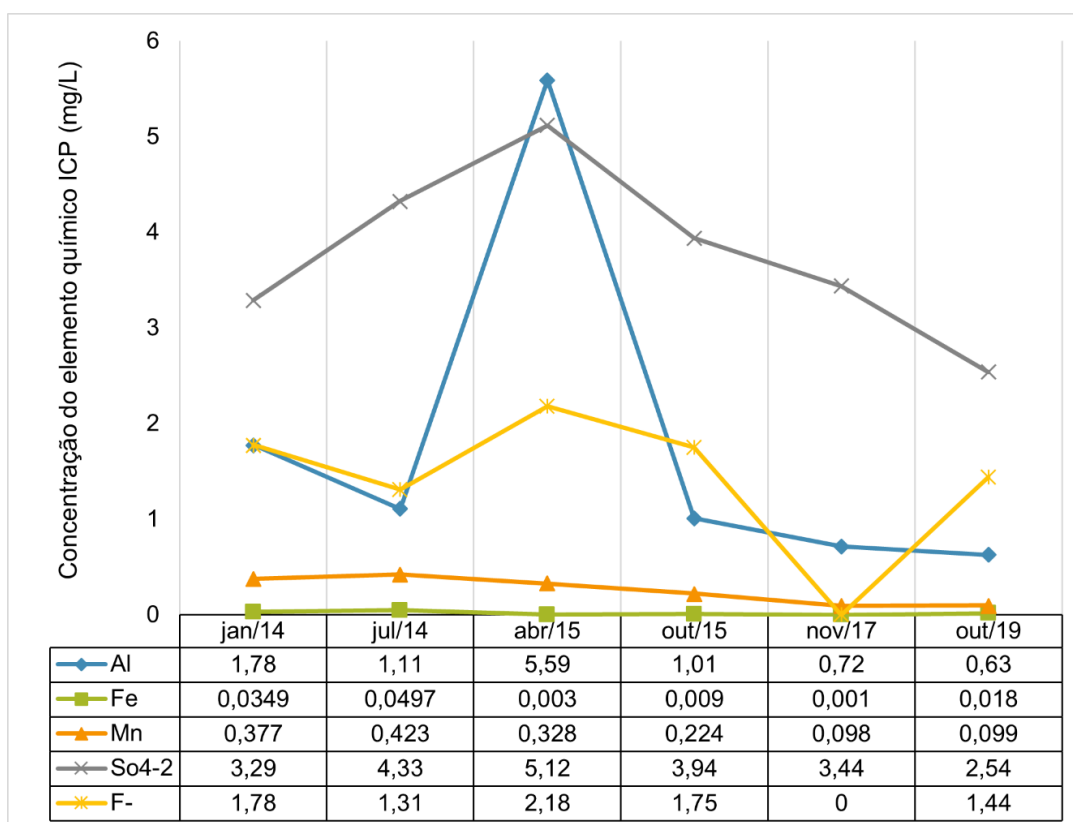
<b>Poço de Monitoramento - PM5</b>					
<b>Características técnicas do poço</b>					
<b>Coordenada X (UTM)</b>	<b>Coordenada Y (UTM)</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>Prof. N.A (m)</b>	<b>Cota N.A (m)</b>
345901	7569491	1253	6	4,34	1248,66
<b>Parâmetros físico-químicos da água durante a coleta</b>					
<b>Ano da coleta</b>	<b>Potencial Hidrogeniônico (pH)</b>	<b>Potencial de Oxirredução (mV)</b>	<b>Condutividade (mS/cm)</b>	<b>Vazão (mL/min)</b>	
<b>2014</b>	6,2	120	0,582	-	
<b>2014</b>	5,09	110	0,699	1.150,0	
<b>2015</b>	6,6	410	0,677	400,0	
<b>2015</b>	5,27	170	0,830	375,0	
<b>2017</b>	5,23	270	0,641	390,0	
<b>2019</b>	5,4	160	0,526	380,0	

**Fonte:** dados fornecidos pela INB.

As variações das concentrações ICP (mg/L) dos elementos químicos alumínio (Al), ferro (Fe), manganês (Mn), flúor ( $F^-$ ) e sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) analisados no período de monitoramento foram apresentadas no gráfico da Figura 25. Os valores de concentrações variaram entre 0,001 mg/L e 5,12 mg/L. O Mn e Fe apresentaram as menores variações no período da análise. O maior valor de concentração do Fe (0,0497 mg/L) está condizente com os limites de concentração deste elemento em águas subterrâneas estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2914:2011,

a qual estabelece o valor máximo de 0,3 mg/L para o Fe. Entre os anos de 2014 e 2015, o Mn apresentou valores de concentração acima dos permitidos para este elemento em águas subterrâneas, estabelecidos pela mesma portaria em 0,1 mg/L. Após esse período, os valores caíram para padrões aceitáveis pelas diretrizes de monitoramento ambiental.

**Figura 25:** Gráfico de concentração de elementos químicos (metais e sulfato) na fração solúvel de águas superficiais das bacias de contenção de águas ácidas D1 e D2.



\*valores de  $\text{SO}_4^{2-} \times 10^{-2}$

**Fonte:** dados fornecidos pela INB.

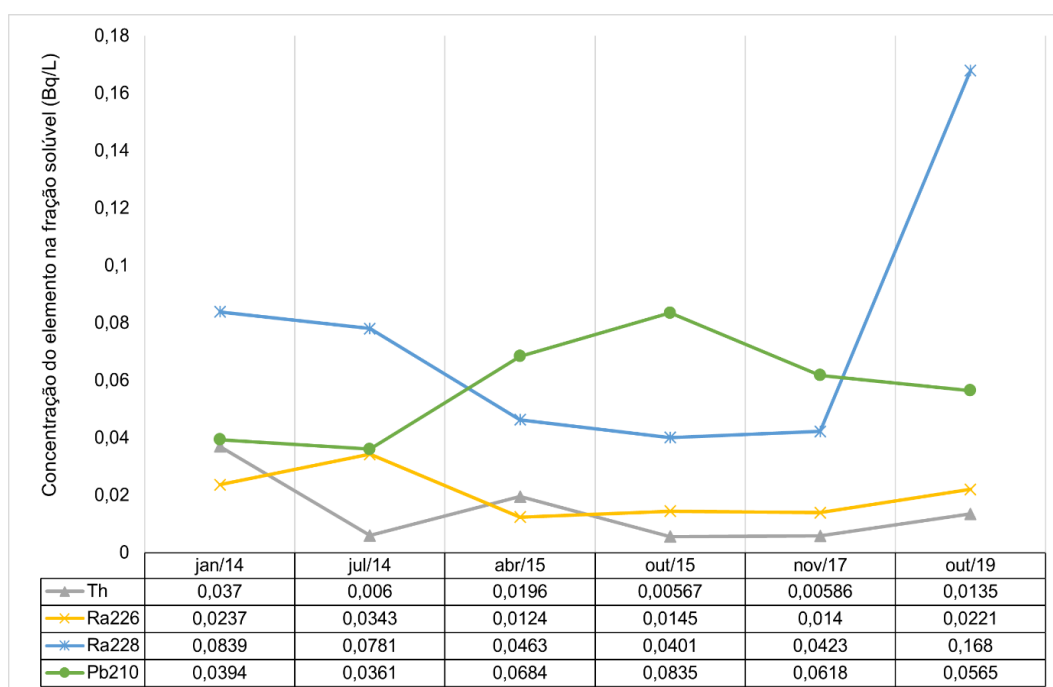
Os elementos químicos Al, F<sup>-</sup> e  $\text{SO}_4^{2-}$  apresentaram as maiores variações no período da análise. O alumínio merece destaque, uma vez que apresentou a maior concentração entre os elementos químicos monitorados (5,59 mg/L). Embora seja o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre e ocorra de forma natural no ambiente na forma de silicatos, óxidos e hidróxidos, combinado com outros elementos, como sódio e flúor, e como complexos com matéria orgânica, outros fatores influenciam a sua mobilidade e transporte no ambiente (OGA et al., 2014).

A erosão natural do solo, a atividade de mineração (caso do presente estudo) e/ou atividade agrícola são exemplos de atividades que podem liberar o metal na

atmosfera (AZEVEDO & CHASIM, 2003; OGA et al., 2014). Dessa maneira, a precipitação intensa no período próximo à amostragem pode ser um dos motivos para o aumento da leitura da concentração deste elemento químico. Chuvas intensas aumentam a erosão do solo, levando ao transporte de sedimentos ricos em alumínio para os corpos hídricos. Fato é que os valores de concentração coletados durante o período de monitoramento ambiental foram condizentes com os valores permitidos pela Resolução CONAMA 396/2008 com exceção da coleta de abril de 2015, a qual estabelece valores de 5 mg/L para águas subterrâneas com finalidade de irrigação e dessedentação.

Os elementos químicos radioativos relevantes na área de estudo são o tório, o rádio, o urânio e o chumbo. As concentrações de tório, rádio e chumbo na fração solúvel em diferentes períodos de coleta foram apresentadas no gráfico da Figura 26. O rádio com massa atômica 226 ( $Ra_{226}$ ) apresentou os valores com as menores variações entre as leituras. Enquanto a versão do mesmo elemento com massa atômica 228 ( $Ra_{228}$ ) apresentou um pico nos valores de concentração no ano de 2019. O chumbo e tório apresentaram valores de concentração com pequena dispersão durante o período de análise.

**Figura 26:** Gráfico de concentração de elementos químicos (Th,  $Ra_{226}$ ,  $Ra_{228}$  e  $Pb_{210}$ ) na fração solúvel de águas subterrâneas das bacias de contenção de águas ácidas D1 e D2.

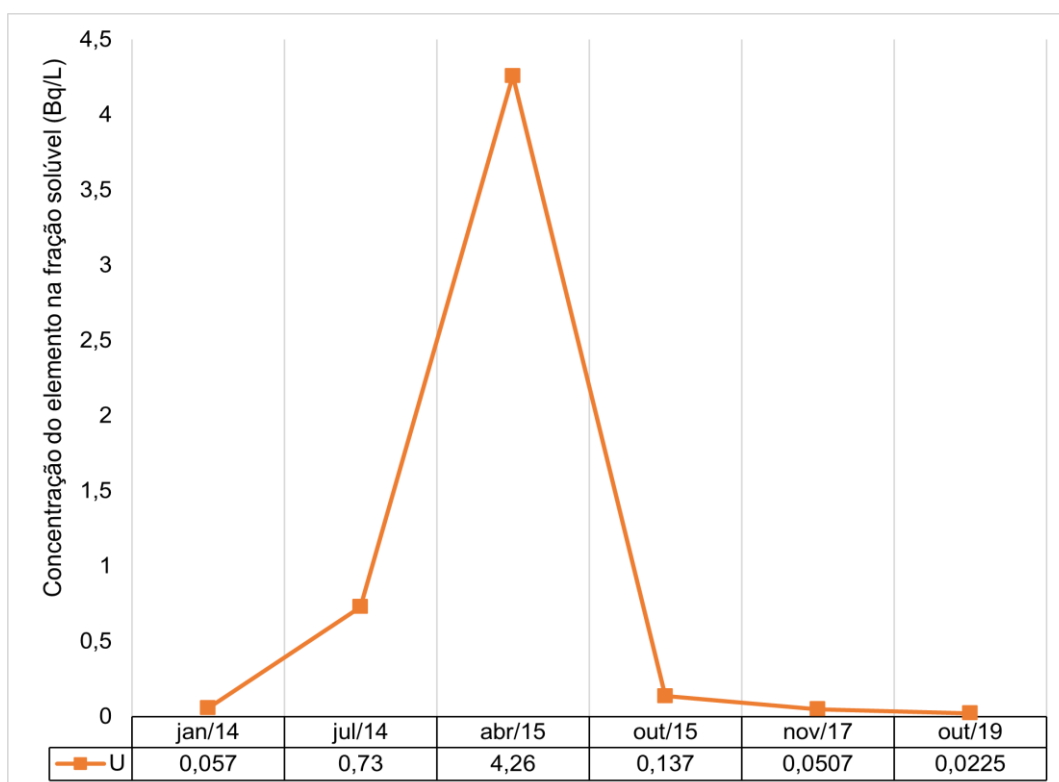


Fonte: dados fornecidos pela INB.

Os valores de concentrações do elemento radioativo urânio (U) foram apresentadas de maneira individualizada para melhor visualização, pois possuem uma escala de valores maiores do que os outros elementos químicos radioativos também monitorados nas águas subterrâneas da área de estudo (Figura 27). De maneira geral, as concentrações de U, em Bq/L, apresentaram valores inferiores a 0,8 Bq/L, com variações de 0,0225 Bq/L em outubro de 2019 e 0,73 Bq/L em julho de 2014.

Entretanto, em abril de 2015 foi observada uma concentração de U de 4,26 Bq/L. Alguns trabalhos definem o limite de segurança da concentração máxima do urânio em água potável de 2,479 Bq/L. Esse limite foi definido exclusivamente pelo limiar de toxicidade química (WRENN & SINGH, 1987). Os trabalhos fundamentados em considerações radiológicas recomendam valores de concentração inferiores, de 0,37 Bq/L (EPA, 1991).

**Figura 27:** Gráfico de concentração do elemento químico urânio (U) na fração solúvel de águas superficiais das bacias de contenção de águas ácidas D1 e D2.



**Fonte:** dados fornecidos pela INB.

## 6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 6.1 PASSIVOS AMBIENTAIS DA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO

O aprimoramento e desenvolvimento de métodos que aumentem a eficiência na extração de minério é tema recorrente em diversos estudos de exploração e beneficiamento mineral (FERNANDES et al., 2007; FARIA JUNIOR, 2009; FIGUEIREDO, 2018). Independente da forma adotada na exploração dos depósitos minerais, a atividade de mineração produz diferentes tipos de passivos ambientais. Os passivos podem estar atrelados diretamente à atividade de mineração através da geração de rejeito e águas ácidas, por exemplo; ou indiretamente, associados à operação da mina, como o vazamento de tanques e tubulações de materiais químicos na plataforma da usina de beneficiamento (STUMM et al., 1989).

As alterações fisiográficas a partir da modificação da paisagem natural e retirada da cobertura vegetal são possivelmente os impactos ambientais mais fáceis de serem identificados devido ao impacto visual. Entretanto, a atividade também pode resultar em alterações físico-químicas do solo e água devido a contaminações por diferentes produtos químicos utilizados durante a etapa de beneficiamento de minério, lavra e operação da mina (JAIN, 2015; SENGUPTA, 2021).

As principais formas adotadas para a extração dos bens minerais: lavras a céu aberto ou subterrâneo, são estabelecidas de acordo com a profundidade e geometria do corpo mineral, as competências das rochas portadora do minério e encaixante, e os fatores econômicos que viabilizam a operação (MARJORIBANKS, 2010). Ambas as técnicas são responsáveis pelo acúmulo de toneladas de materiais de rejeitos e estéreis. Esses materiais são destinados a barragens e/ou pilhas que precisam ser monitoradas constantemente (AUSTRALIA, 2007). Os recentes rompimentos de barragens de rejeito de mineração no Brasil evidenciaram o efeito catastrófico sócio-ambiental no caso de vazamentos do material armazenado (OWEN et al., 2020; ROTTA et al., 2020; KOPPE, 2021).

Durante a etapa de operação de uma mina, a plataforma da usina de beneficiamento possui diversos elementos, como tanques e tubulações de materiais químicos, que podem servir como fonte de contaminação caso não ocorra manutenção da integridade física dessas estruturas. Além desses reservatórios, minerações de médio a grande porte possuem postos de combustíveis na sua planta

de operação para abastecimento da frota de veículos (STUMM et al., 1989; AZCUE, 1999; AUSTRALIA, 2007). Os elementos de armazenagem e transporte de produtos químicos instalados nas plataformas de beneficiamento e operações da mina precisam ser monitorados inclusive após o término das operações e início da etapa de descomissionamento. A falta de manutenção pode comprometer a integridade física dos tanques e dutos instalados na área da mina e permitir o vazamento de produto químico no meio físico durante anos (GUPTA & YAN, 2006). Como a etapa de fechamento da área pode levar décadas para ser concluída, é necessário localizar a fonte do contaminante, monitorar o desenvolvimento da contaminação no solo e água e auxiliar na etapa de remediação ambiental da mina (SENGUPTA, 2021).

Além dos passivos relacionados à extração mineral, as águas (superficiais, subterrâneas e de reuso) utilizadas durante as diferentes etapas da atividade de mineração pode ser um passivo ambiental em caso de contaminação. Quando disponíveis, as fontes de águas superficiais são comumente utilizadas no beneficiamento mineral, uma vez que não precisam de tratamento prévio contra contaminações de minerais. Na ausência de disponibilidade hídrica superficial na área da mina, as fontes de águas subterrâneas são utilizadas, principalmente pelo fato de não precisarem ser armazenadas e possuírem menor contaminação física e biológica. Os dois tipos de águas podem sofrer alterações nas propriedades físico-químicas e tornar um passivo ambiental. Dessa maneira, existem minerações que realizam o tratamento das águas utilizadas durante todo o processo mineral e reutilizam essas águas em outras atividades da mina, como lavagem de peças, umectação de vias, umectação de pilhas de minério (GUPTA & YAN, 2006).

O controle da qualidade da água também é realizado durante o encerramento das atividades de mineração e início da etapa de descomissionamento (fechamento da mina). É necessário garantir que a água reinserida nos cursos d'águas naturais estejam dentro dos padrões físico-químicos estabelecidos pelos órgãos ambientais. Ainda associado ao cenário de contaminação de solos e águas subterrâneas, existem outros elementos atrelados as áreas operacionais e administrativas da mina que podem servir de fontes de contaminação, como o vazamento de tanques com produtos químicos (STUMM et al., 1989; CIPRIANI, 2002; WU et al., 2019).

### **6.1.1 GEOFÍSICA APLICADA EM ESTUDOS DE PASSIVOS AMBIENTAIS DE MINERAÇÃO**

A geofísica é uma ciência que estuda o interior da Terra a partir da aquisição de dados indiretos de diferentes propriedades físicas (MILSOM & ERIKSEN, 2011). A aplicação de métodos geofísicos em estudos ambientais de contaminação do solo e água subterrânea possui diversas aplicações para identificação de possíveis zonas de contaminação (área fonte), determinação das dimensões e orientações de fluxo da pluma de contaminação e avaliação dos processos de remediações (SHARMA, 1997). A vasta aplicação de estudos geofísicos neste contexto ocorre uma vez que a presença do contaminante altera as propriedades físicas naturais do meio estudado. Essas variações podem ser identificadas e mapeadas pelos métodos geofísicos (WARD, 1990; REYNOLDS, 2011).

Embora seja relevante o número de estudos geofísicos em áreas contaminadas, existem poucos trabalhos desenvolvidos em fontes potenciais de contaminação na mina além de pilhas e barragens de rejeito (BUTCHIBABU et al., 2021; EZE et al., 2021; MOREIRA et al., 2021). A partir da investigação geofísica, de caráter não invasivo e boa área de cobertura (lateralmente e em profundidade), os métodos geofísicos fornecem valores qualitativos de diferentes propriedades físicas, como a resistividade elétrica e a propriedade elástica dos materiais. Esses valores são processados em softwares dedicados e interpretados para auxiliar o entendimento do contexto geológico da área investigada (DIMECH et al., 2023).

Os diferentes métodos geofísicos possuem características operacionais e fundamentos físicos que os individualizam. Dessa maneira, alguns métodos possuem melhores aplicações nas partes rasas (por exemplo, métodos elétricos e eletromagnéticos, eletromagnéticos e sísmicos), enquanto outros podem obter informações das partes mais profundas da Terra (por exemplo, métodos gravimétricos) (ERKAN, 2008). Além da obtenção indireta de valores de parâmetros físicos do meio em diferentes níveis de profundidade, os mesmos valores podem ser correlacionados com parâmetros bastante utilizados e difundidos em estudos geotécnicos e ambientais, como projetos de investigação e remediação de passivos ambientais de mineração (Tabela 7). A seguir são descritos estudos importantes de geofísica aplicada ao meio ambiente e geotecnia em diferentes áreas de mineração,

com foco principal na investigação de barragens de rejeito e bacias de contenção de águas ácidas, tema deste trabalho.

**Tabela 7 – Parâmetros geotécnicos e ambientais e a correlação com dados geofísicos**

<b>Parâmetros geotécnicos</b>	<b>Dados geofísicos</b>
Superfície específica (classificação do solo)	condutividade elétrica
Grau de saturação	condutividade elétrica
Densidade	Vs, condutividade elétrica
Permeabilidade	condutividade elétrica
Grau de cimentação / diagênese	Vs
Rigidez (solo saturado)	Vs

**Fonte:** Stokoe & Santamarina, 2000.

#### **6.1.1.1 MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS EM PILHAS DE REJEITOS**

Após os metais e minerais recuperáveis serem extraídos do minério, os produtos que não possuem interesse econômico, juntamente com a água utilizada no processo de recuperação, são classificados como rejeitos ou estéreis. Os rejeitos de mineração são uma combinação de materiais sólidos de granulação fina remanescentes do processo de beneficiamento e lavra normalmente do tamanho de lodo, na faixa de 0,001 mm a 0,6 mm. Já os estéreis possuem uma maior granulometria (diâmetro geralmente de 2 cm a 20 cm) e comumente estão presentes em minerações com baixas concentrações do mineral em grandes corpos de rocha (LOTTERMOSER, 2010; COURTNEY & PIETRZYKOWSKI, 2018). Ambos os rejeitos e estéril são aspectos importantes a serem considerados no planejamento e na execução de atividades de mineração sustentável a qual busca desenvolver práticas que reduzam os impactos ambientais, promovam a recuperação de áreas degradadas e otimizem o uso dos recursos naturais.

As características físico-químicas dos rejeitos variam com a natureza do minério explotado e o método de beneficiamento, o qual consiste em separar as substâncias desejadas das indesejadas no minério através de um conjunto de processos físico-químicos. Essas características, associadas ao contexto topográfico local, das condições climáticas, dos regulamentos e restrições ambientais e o contexto socioeconômico em que as operações da mina e a planta de processamento estão

localizadas, são os fatores responsáveis pela escolha do método de armazenamento do rejeito (AUSTRALIA, 2007). O armazenamento dos materiais não aproveitáveis gerados durante o processo de exploração de minerais pode ser feito através da construção de barragens ou, mais comumente, serem transportados em forma de polpa para instalações de armazenamento em superfície. As áreas destinadas para a instalação de pilhas de rejeito podem ocupar até metade da área de uma mineração em operação devido a grande quantidade de material explorado (LOTTERMOSER, 2010).

A disposição em pilhas de rejeitos apresenta uma preocupação ambiental, uma vez que o material armazenado está sujeito a intempéries e ao processo de erosão (ABDELOUAS, 2006). É justamente a exposição dos minerais sulfetados presentes nas pilhas e o oxigênio ( $O_2$ ), a água ( $H_2O$ ) e os microrganismos que desencadeia a geração de drenagem ácida (WILDEMAN & SCHMIERMUND, 2004). O foco dos estudos geofísicos nesse tema é identificar os principais corpos minerais no interior das pilhas, como grandes blocos de rocha sulfetados, no intuito de auxiliar medidas de engenharia que inviabilizem o contato entre este material e a água, e também investigar o comportamento do fluxo da drenagem ácida no interior da pilha. Em ambos os casos, as investigações geofísicas auxiliam a etapa de remediação ambiental da área contaminada.

Nas últimas décadas, no contexto da avaliação de processos geoambientais em pilhas de rejeitos de mineração, foram utilizados diferentes métodos geofísicos para compreender a dinâmica e os impactos ambientais (DIMECH et al., 2022). Um dos estudos pioneiros na aplicação de métodos geofísicos para identificação no meio físico da drenagem ácida de mina foi realizado por Paterson (1995). Neste estudo experimental, realizado em mineradoras da América do Norte e Austrália, alguns métodos geofísicos, como os Eletromagnéticos, Eletrorresistividade, Magnetismo Terrestre, Potencial Espontâneo e Radar de penetração no solo, mostraram ser eficazes para detectar e monitorar a contaminação por escoamento da drenagem ácida no interior e ao redor das áreas das minerações. Outro importante trabalho nessa linha de pesquisa foi publicado em 2000 por Campbell & Fitterman, o qual apresentou um mapeamento das plumas de contaminações associadas a drenagem ácida de mina e as vantagens e desvantagens dos métodos geofísicos de Eletrorresistividade e Eletromagnéticos neste tipo de estudo. Anterrieu et al. (2010) realizaram um estudo a partir dos métodos de Eletrorresistividade e Eletromagnéticos

com o objetivo de construir um modelo para avaliação do fluxo de água e gás na pilha de rejeitos, bem como o potencial de produção de drenagem ácida de minas (DAM). Este modelo é essencial para prever e mitigar os impactos ambientais associados ao fluxo de contaminantes.

Estudos mais recentes, como o proposto por Casagrande et al. (2019), empregaram o método de Eletorresistividade para identificar zonas de drenagem ácida, água subterrânea não contaminada e zonas sulfetadas. A identificação dessas áreas permitiu uma melhor compreensão do processo de geração de contaminantes, e forneceu informações que podem auxiliar na gestão ambiental das áreas afetadas pela atividade de mineração. Dimech et al. (2019) utilizaram monitoramento hidrogeofísico em time-lapse, especificamente através do método da Eletorresistividade, para avaliar a infiltração e o fluxo da água no interior das pilhas de rejeitos. Esse monitoramento contínuo permitiu observar as mudanças no fluxo de água ao longo do tempo, e melhor compreender sobre a dinâmica interna da pilha e a distribuição de contaminantes. Mais recentemente, Gastmaier et al. (2022) associaram altas concentrações de urânio e tório às zonas de sulfeto a partir do uso de Gamaespectrometria. Esta abordagem auxiliou no entendimento da geração de DAM no interior da pilha, e mostrou ser uma ferramenta adicional para a caracterização e monitoramento das áreas mais propensas à geração de contaminantes.

#### **6.1.1.2 MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS EM BARRAGENS**

As barragens são reservatórios construídos pelo homem com o objetivo de conter e acumular materiais em estado líquido ou em passagem progressiva do estado sólido ao estado líquido. Estas estruturas são construídas de maneira transversal à direção de escoamento de um curso d'água ou em vales fluviais e podem ser divididas de acordo com a forma construtiva e o material utilizado em seu corpo principal: de terra, concreto e enrocamento. As barragens possuem papel crucial no desenvolvimento das civilizações, devido a necessidade de armazenar água, que posteriormente pode ser utilizada para irrigação de áreas de cultivo, abastecimento humano, dessedentação animal e geração de energia. Atualmente, as barragens armazenam água e outros materiais, como rejeitos de mineração (FELL et al., 2005; WU et al., 2019). No atual contexto de discussões cada vez mais constantes a respeito

do impacto das mudanças climáticas nas alterações dos padrões de precipitações, com eventos de chuvas intensas ou secas prolongadas, as barragens podem auxiliar no gerenciamento de água e contribuir para a resiliência hídrica (BOULANGE et al., 2021). Entretanto, variações extremas nos padrões de precipitação podem desafiar a capacidade dessas estruturas de lidar com condições climáticas imprevisíveis.

A necessidade de monitoramento das barragens não está atrelada somente a complexidade e/ou volume de material armazenado no reservatório. A possibilidade de perda de vidas e propriedades à jusante no caso de uma ruptura por si só justificam a necessidade de um sistema de monitoramento dos barramentos (ISLAM & MURAKAMI, 2021). Para uma operação mais segura da barragem são necessárias informações de instrumentos e monitoramento do corpo da barragem, das fundações do entorno, do reservatório e da bacia hidrográfica (MIZUNO & HIROSE, 2017).

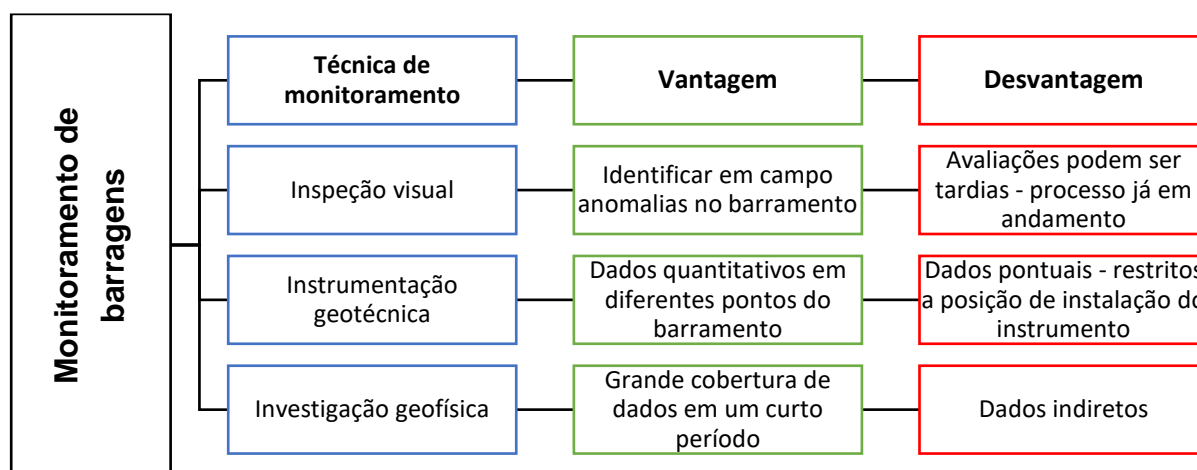
As instrumentações geotécnicas fornecem dados pontuais, estritamente do ponto onde o instrumento está instalado, e embora sejam importantes para estudos de estabilidade física, necessitam de outras metodologias que permitam uma varredura mais ampla da estrutura (Figura 28) (BO & BARRETT, 2023). O uso da geofísica em barragens é consagrado na literatura com diversos trabalhos de investigação realizados tanto na área do barramento como no interior de reservatórios. Alguns fatores intensificaram o uso dos métodos geofísicos em engenharia de barragens. A área de cobertura e o curto tempo de aquisição dos dados resulta em uma interessante relação de custo-benefício.

A possibilidade de realizar varreduras ao longo de boa parte dos barramentos e reservatórios permite suprir com informações os locais onde os instrumentos de auscultação tradicionalmente implantados não fornecem dados, como piezômetros, inclinômetros, medidores de nível d'água, vazão e recalques (SOUZA & GANDOLFO, 2012; SASTRY & CHAHAR, 2019; AL-HEETY et al., 2021). Os primeiros trabalhos de investigação geofísica em barragens tinham como objetivo demonstrar que as investigações não invasivas oferecidas pelos diferentes métodos geofísicos apresentavam potencial de aplicação para auxiliar no monitoramento dos barramentos, principalmente, em uma limitação da instrumentação geotécnica já utilizada: a área de cobertura das metodologias (BOGOSLOVSKY & OGILVY, 1970).

O uso combinado de métodos geofísicos e geotécnicos possibilita um diagnóstico mais detalhado dos processos de fluxo e erosão interna em barragens de terra (IKARD et al., 2014; HAMLIN & LLOYD, 2021). Entre as principais aplicações

do uso dos métodos geofísicos em barragens merecem destaque a caracterização geológico-geotécnica do substrato do barramento antes ou durante a instalação da obra (DUTTA, 1984), o monitoramento para reconhecimento de infiltrações e zonas de fluxo no interior do maciço da estrutura (CAMARERO & MOREIRA, 2017; OLIVEIRA, 2021) e a avaliação do volume disponível e nível de assoreamento dos reservatórios de água (SOUZA, 2016).

**Figura 28:** Vantagens e desvantagens das técnicas de monitoramento de barragens.



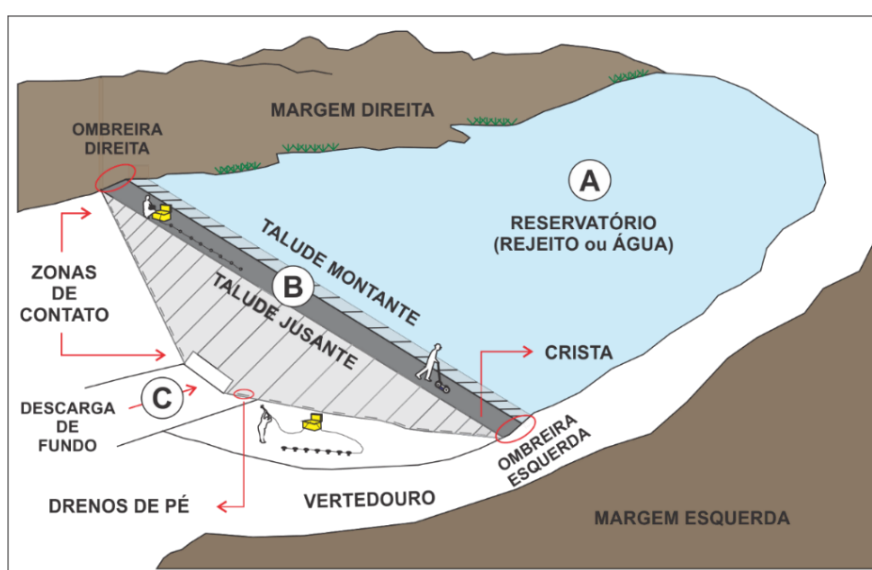
**Fonte:** elaborado pelo autor.

De maneira geral, as áreas da barragem investigadas em estudos geofísicos podem ser divididas em: reservatório, região do maciço (barramento e taludes de jusante e montante) e base do talude de jusante da barragem, respectivamente, setores A, B e C ilustrados na Figura 29. A zona do reservatório (setor A) é responsável pelo armazenamento de água e diferentes tipos de rejeito. Os estudos geofísicos nessa área auxiliam estudos geológicos e oceanográficos aplicados em ambientes submersos. A investigação de reservatórios de barragens a partir do uso de métodos geofísicos nesses estudos está diretamente relacionada com a vida útil média dos reservatórios. Os processos de erosão costeira e assoreamento do reservatório podem reduzir a capacidade de armazenamento do reservatório (SOUZA, 2016). No Brasil, a perda anual de volume dos reservatórios, é de aproximadamente 0,5% (CARVALHO, 2008).

A zona do maciço (setor B) engloba o barramento, os taludes de jusante e montante e as ombreiras. Essa região é responsável pela vasta maioria dos estudos geofísicos de investigação em barramentos. Isso ocorre pelo fato de os barramentos

serem construídos essencialmente por solo e fragmentos de rocha. Embora as estruturas muitas vezes possuam sistemas de drenagens internos e núcleos verticais com materiais menos permeáveis no intuito de condicionar e dificultar a passagem de água de montante para jusante, os barramentos sofrem fadiga com o tempo e necessitam de monitoramento da presença de possíveis zonas de saturação e fluxo no maciço.

**Figura 29:** Esquema de uma barragem de armazenamento de rejeito ou água e os principais setores (A, B e C) de aplicações de estudos geofísicos.



**Fonte:** modificado de Guireli Netto et al. (2020b).

Embora a vasta maioria dos trabalhos de investigações geofísicas em monitoramento de barragens é realizada no maciço do barramento (setor B), existem diversas alterações geológico-geotécnicas dos maciços rochosos das fundações dos barramentos que podem alterar a estabilidade geotécnica da estrutura. Em barragens de mineração, os esforços aplicados pelo empreendimento mineiro provocam alterações geológicas-geotécnicas do substrato. As alterações da propriedade física da rocha, das estruturas geológicas naturais (fraturas e falhas) e a presença da água reduzem a resistência mecânica do maciço.

No campo da geofísica aplicada a barragens de terra, diversos estudos têm demonstrado a eficácia de métodos geofísicos na identificação e monitoramento de zonas de infiltração, fluxos de água e condições estruturais. Bogoslovsky e Ogilvy (1970) foram pioneiros ao comprovar que a geofísica pode ser usada no estudo

técnico de barragens de terra, a partir do uso dos métodos de Eletrorresistividade e Potencial Espontâneo. Este estudo pioneiro demonstrou a viabilidade da aplicação de técnicas geofísicas em investigações de infraestrutura hídrica. Nessa mesma linha de pesquisa, Cedergren (1980) utilizou o método de Potencial Espontâneo para identificar anomalias de fluxos de água na região da barragem. Os resultados apresentaram uma abordagem prática para detectar áreas problemáticas que poderiam comprometer a integridade da estrutura. Abuzeid (1994), por sua vez, investigou zonas de infiltração e as condições hidrológicas nas áreas a montante e a jusante da barragem através da Eletrorresistividade. O estudo contribuiu para uma melhor compreensão das dinâmicas hídricas associadas às barragens.

Estudos geofísicos de investigação de barragens realizados a partir dos primeiros anos do século XXI apresentam uma maior combinação de métodos geofísicos. O estudo proposto por Karastathis et al. (2002), por exemplo, combinou os resultados dos métodos de Eletrorresistividade, Sísmicos e Eletromagnéticos (Radar de penetração no solo) para detectar possíveis áreas degradadas sujeitas à infiltração ou vazamento de água. Esta abordagem integradora permitiu uma avaliação abrangente das condições da barragem, e a identificação de zonas críticas com maior precisão. Minsley et al. (2011) também utilizaram os métodos da Eletrorresistividade e Potencial Espontâneo para identificar zonas de infiltração no corpo da barragem, mudanças litológicas e determinar o topo rochoso. Essas informações sobre a estrutura interna auxiliaram na identificação de possíveis áreas de vulnerabilidades no corpo do barramento.

Mais recentemente, Camarero et al. (2019) empregaram Eletrorresistividade para identificar zonas de infiltração de água e o início de processos de erosão interna. O estudo destacou a importância do monitoramento contínuo para a detecção precoce de problemas estruturais. Guireli Netto et al. (2020a) utilizaram o método do Potencial Espontâneo para identificar zonas de escoamento preferencial de fluidos subsuperficiais em barragens de pequeno porte. Os resultados contribuíram para o aumento da segurança e manutenção dessas estruturas menores, as quais muitas vezes carecem de estudos geotécnicos e de engenharia. Arcila (2020) focou na identificação de zonas de fluxo d'água em barragens de contenção de rejeitos, através do método da Eletrorresistividade, o que é crucial para prevenir falhas catastróficas associadas ao acúmulo de rejeitos. Moreira et al. (2022) aplicaram a técnica de tomografia elétrica para localizar anomalias de fluxos no interior de maciços de

barragens, a partir da inversão e modelagem geoeletrica para fornecer uma análise detalhada das condições internas da estrutura. Oliveira et al. (2023) realizaram um estudo aprofundado utilizando métodos geoeletricos para investigar uma barragem de rejeitos operando há 50 anos no estado de São Paulo, Brasil, composta por um barramento heterogêneo de rejeitos de calcário. Os resultados demonstraram que a modelagem 3D, ao integrar dados geotécnicos e geofísicos, expande significativamente o conhecimento sobre a estrutura interna da barragem e melhora a segurança das operações, especialmente em áreas sem instrumentação, aprimorando a gestão de riscos da barragem de rejeitos. Por fim, Guedes et al. (2022) desenvolveram um estudo na barragem do Paranoá, a maior barragem da capital federal do Brasil. A estrutura interna da barragem foi analisada e foram identificadas anomalias possivelmente associadas à saturação de água.

A zona da base do talude de jusante do barramento (setor C) apresenta estudos em sua maioria direcionados ao diagnóstico das condições do embasamento dos barramentos antes da implementação do empreendimento. Barragens são obras de arte especiais que sofrem esforços dinâmicos provenientes, principalmente, da movimentação do material represado e, especialmente em barragens de mineração, do tráfego de maquinários de grande porte próximos a estrutura (SOUZA, 2013). Um dos primeiros estudos estatísticos referente as principais causas de rompimento de barragens mostrou que 40% das rupturas foram causadas por problemas de fundação (JANSEN, 1983). Mais recentemente, uma pesquisa realizada pela *Association of State Dam Safety Officials* entre 2010 e 2019 mostrou que problemas de fundação, incluso os problemas de compactação e instabilidade de taludes, foram responsáveis por cerca de 30% de todos os rompimentos de barragens nos EUA (ASDSO, 2023). Em barragens de concreto, 80% dos casos de rompimento são causados por transbordamento ou problemas de qualidade. O fator de qualidade mais relevante nessas rupturas é o processo de erosão interna na fundação (ZHANG et al., 2016).

Muitas barragens, especialmente os grandes reservatórios de água do século passado, foram construídas sem uma compreensão completa dos possíveis problemas geotécnicos que ocorriam nas fundações (SCHUSTER, 2006). Um dos principais problemas no projeto de uma barragem é fornecer estabilidade suficiente para evitar que a estrutura rompa. O projeto é mais complexo quando há vários planos estruturais (zonas de fraqueza), como diferentes famílias de fraturas, no maciço rochoso da fundação da barragem (XUHUA et al., 2008). A sobrecarga do material

armazenado, a geologia potencialmente complicada e o enfraquecimento do maciço rochoso ao longo dos anos são apenas alguns dos fatores que justificam estudos direcionados à fundação das barragens (ASTHANA E KHARE, 2022). Além da perda de resistência mecânica, outras alterações estão diretamente atreladas a estabilidade geotécnica do barramento, como a geração de novos caminhos de fluxo no embasamento devido a carga de água/rejeito represados, o risco de lubrificação da base da estrutura, fato que pode desencadear o deslizamento do talude do barramento, e a possibilidade de fuga de água contaminada em barragens de rejeitos (FELL et al., 2005). Diante da complexidade do problema, são necessários estudos voltados para a obtenção de informações geológicas e geotécnicas sobre o maciço rochoso de fundação de barragens (SARI et al., 2020).

Um dos trabalhos pioneiros no uso de métodos geofísicos direcionados ao diagnóstico das condições do embasamento dos barramentos foi desenvolvido por Dutta (1984), o qual aplicou o método da Sísmica de refração para a caracterização geológica-geotécnica do substrato do barramento. As variações das velocidades das ondas sísmicas permitiu melhor compreender os elementos internos da fundação e auxiliar no entendimento da estabilidade da estrutura. Em um estudo com diferentes métodos geofísicos utilizados em conjunto, Llopis et al. (1995) empregaram uma abordagem integradora, com os métodos de Sísmica de reflexão, Eletromagnéticos (Radar de penetração no solo), Eletrorresistividade e Microgravimetria para avaliar as condições da fundação na área da ombreira direita de uma barragem. Este estudo abrangente permitiu uma avaliação detalhada da integridade da fundação e possíveis áreas de vulnerabilidade foram identificadas.

Bedrosian et al. (2012) buscaram compreender a interação entre a estrutura geológica, os padrões de infiltração e os níveis do reservatório e das águas subterrâneas. Para tal foram utilizados os métodos da Eletrorresistividade, Sísmica de refração e reflexão, métodos Eletromagnéticos e Magnetotelúrico. Este estudo multidisciplinar forneceu uma interpretação das dinâmicas hidrogeológicas e geotécnicas, as quais auxiliaram na gestão mais eficaz dos recursos hídricos e da integridade estrutural da barragem. Kargaran e Ghalamzan (2018) utilizaram a Sísmica de refração para detectar zonas de baixa velocidade suscetíveis à infiltração de água e avaliar as propriedades dinâmicas dos materiais subterrâneos. A identificação dessas zonas de baixa velocidade é crucial para a detecção precoce de problemas de infiltração que poderiam comprometer a estabilidade da barragem. Por

fim, Sari et al. (2020) combinaram Sísmica de refração e Eletrorresistividade para identificar o posicionamento de fraturas no maciço rochoso da fundação do barramento. A localização precisa dessas fraturas é essencial para a avaliação da estabilidade e integridade da fundação.

### **6.1.1.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS EM BACIAS DE DECANTAÇÃO**

As bacias de contenção de águas ácidas em minerações são construídas com o intuito de reter e armazenar parte dos produtos resultantes do processo de beneficiamento mineral. Compostas essencialmente por água e metais diluídos, essas estruturas são instaladas em depressões do terreno, em diques ou através da escavação do relevo natural (GEOFFREY & NDLOVU, 2014). Indiferente da técnica construtiva adotada, essas estruturas de armazenamento precisam ser monitoradas, uma vez que armazenam águas com consideráveis concentrações de metais.

É comum a presença de poços de monitoramento, principalmente a jusante, em áreas de bacias de contenção de águas ácidas. Essa técnica de monitoramento ambiental é utilizada para reconhecimento das características e condicionantes hidrogeológicas da área e alguns parâmetros são obtidos, como a caracterização hidráulica dos aquíferos, a medição do nível d'água e a caracterização de possíveis contaminantes do lençol freático. Caso sejam identificados valores anômalos aos padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais, pode ser realizada a coleta de amostras para a avaliação da qualidade das águas com as devidas análises químicas, físicas e biológicas desse material (MASINDI et al., 2022).

Um fator limitante importante nesta técnica de monitoramento ambiental é o fato dos poços de monitoramento fornecerem informações pontuais, ou seja, apenas do local onde eles foram instalados (BO & BARRETT, 2023). Caso ocorra um fluxo de água não conhecido, ou seja, um possível vazamento de água do reservatório da bacia de decantação, em um nível de profundidade mais raso que o poço ou ainda o fluxo do vazamento tenha uma direção de percolação a qual o poço de monitoramento não tenha cobertura de coleta, o monitoramento ambiental não identificará a presença de contaminação na área.

Nesse cenário, embora ainda não sejam comumente aplicados em estudos de bacias de decantação de águas ácidas, os métodos geofísicos, em especial os métodos Elétricos, podem ser uma técnica de investigação viável financeiramente e

com bons resultados no mapeamento do contaminante no meio físico. Como o material aquoso do vazamento, composto essencialmente por água e metais dissolvidos, preenche os poros intragranulares dos solos e as fraturas das rochas, existe uma alteração da resistividade elétrica do meio físico natural. Essa variação da propriedade física, quando comparada com o meio não contaminado, permite interpretar as zonas com a presença do contaminante (SHARMA, 1997). A identificação em detalhe dos principais focos de contaminação, bem como do fluxo deste material no meio físico, facilitam e ajudam a etapa de remediação ambiental da área.

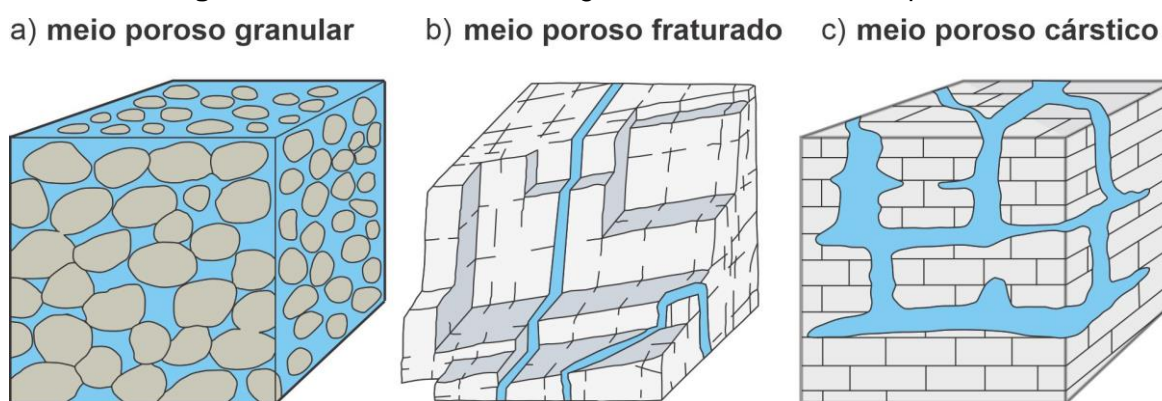
## **6.2 HIDROGEOLOGIA E GEOLOGIA ESTRUTURAL**

Em hidrogeologia, os aquíferos são classificados como formações geológicas subterrâneas que funcionam como reservatórios de água. Esses reservatórios são alimentados principalmente pelas águas das chuvas que infiltram no subsolo. De maneira geral, são rochas com características porosas e permeáveis capazes de reter e ceder água, e servem como fontes de abastecimento de poços e nascentes (WATSON & BURNETT, 1995). De acordo com o armazenamento da água (pressão hidrostática), os aquíferos podem ser de dois tipos: aquífero livre ou freático e aquífero confinado ou artesianos.

Os elementos geológicos que contêm poros são referidos como meios porosos. Em estudos de hidrogeologia e engenharia, é importante caracterizar os meios porosos através da quantificação dos volumes ocupados nos poros, o grau e a magnitude das interconexões do espaço dos poros, e a resposta do meio a mudanças de cargas e pressões (BRUTSAERT, 2005). A análise do comportamento do fluxo da água em fraturas pode ser realizada pelas seguintes maneiras: meio contínuo e meio descontínuo (DOMENICO & SCHWARTZ 1990). No primeiro caso, o meio fraturado é substituído por um meio contínuo representativo onde os valores de condutividade hidráulica, porosidade e compressibilidade são definidos (FERNANDES, 2008). Para a definição destes parâmetros e aplicação da lei de Darcy, é necessário um volume de rocha considerável. Em rochas fraturadas, este volume pode atingir valores muito grandes. Desta maneira, a abordagem de meio descontínuo é considerada mais adequada (FERNANDES, 2008).

As águas subterrâneas são armazenadas nas aberturas ou espaços entre as partículas sólidas do sedimento e no interior de fraturas de rochas (Figura 30). Os espaços são chamados de poros, aberturas e vazios, quando ocorrem em solo ou sedimentos; fraturas quando ocorrem em sedimentos, rochas ígneas e metamórficas; ou cavernas e cavidades quando são encontrados em depósitos de evaporitos e carbonatos (por exemplo, em terrenos cársticos) Essas aberturas proporcionam espaço para armazenar água e, quando os espaços estão interligados, permitem a transmissão de água através das zonas vadosa e saturadas (POETER et al., 2020).

**Figura 30:** Preenchimento de água em diferentes meios porosos.



**Fonte:** modificado de Woessner & Poeter (2020).

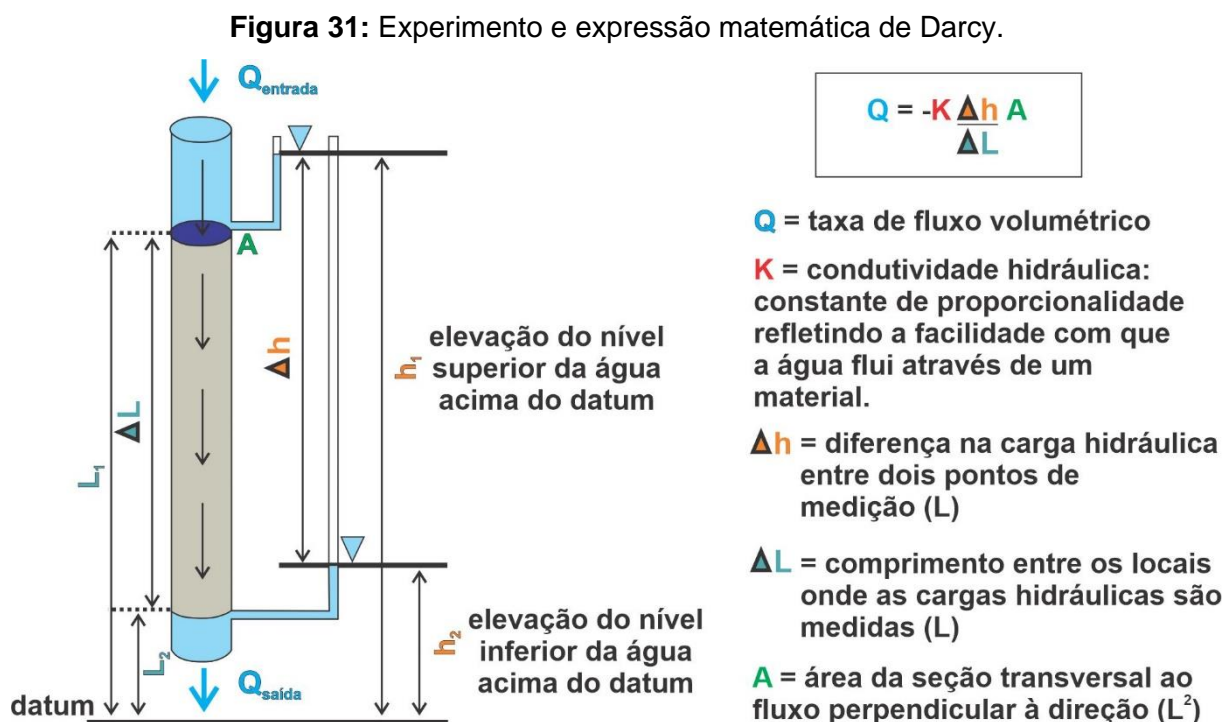
O aquífero livre é uma formação geológica de característica permeável, parcialmente saturada de água. Sua base é formada por uma camada semipermeável ou impermeável como, por exemplo, uma camada argilosa. Neste tipo de aquífero existe uma superfície livre de água sob efeito da pressão atmosférica, dessa maneira o principal responsável pela variação do nível da água neste aquífero é a taxa pluviométrica (FEITOSA & FILHO, 2000).

O aquífero é classificado como confinado quando a água no seu interior está confinada sob uma pressão superior a pressão atmosférica. Isto ocorre devido à existência de uma camada confinante impermeável acima do aquífero. Diferentes tipos de rochas podem armazenar água em aquíferos, o que resulta em diferentes classificações: aquíferos cársticos, aquíferos porosos e aquíferos fraturados ou fissurados (WOESSNER & POETER, 2020).

Os aquíferos cársticos são formados em rochas carbonáticas. As fraturas presentes neste tipo de aquífero podem atingir dimensões maiores, devido à dissolução do carbono pela água. O entendimento do fluxo subterrâneo em relevos

cársticos, por exemplo, é bastante complexo devido a magnitude e interconexões das aberturas preenchidas por água neste contexto geológico (POETER et al., 2020).

Os aquíferos porosos apresentam espaços vazios de variadas dimensões (poros) que permitem a circulação da água. A condutividade hidráulica em meios porosos pode ser definida como a velocidade aparente da água devido a um gradiente hidráulico criado pela formação aquífera, que funciona como condutor hidráulico (ALBERTI, 2017). O movimento de fluídos em meios porosos é definido pela Lei de Darcy (Figura 31). Em 1856, Henry Darcy elaborou um experimento para demonstrar o fluxo em função do gradiente de energia, dito potencial hidráulico. Através do experimento, que consistia em mensurar a quantidade de água que atravessa um meio cilíndrico poroso saturado, por unidade de tempo e área, surgiu o conceito de condutividade hidráulica. Essa propriedade física representa a taxa de água que percola através do solo ou rocha porosa (FEITOSA & FILHO, 2000). A expressão matemática que fundamenta a lei apresenta a relação entre a taxa de fluxo ( $Q$ ) através da camada de areia, a seção transversal ( $A$ ) e o comprimento ( $L$ ) da coluna de areia, a pressão hidráulica ( $h$ ) em toda a camada foi apresentada na Figura 31.

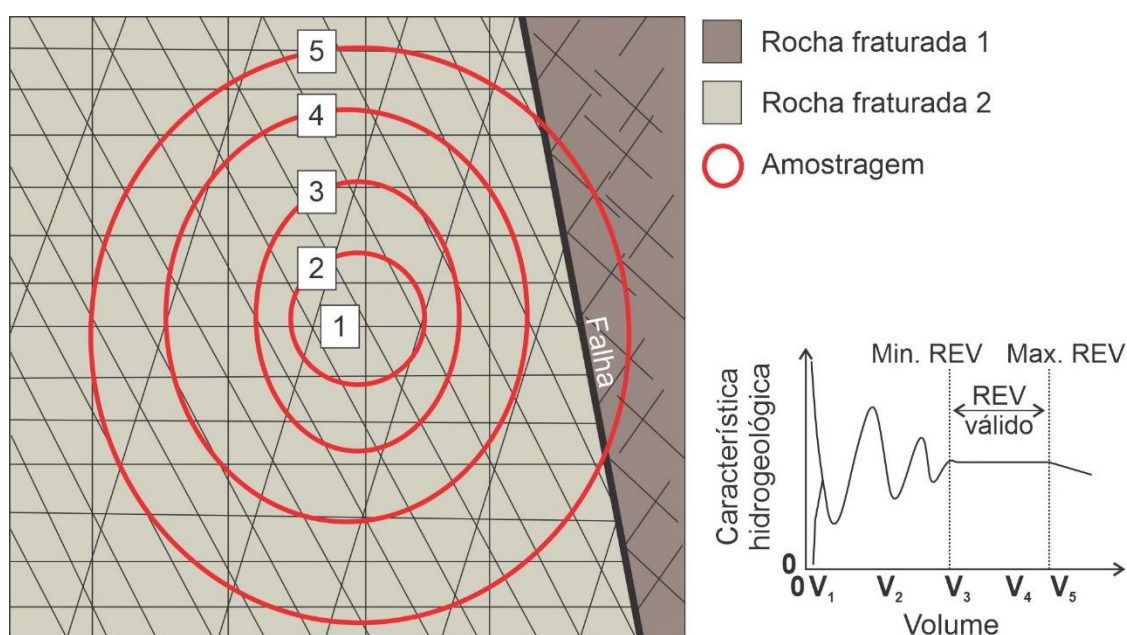


Fonte: modificado de Woessner & Poeter, 2020.

Os aquíferos fraturados são caracterizados por possuírem fraturas abertas que acumulam e transportam água. Estas fraturas resultam de alguma deformação sofrida

pela rocha, normalmente do tipo ígnea ou metamórfica, quando submetida a esforços tensionais de natureza diversa (FEITOSA & FILHO, 2000). O fluxo de água subterrânea através de rocha são de baixa porosidade primária depende da densidade, conectividade e abertura das fraturas presentes (DOMENICO & SCHWARTZ 1990). As diferentes famílias de fraturas presentes em um maciço rochoso criam um cenário complexo para o fluxo de água subterrânea. As características do contexto estrutural, como quantidade de famílias, interligações e aberturas das fraturas, estão diretamente relacionadas com o contexto hidrogeológico deste material. Estas características tornam importante a questão da escala na avaliação do padrão estrutural de um maciço rochoso. O volume elementar representativo (REV), que pode ser entendido como o range da amostragem, deve ser levado em consideração, ainda mais em contextos geológicos de diferentes litologias (Figura 32).

**Figura 32:** Modelo conceitual de um sistema rochoso fraturado e o volume elementar representativo da condutividade hidráulica do sistema.



**Fonte:** modificado de Woessner & Poeter, 2020.

Maciços rochosos fraturados possuem um papel importante na dinâmica do fluxo de água em estudos hidrogeológicos e geotécnicos. As famílias de fraturas e planos de falhas atuam como uma complexa rede de caminhos preferenciais para a percolação da água tanto lateralmente como em profundidade no meio físico (LAWRENCE, 2015). Em estudos geotécnicos e de geologia de engenharia, os altos

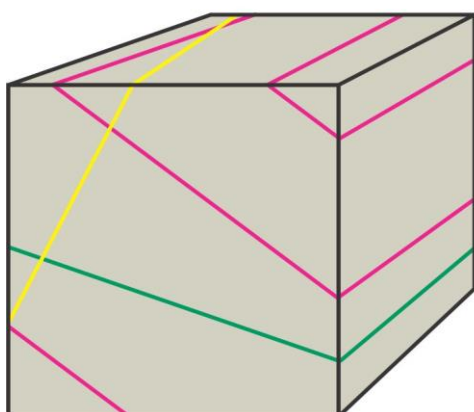
graus de fraturamento dos maciços rochosos podem ser um desafio na execução e monitoramento de diferentes empreendimentos, como túneis, pontes e barragens (XUHUA et al., 2008; ABRAHÃO, 2020).

Especialmente em projetos de engenharia de barragens, as condições do maciço rochoso da fundação do barramento são cruciais para enfrentar um dos principais desafios no projeto de uma barragem: fornecer estabilidade suficiente para evitar que a estrutura deslize (JAEGER, 1979; BROWN, 2017). Como está diretamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas da rocha que irá suportar todos os esforços oriundos do material armazenado, o grau de fraturamento do maciço rochoso necessita ser avaliado não só para a execução segura da obra, mas também para avaliar a integridade física durante a etapa de vida útil do empreendimento (XUHUA et al., 2008).

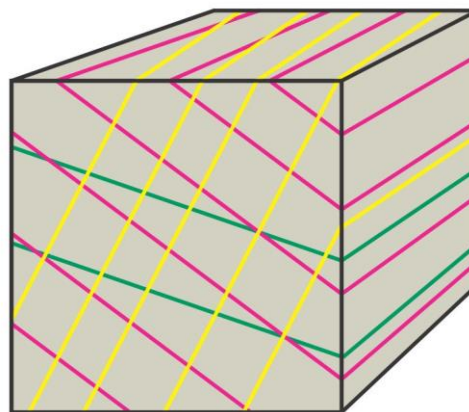
A Figura 33 apresenta dois modelos conceituais de rochas com diferentes graus de fraturamento. As rochas fraturadas são tipicamente anisotrópicas devido à variações direcionais nas fraturas. O modelo conceitual do item a) apresenta uma rede de fraturas espessadas. Neste caso, o meio não pode ser entendido como um meio equivalente poroso, ou seja, é mais aconselhado avaliar o fluxo de água subterrânea através de fraturas individuais ou rede de fraturas em uma área determinada. O modelo conceitual do item b) apresenta um sistema bastante fraturado em relação ao volume de rocha investigado e pode ser investigado como um meio poroso equivalente K e a lei de Darcy, uma vez que o fluxo de água subterrânea seria semelhante ao fluxo em meios porosos.

**Figura 33:** Modelos conceituais de meios fraturados.

a) **modelo conceitual com rede de fraturas espalhadas**



b) **modelo conceitual bastante fraturado**

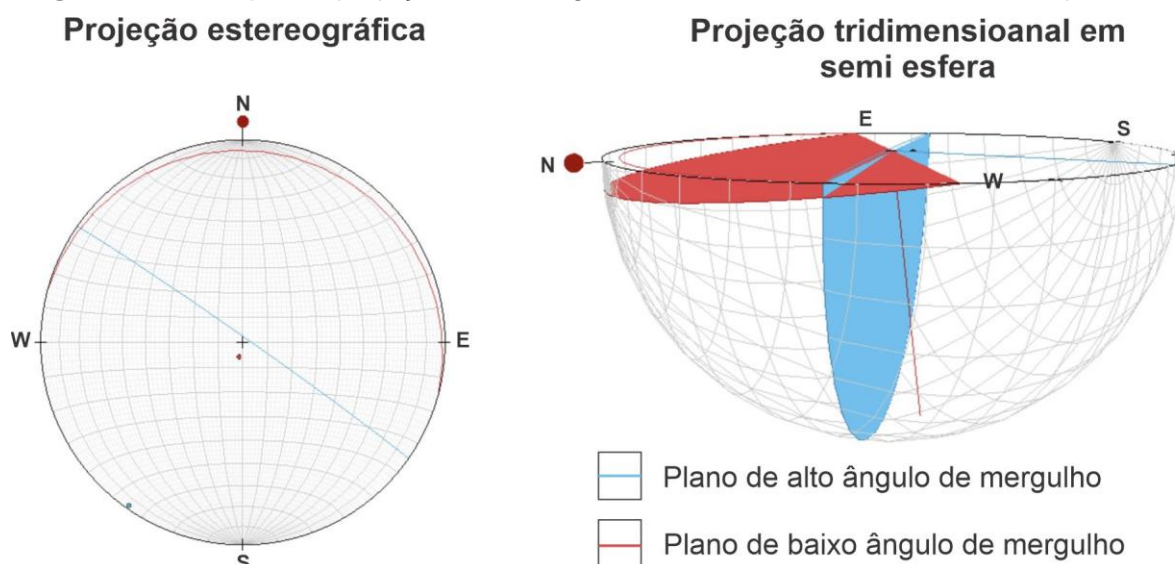


**Fonte:** modificado de Woessner & Poeter, 2020.

A caracterização em detalhe dos meios fraturados é uma etapa importante e crucial em estudos geotécnicos, hidrogeológicos, energéticos: geotermal, óleo e gás, e armazenamento de resíduos químicos, especialmente nucleares (NEUMAN, 2005; ASSALI et al., 2016). O padrão de fraturamento composto por uma ou mais famílias de fraturas possuem duas categorias de propriedades – métricas e topológicas. A obtenção de dados suficientes para entendimento da influência das fraturas nos diversos estudos não é simples (VIANA, 2021).

Os estudos de análise estrutural podem ser realizados de diferentes maneiras. Um dos estudos mais utilizados é através da realização de medidas das principais famílias de fraturas ou falhas em campo a partir do uso de uma bússola. As medidas apresentam a direção e o ângulo de mergulho do elemento estrutural. Essas informações são importantes para entender o padrão estrutural do maciço rochoso e compreender o comportamento do fluxo subterrâneo na área estudada. As medidas estruturais coletadas são inseridas em estereogramas (Figura 34). Essa ferramenta permite a representação de projeções esféricas e tridimensionais, como elementos planares e lineares situados no espaço, em uma superfície plana.

**Figura 34:** Exemplo de projeções estereográfica e tridimensional de elementos planares.



**Fonte:** elaborado pelo autor.

## **7. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **7.1 MÉTODOS SÍSMICOS**

Os métodos sísmicos possuem como um dos principais objetivos a geração de uma imagem dos elementos geológicos (camadas e variações estratigráficas, topo rochoso, nível d'água, por exemplo) em subsuperfície a partir de ondas sísmicas geradas por uma fonte. Dessa maneira, o princípio das técnicas sísmicas é a geração de ondas elásticas de maneira controlada que propagam pelo meio físico (SCHUCK & LANGE, 2007). Tais ondas podem ser classificadas como pulsos de energia de deformação e possuem características distintas, como diferentes velocidades e maneiras de propagação nos meios sólido e fluído (KEAREY et al., 2002; SCHUCK & LANGE, 2007).

Embora todos os métodos sísmicos façam uso da propagação de ondas sísmicas no meio, existem diferentes técnicas de aquisição de dados e, por consequência, diferenças entre as metodologias. Tipos e frequências de ondas distintas, investigação em superfície ou em furo de sondagem, uso de ondas ativas ou passivas, são alguns exemplos de características que podem divergir de acordo com a técnica utilizada (BEN-MENACHEM & SINGH, 1981; WIGHTMAN et al., 2003). A seguir são descritos os tipos, comportamentos de ondas sísmicas e suas relações com os parâmetros geotécnicos dos materiais geológicos.

#### **7.1.1 TIPOS E COMPORTAMENTOS DE ONDAS SÍSMICAS**

O comportamento e a propagação das ondas sísmicas em ambientes heterogêneos são bastante complexos. Um dos princípios utilizados pelos estudos que visam compreender a disposição das diferentes ondas no meio físico é que as perturbações sísmicas propagam através de deslocamentos elásticos em diferentes camadas geológicas do meio (LOWRIE, 2007). A aplicação deste padrão de deslocamento é condizente conforme a onda sísmica afasta da fonte geradora, entretanto, no caso de fontes sísmicas de grandes magnitudes, como é o caso dos terremotos, os deslocamentos próximos à fonte sísmica são anelásticos, ou seja, as partículas do meio físico são deslocadas permanentemente (LOWRIE, 2007; KREBES, 2019).

A onda de tensão é gerada em qualquer tipo de meio sólido a partir de uma perturbação mecânica. A energia gerada irá propagar a partir do ponto inicial da perturbação de acordo com as condicionantes do meio sólido. Com exceção das ondas eletromagnéticas, que podem viajar através de um vácuo, o material vibrará de acordo com a lei de Hooke à medida que uma onda passa pela maioria dos materiais (NAZARCHUK et al., 2017). Em ensaios sísmicos, o entendimento da propagação das diferentes ondas sísmicas e a complexidade do campo de onda depende das características da emissão da onda sísmica, conhecido nos ensaios como fonte sísmica, e a uniformidade do meio investigado (STOKOE & SANTAMARINA, 2000).

Em relação aos deslocamentos elásticos, existe uma variedade de ondas sísmicas que propagam ao longo da superfície da Terra (CHAPMAN, 2004). As ondas sísmicas são vibrações (ondas de energia) causadas por diferentes tipos de fontes, como por exemplo, o deslocamento e/ou falhamento de rochas no interior da Terra e explosões de natureza antrópica (STOKOE & SANTAMARINA, 2000). A propagação de ondas sísmicas em um meio elástico, homogêneo e isotrópico, pode ser definida pela seguinte equação (6):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot u) - \mu\nabla \cdot (\nabla \cdot u) \quad (6)$$

onde  $\rho$  é a densidade do meio,  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes de Lamé e  $u$  é a medição do deslocamento do meio a partir de seu estado não perturbado (TATHAM & MCCORMACK, 1991). De maneira geral, uma onda é uma perturbação que propaga no meio físico com variações no tempo e espaço. A relação temporal e espacial do comportamento da onda é classificada pelo período de propagação ( $T$ ) e o comprimento da onda ( $\lambda$ ). A partir desses parâmetros é possível mensurar a velocidade de propagação da onda através da seguinte relação:

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad (7)$$

Os deslocamentos elásticos podem ser compreendidos como propagações de diferentes perturbações nos materiais que carregam energia. Porém, o material onde a onda sísmica propaga não move com a onda. O movimento do material é restrito a pequenos movimentos, chamados de movimento de partículas, à medida que a onda

passa. Dessa maneira, o comportamento da deformação não é destrutivo, como são nos casos dos deslocamentos anelásticos. Após a passagem da onda, o material está no mesmo local e com a mesma estruturação física de antes da passagem da perturbação (FANCHI, 2010).

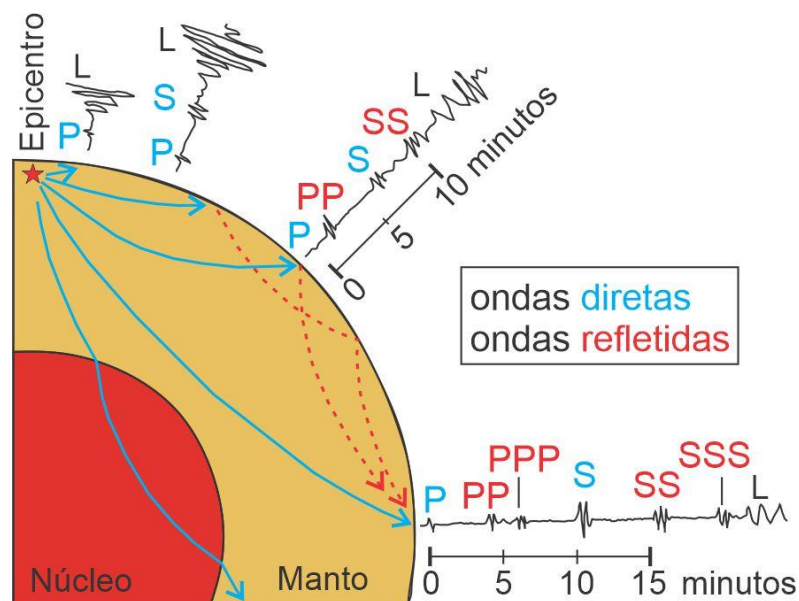
As diferentes perturbações dos materiais causadas por ondas sísmicas possuem comportamentos distintos (SCHUCK & LANGE, 2007). No caso dos ensaios sísmicos, as perturbações são induzidas de maneira artificial, normalmente através de golpes de marreta no solo. De acordo com o comportamento e as características de propagação das ondas sísmicas geradas, os ensaios possuem condicionantes específicos a fim de conseguir gerar a onda desejada no estudo (CHAPMAN, 2004). No presente estudo foram geradas ondas sísmicas de corpo e superficiais.

Dois tipos principais de ondas de corpo são utilizados em estudos sísmicos de sismologia e geotecnia: ondas primárias (P) e ondas secundárias (S). Essas ondas recebem esse nome devido ao tempo de registro no sismógrafo. Portanto, as ondas primárias, ou ondas compressionais, possuem características, como comportamento de propagação, que permitem com que este tipo de onda de corpo possua maiores velocidades de propagação no meio físico em relação as ondas secundárias, ou ondas cisalhantes (STOKOE & SANTAMARINA, 2000).

As ondas de corpo são refletidas e transmitidas em interfaces onde a velocidade e/ou densidade sísmica mudam, de acordo com a Lei de Snell. É provavelmente essa característica que faz com que os métodos sísmicos sejam o método geofísico mais comumente usado para investigar o interior da Terra. As diferentes composições do interior da Terra fazem com que as ondas sísmicas alterem suas direções de propagação. Dessa maneira, as refrações e reflexões das ondas sísmicas fornecem uma estrutura detalhada da crosta e do manto superior para investigações tectônicas, bem como para exploração de petróleo e minerais e em estudos de engenharia e ambientais (Figura 35) (MILSOM & ERIKSEN, 2013).

Em relação ao comportamento de propagação em meios sólidos, as ondas P são as primeiras ondas registradas em um sismograma, seguidas de perto por sua reflexão da superfície (SALEH, 2014). Nos sismogramas, o registro da onda S ocorre sempre após a chegada da onda P, uma vez as ondas cisalhantes geralmente tem velocidade de propagação cerca de 60% inferiores a velocidade das ondas P (CHAPMAN, 2004).

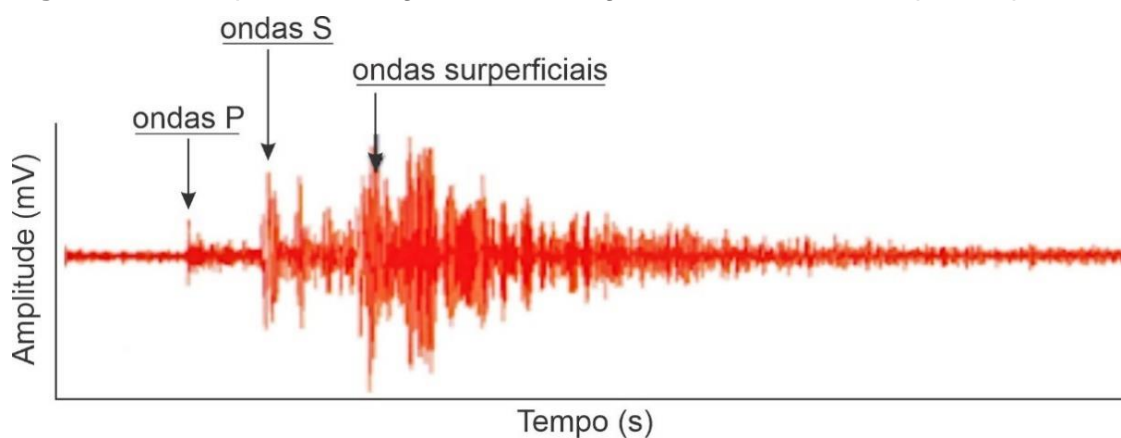
**Figura 35:** Propagação das ondas diretas e refletidas no interior da Terra e os respectivos sismogramas.



**Fonte:** modificado de Bolt, 1976.

Outros tipos de ondas também propagam em meios sólidos, entretanto, com menores velocidades e, portanto, são registradas posteriormente as ondas compressoriais e cisalhantes: são as ondas superficiais (Figura 36). Esse tipo de onda é dito superficial, pois possuem grandes amplitudes as quais decrescem de maneira exponencial com o aumento da profundidade e são classificadas em ondas Love e Rayleigh (PARK et al., 1999).

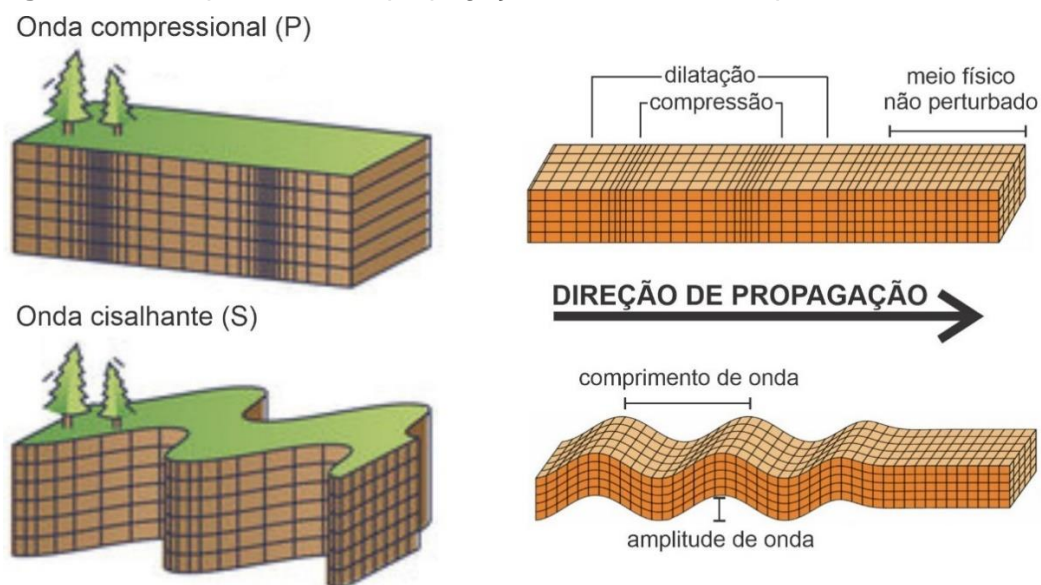
**Figura 36:** Exemplo de sismograma e as chegadas das ondas de corpo e superficiais.



**Fonte:** modificado de Stokoe & Santamarina, 2000.

O comportamento das ondas compressivas no meio físico é caracterizado pela vibração da onda na direção de propagação da onda, ou seja, a vibração da rocha ou dos sedimentos é condizente com a direção de propagação da onda. As ondas S, por sua vez, a oscilação da rocha ou dos sedimentos ocorre de maneira perpendicular à direção de propagação da onda (KREBES, 2019) (Figura 37).

**Figura 37:** Comportamento e propagação das ondas de corpo em meios sólidos.

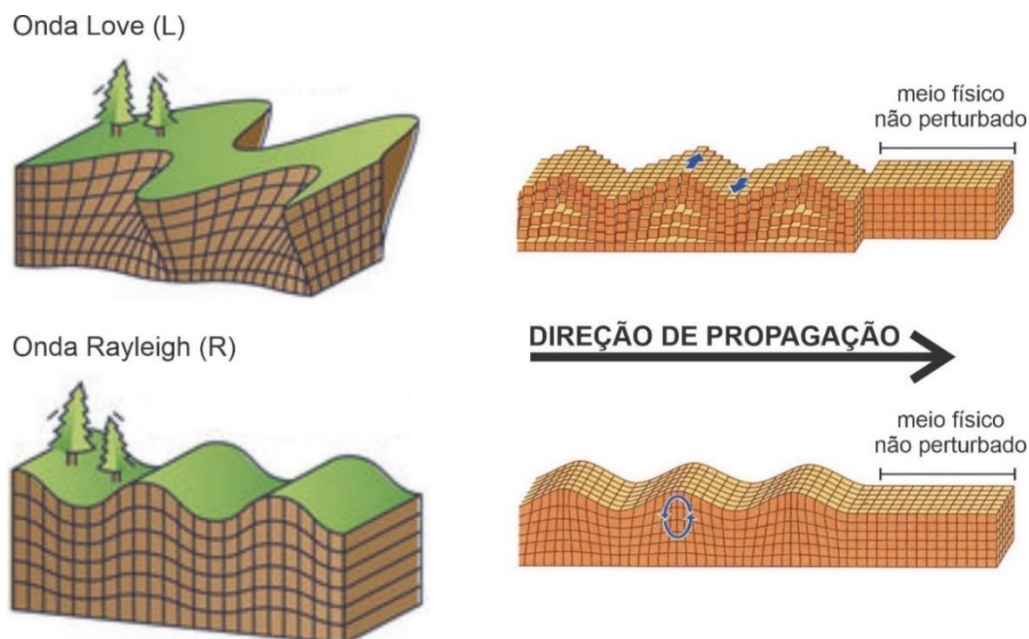


**Fonte:** modificado de Bolt, 1976.

Em especial as ondas superficiais do tipo Rayleigh, utilizadas neste estudo, apresentam componentes de uma onda P e uma onda de componente vertical do movimento das ondas S (S-V). Dessa maneira, o comportamento desta onda no meio físico é caracterizado pelo movimento da partícula é elíptico e retrógrado em direção a propagação da onda (GEDGE & HILL, 2012) (Figura 38).

Como a maioria dos materiais terrestres possui coeficiente de Poisson entre 0,25 e 0,48, as ondas Rayleigh são mais utilizadas em estudos geotécnicos, uma vez que seu valor de velocidade de propagação ( $V_R$ ) é próximo ao  $V_S$  (menos de 10% de erro) (WIGHTMAN et al., 2003), como será apresentado na Eq. 5 do tópico 7.3.1.2 ONDAS SÍSMICAS E OS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS deste trabalho.

**Figura 38:** Comportamento e propagação das ondas superficiais em meios sólidos.

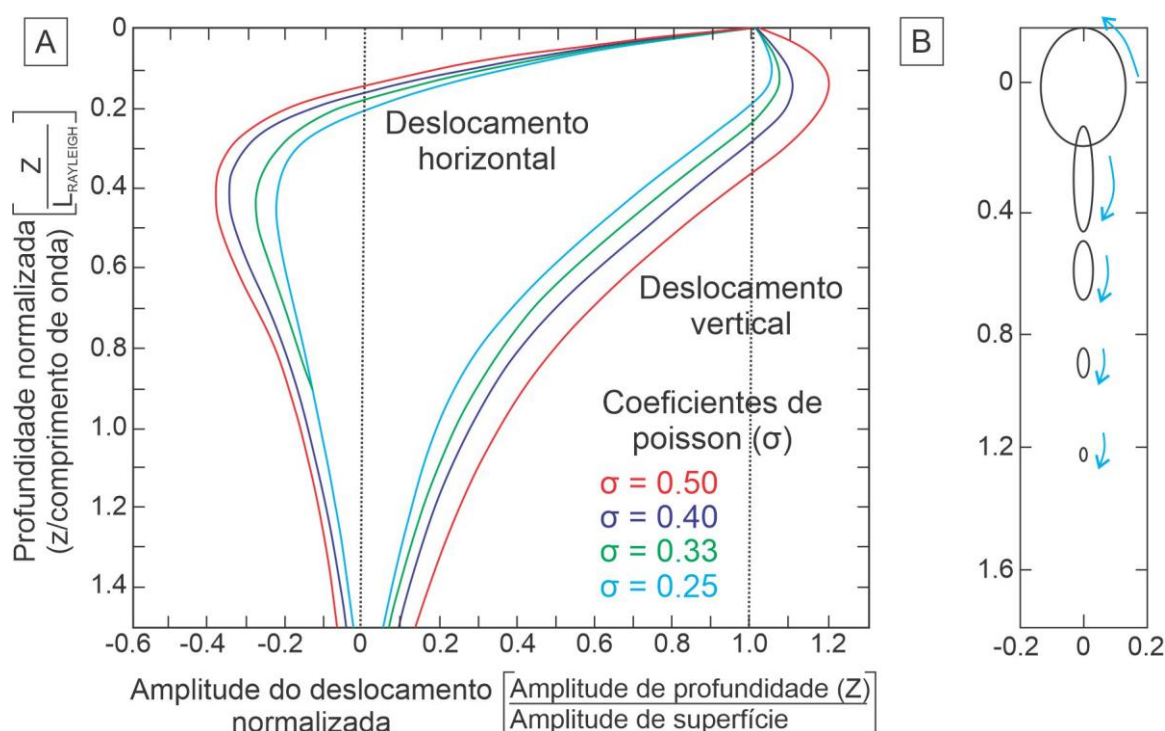


**Fonte:** modificado de Bolt, 1976.

Devido ao caráter dispersivo, as velocidades de propagação das ondas superficiais dependem da frequência (Figura 39). A amplitude das ondas superficiais, em especial da onda Rayleigh, decai de maneira exponencial com a profundidade, portanto, o movimento induzido na passagem das ondas Love e Rayleigh é limitado a uma porção rasa, cuja profundidade depende do comprimento de onda considerado (PARK et al., 1999). A vantagem no uso dessas ondas em estudos geotécnicos e ambientais é que as ondas superficiais sempre são registradas em um levantamento sísmico.

A presença de diferentes interfaces influencia no movimento das partículas, o que resulta em outros modos de propagação. Em particular, caso o meio apresente uma superfície exposta, como a superfície do solo em um estudo geotécnico, as ondas Rayleigh desenvolvem a partir de um movimento de partículas retrógrado e com padrão elíptico perto da superfície. A partir da observação dos deslocamentos individuais dos componentes verticais e horizontais das ondas Rayleigh, é possível notar que o componente horizontal muda de sinal na profundidade normalizada (profundidade / comprimento de onda) em torno de 0,15. Esse comportamento mostra que o movimento das partículas da onda muda de uma elipse retrógrada para uma elipse prógrada em um meio espaço uniforme (Figura 39) (STOKOE & SANTAMARINA, 2000).

**Figura 39:** a) Deslocamentos individuais dos componentes verticais e horizontais das ondas Rayleigh em função da profundidade; b) Movimento elíptico resultante da composição dos movimentos verticais e radiais.



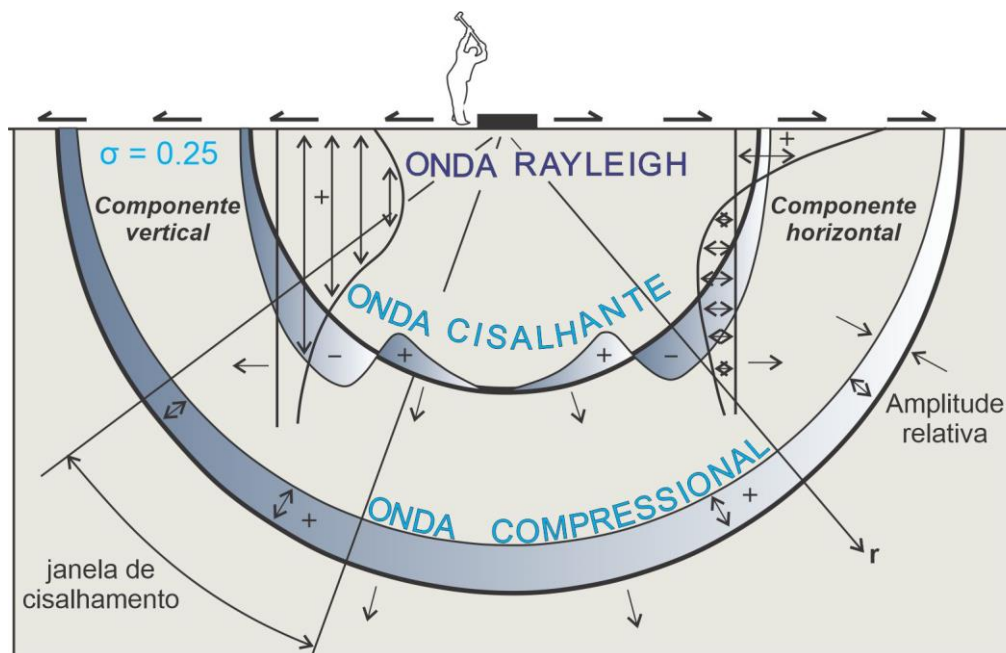
**Fonte:** modificado de Dal moro, 2015; adaptado de Gedge & Hill, 2012.

O espalhamento geométrico depende do tipo de propagação e resulta na propagação de uma quantidade de energia das ondas geradas pela fonte em volumes cada vez maiores à medida que as ondas propagam, o que motiva o uso do termo amortecimento geométrico ou de radiação (STOKOE & SANTAMARINA, 2000). A dispersão é representada pela conversão de 67% da energia em ondas Rayleigh, 26% em ondas cisalhantes, 7% em ondas compressionais (MILLER & PURSEY, 1955).

A Figura 40 ilustra o campo irradiado de uma fonte sísmica circular vibratória localizado na superfície em um meio elástico sem amortecimento do material. São ilustrados apenas os componentes de campo distantes do movimento das partículas e a atenuação de partículas. Neste caso, as ondas de corpo (P e S) propagam em regiões mais longes da fonte em frentes de onda hemisféricas, enquanto a onda Rayleigh propaga em uma frente de onda cilíndrica. Os movimentos das ondas corporais decaem com o aumento da distância à medida que  $1/r$  em relação à massa e  $1/r^2$  ao longo da superfície. Os movimentos das ondas de Rayleigh decaem como  $1/\sqrt{r}$  por causa da frente de onda cilíndrica (STOKOE & SANTAMARINA, 2000). Como estes estudos normalmente investigam profundidades rasas (alguns metros), o

alcance em profundidade limitado por parte dessas ondas não é uma desvantagem considerável (DAL MORO, 2015).

**Figura 40:** Distribuição dos movimentos das ondas de tensão a partir de uma base circular vibratória em um meio homogêneo, isotrópico e elástico.



Fonte: modificado de Woods, 1968.

### 7.1.2 RELAÇÃO ENTRE AS ONDAS SÍSMICAS E OS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Estudos que comprovem a eficácia e a aplicabilidade dos levantamentos geofísicos executados em campo fornecerem parâmetros mecânicos e elásticos são importantes e vantajosos na engenharia geotécnica. Os métodos geofísicos por não serem invasivos, ou seja, não necessitam de intervenções diretas na área de estudo, como, por exemplo, a abertura de trincheiras ou realização de sondagens, fornece informações a respeito dos elementos geológicos e estratigráficos em subsuperfície, como a profundidade do topo rochoso, o nível do lençol freático, a interface entre a zona saturada e insaturada e variações litológicas, que podem auxiliar a investigação geotécnica (SATO & FEHLER, 2009).

A propagação de ondas sísmicas no subsolo está diretamente relacionada com diversos fatores físicos, litológicos e elásticos presentes nos elementos geológicos do meio estudado (STOKOE & SANTAMARINA, 2000; FOTI, 2005). As propriedades

litológicas, devido principalmente as mais variadas composições mineralógicas, influenciam em parâmetros físicos do material tais como: grau de compactação, cimentação, quantidade de argila, disposição e textura dos grãos, os quais irão refletir no comportamento da propagação da onda sísmica neste corpo (SIMMONS & WANG, 1971; KHANDELWAL, 2012). É justamente a partir das propriedades litológicas que determinadas propriedades físicas, como a porosidade, densidade e a permeabilidade, são estabelecidas e influenciadas.

Os parâmetros elásticos e/ou mecânicos também estão diretamente relacionados com as características litológicas e, por consequência, das propriedades físicas do material analisado (ZISMAN, 1933; SATO & FEHLER, 2009). Um breve resumo das relações entre diferentes esforços impostos nos materiais geológicos e os parâmetros geotécnicos está apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8** - Classificação das constantes elásticas.

Parâmetros geotécnicos	Símbolo	Relações
Módulo de <i>Young</i>	E	$\frac{\text{tensão longitudinal}}{\text{deformação longitudinal}}$
Módulo de cisalhamento	G	$\frac{\text{tensão de cisalhamento}}{\text{deformação específica}}$
Coefficiente de Poisson	$\sigma$	$\frac{\text{deformação transversal relativa}}{\text{deformação longitudinal relativa}}$
Módulo volumétrico	K	$\frac{\text{tensão volumétrica}}{\text{deformação volumétrica}}$

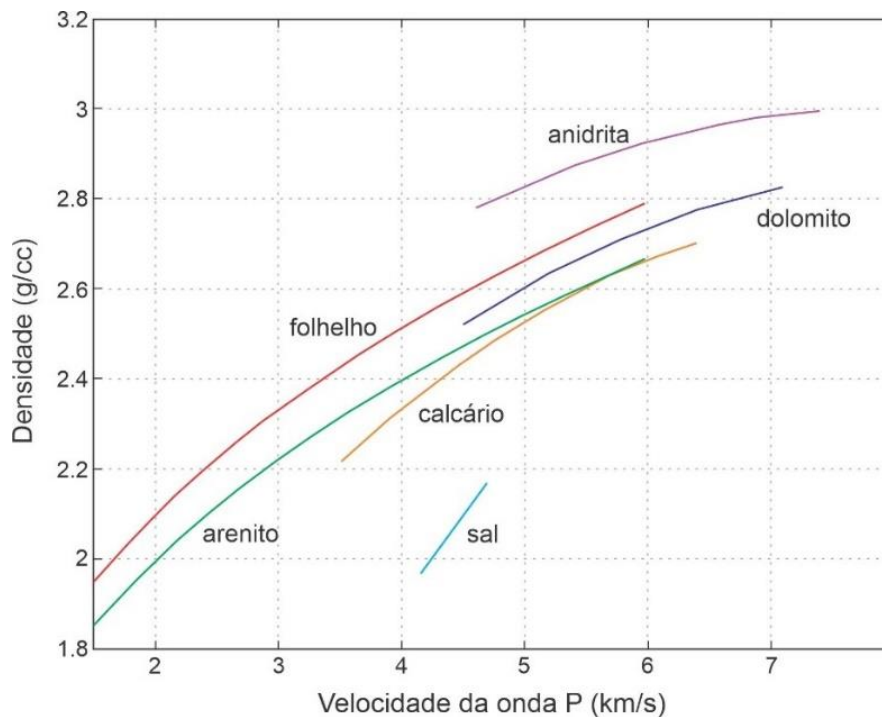
**Fonte:** Foti, 2000.

A elasticidade dos minerais que compõem o solo e a rocha, somada as alterações das propriedades físicas, como o grau de porosidade e saturação do material, por exemplo, influenciam em módulos e coeficientes elásticos importantes, como o coeficiente de *Poisson* ( $\sigma$ ), módulo de *Young* ou elasticidade ( $E_{\text{máx}}$ ), módulo volumétrico (*Bulk modulus*) e o módulo de cisalhamento ( $G_{\text{máx}}$ ) (FUMAL, 1978; AYRES & THEILEN, 1999; HANDY, 2007; MIAO et al., 2022).

A porosidade, por exemplo, está diretamente relacionada com a quantidade de argila no material ou ainda que materiais com minerais com ferro na sua composição apresentam maiores valores de densidades (SALEM, 2000; LAI & CARRERA, 2012; UYANIK, 2019). Nos diferentes tipos de rochas, os módulos volumétricos e de

cisalhamento do material rochoso estão diretamente relacionados com a densidade de modo que a velocidade da onda compressional tende a aumentar com o aumento da densidade (Figura 41).

**Figura 41:** Tendências velocidade-densidade para rochas sedimentares.



**Fonte:** modificado de Vočadlo, 2023.

As ondas de corpo não são dispersivas em um meio elástico uniforme, ou seja, a velocidade de propagação da onda é independente da frequência. Embora esse tipo de onda também apresente caráter dispersivo em solos homogêneos de pequena deformação e baixas frequências. Porém, o contexto estratigráfico e outras formas de heterogeneidade do meio físico podem resultar em alterações da velocidade da onda. Portanto, como as propriedades físicas e elásticas interferem em conjunto no comportamento das ondas sísmicas no meio e, por consequência, na velocidade da propagação da onda, é possível estabelecer uma relação entre estes parâmetros e os valores de velocidade das ondas sísmicas de corpo compressionais (P) e cisalhantes (S):

$$\text{Velocidade da onda P (V}_P\text{)} \quad V_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (8)$$

$$\underline{\text{Velocidade da onda S (V}_S\text{)}} \quad V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9)$$

onde  $\rho$  é a densidade. O coeficiente de *Poisson* ( $\sigma$ ), por exemplo, é importante na mecânica dos solos, especialmente em barragens de terra-enrocamento, uma vez que os valores desse coeficiente são utilizados nos modelos matemáticos para cálculo e análise tensão x deformação da estrutura (HANDY, 2007). O coeficiente é comumente obtido através de ensaios de laboratório que buscam a relação entre os valores da deformação transversal ou contração à tensão longitudinal ou ainda a extensão resultante de mudança no estresse normal sobre compressão ou dilatação, ou seja, é a razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal na direção do esforço da tração (TERZAGHI & PECK, 1967; HANDY, 2007).

Em diferentes tipos de solos, Salem (2000) determinou o coeficiente de Poisson em sedimentos a partir das ondas sísmicas e suas velocidades de propagação no meio. Como as ondas P propagam em uma velocidade superior as ondas S, a relação entre as velocidades das ondas P e S evidencia que não é possível obter valores de coeficiente de Poisson iguais ou superiores a 0,5. Em um meio homogêneo e isotrópico, o coeficiente de *Poisson* pode ser obtido através da relação entre as velocidades das ondas compressionais e cisalhantes (STOKOE & SANTAMARINA, 2000).

$$\underline{V_P, V_S \text{ e } \sigma} \quad V_P = V_S \sqrt{\frac{1-\sigma}{0,5-\sigma}} \quad (10)$$

Além do uso das velocidades das ondas de corpo (compressionais e cisalhantes) para obtenção do coeficiente de Poisson, as ondas superficiais, especialmente as velocidades das ondas Rayleigh ( $V_R$ ), também podem ser utilizadas para esse objetivo. As técnicas sísmicas que fazem uso das ondas superficiais possuem aplicações mais recentes na área de geotecnia e mecânica dos solos (PARK, 2013; EIKMEIER, 2018; AL-HEETY et al., 2021).

Uma das principais vantagens no uso das ondas superficiais é a possibilidade de aplicação em cenários com influências externas (ruídos). O fato destas ondas representarem boa parte da energia emitida em uma fonte sísmica superficial constitui uma vantagem da aplicação do método (PARK et al., 1999). São caracterizadas por

ondas de grandes amplitudes, baixas velocidade e frequência. A relação entre  $V_P$ ,  $V_S$  e  $V_R$  foi estabelecida por Achenbach (1975):

$$\underline{V_P, V_S \text{ e } V_R} \quad \left[2 - \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2\right]^2 - 4 \cdot \left[1 - \left(\frac{V_R}{V_P}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (11)$$

$$\underline{V_S \text{ e } V_R} \quad V_R = 0,874 \cdot V_S \quad (12)$$

As características de propagação das ondas Rayleigh na superfície terrestre são baseadas na interação entre as ondas compressoriais (P) e ondas S polarizadas no plano vertical (SV). A relação entre os valores de  $V_R$  em termos de  $V_S$  e o coeficiente de Poisson ( $\sigma$ ) foi modificada pela equação (11) e Achenbach (1975):

$$\underline{V_R, V_S \text{ e } \sigma} \quad V_R = \frac{0,874 + 1,117 \sigma}{1 + \sigma} V_S \quad (13)$$

Outros parâmetros mecânicos também podem ser estimados a partir dos valores de velocidades de propagação de ondas de corpo e superficiais, como o módulo de *Young* (E). Esse parâmetro é bastante importante na engenharia, pois os ensaios consistem em mensurar a facilidade com que um determinado material deforma a partir da lei de Hooke (KEATON, 2018) (Eq. 14).

$$\underline{V_P, E \text{ e } \sigma} \quad E = V_P^2 \rho \frac{(1-2\sigma)(1+\sigma)}{1-\sigma} \quad (14)$$

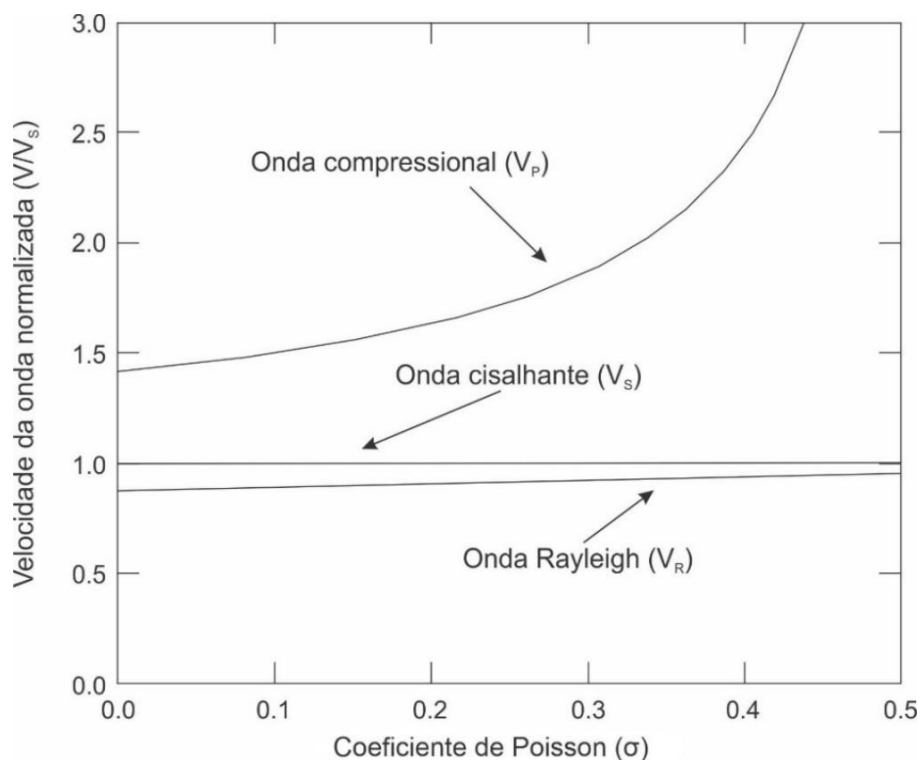
O comportamento de tensão-deformação dos solos também é alvo de estudo de diferentes análises sísmicas, principalmente, a partir da obtenção de valores de  $V_S$  que podem ser associados com o módulo de cisalhamento (G) através da seguinte relação (HARDIN & DRNEVICH, 1972):

$$\underline{V_S \text{ e } G} \quad G = \rho \cdot V_S^2 \quad (15)$$

As equações supracitadas evidenciam a relação entre os valores de  $V_P$ ,  $V_S$ ,  $V_R$  e o coeficiente de Poisson ( $\sigma$ ). Em um material teoricamente incompressível, ou seja, um material com grau de rigidez infinito, o  $\sigma = 0,5$ ;  $V_P$  tenderia ao infinito ( $\infty$ ) e,

portanto, a relação  $V_P/V_S$  também. Nesse contexto, a relação  $V_R$  e  $V_S$  não seria de  $V_R = 0,874 \cdot V_S$  e sim,  $V_R = 0,955 \cdot V_S$ . Em ensaios sísmicos de pequena deformação em solos não saturados normalmente são utilizadas relação das velocidades de ondas de corpo ( $V_P/V_S$ ) em torno de 1,5, o que corresponde a  $\nu = 0,1$ ; valor considerado baixo (STOKOE & SANTAMARINA, 2000) (Figura 42).

**Figura 42:** Relação entre as velocidades das ondas sísmicas e o coeficiente de Poisson.



**Fonte:** Richart et al. (1970).

Uma breve revisão dos estudos que relacionam diferentes parâmetros físicos e elásticos com valores de propagação de ondas sísmicas de corpo e superficiais pode ser visto na Tabela 9. Os parâmetros elásticos de solos, principalmente o módulo de Young ( $E_{máx}$ ), o módulo de cisalhamento ( $G_{máx}$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\sigma$ ), são parâmetros essenciais para a compreensão da análise dinâmica e estruturação do solo, e permitem identificar problemas relacionados à perda de compreensão do material. Dessa maneira, é evidente a importância dos estudos que comprovem e busquem novas relações entre os parâmetros físicos e elásticos de solos e rochas e os valores de velocidades de propagação de ondas sísmicas compressoriais ( $V_p$ ) e cisalhantes ( $V_s$ ) já foi motivo de diversos estudos.

**Tabela 9** – Trabalhos de correlações entre velocidades de ondas sísmicas e parâmetros físicos de solo e rocha em estudos geotécnicos.

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Parâmetros correlacionados</b>
Salem	2000	Determinar parâmetros geotécnicos solos e sedimento superficiais a partir valores de velocidade de ondas sísmicas.	Coeficiente de Poisson e Porosidade a partir de valores de $V_P$ e $V_S$ .
Foti et al.	2002	Obter valores de porosidade em solos a partir de ensaios cross-hole.	Porosidade e valores de $V_P$ e $V_S$ .
Uyanik	2010	Relação analítica para determinar a porosidade de solos saturados em profundidades rasas.	Porosidade e valores de $V_P$ e $V_S$ .
Sassa & Yamazaki	2016	Método de predição e avaliação da liquefação capaz de considerar a influência das formas de onda e durações de terremotos.	Cisalhamento torcional cíclico não drenado, cisalhamento simples cíclico de volume constante e ondas sísmicas.

### 7.1.3 SÍSMICA DE REFRAÇÃO

A propagação das ondas sísmicas no meio físico e a sua relação com as propriedades dos materiais geológicos (módulos elásticos e densidade) permitem a identificação e interpretação de diferentes tipos de interações entre as ondas e a geologia subsuperficial nos sismogramas (LOWRIE, 2007). Ao atingir camadas geológicas com diferentes propriedades elásticas, as ondas sísmicas respondem de acordo com alguns fenômenos físicos. Um dos fenômenos resultantes é a refração da onda sísmica (STEEPLES, 2005; SCHUCK & LANGE, 2007).

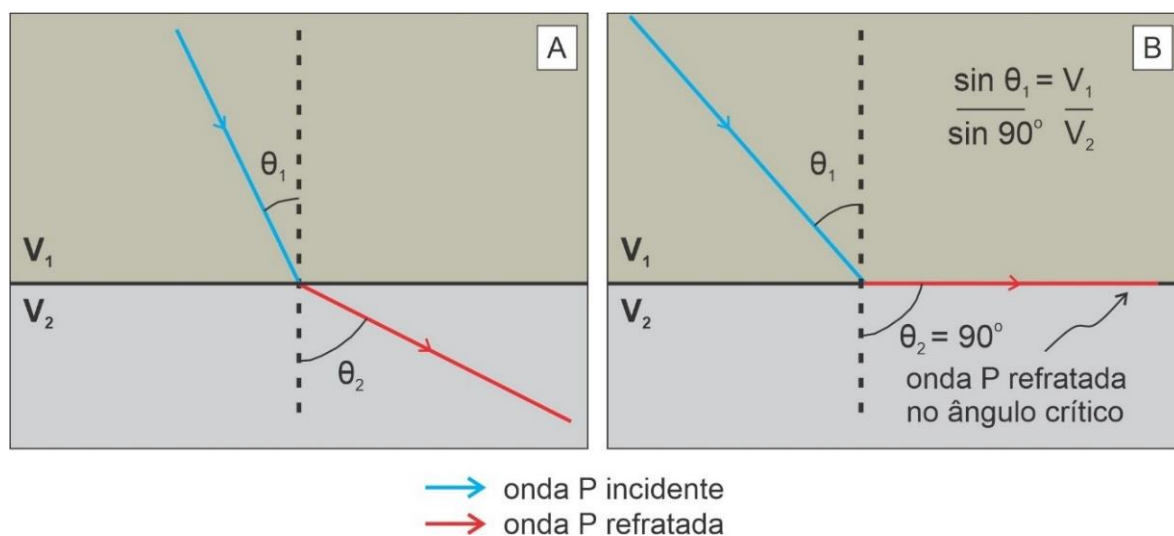
A refração da onda sísmica pode ser compreendida através do princípio da lei de Snell. O princípio é a expressão matemática que permite determinar o caminho que uma onda define ao ser transmitida de uma camada rochosa para outra através da relação entre os ângulos e as velocidades das ondas sísmicas (TELFORD et al., 1990). Dessa maneira, de acordo com a lei de Snell, a razão das velocidades de onda longitudinal dos materiais com velocidades distintas,  $V_1$  e  $V_2$ , e à razão dos ângulos

incidente ( $\theta_1$ ) e refratado ( $\theta_2$ ), pode ser demonstrado de acordo com a equação (Eq. 16):

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} \quad (16)$$

Geometricamente, a onda longitudinal ( $V_{L1}$ ) é refletida no mesmo ângulo que a onda incidente ( $V_1$ ) quando as duas ondas viajam no mesmo material e, portanto, possuem a mesma velocidade ( $V_1 = V_{L1}$ ) (Figura 43A). Esse comportamento não é tão relevante na sismica de refração e no entendimento da lei de Snell, porém mostra que parte da energia da onda é refletida na interface. Além da reflexão das ondas, quando estas atingem uma interface entre diferentes tipos de rochas, parte da energia é transmitida através do contato entre as camadas (LANKSTON, 1990; EVERETT, 2013).

**Figura 43:** Refração da onda sísmica de acordo com a Lei de Snell.



**Fonte:** modificado de Lankston, 1990.

O fenômeno da refração ocorre quando a velocidade da camada superior ( $V_1$ ) é maior que a camada inferior ( $V_2$ ). O aumento da diferença de velocidades entre as duas camadas, resulta no aumento do ângulo de refração. Em um determinado ponto, chamado de ângulo crítico, o ângulo de refração viajará ao longo da interface entre as duas camadas, ou seja, o ângulo refratado será de  $90^\circ$ . Quando as ondas atingem o ângulo crítico, não haverá mais ondas refletidas (Figura 43B). Portanto, o ângulo

crítico define o limite entre os métodos sísmicos de reflexão e refração (LANKSTON, 1990; LOWRIE, 2007).

Em um levantamento de sísmica de refração, de acordo com o comportamento das ondas de corpo supracitados, alguns itens precisam ser considerados: (1) a onda P será a primeira onda registrada e sua amplitude geralmente será maior que a amplitude da onda S, o que facilita sua identificação; (2) a espessura da cada camada geológica aumenta com a profundidade (RABEL, 2009). Este último item é necessário uma vez que o comprimento da onda sísmica aumenta com a profundidade à medida que os componentes de maior frequência são absorvidos (TELFORD et al., 1990).

Embora o comportamento e a propagação de ondas sísmicas em ambientes heterogêneos sejam bastante complexos, a interpretação e compreensão do fenômeno de refração de ondas de corpo em geometrias simples é um exercício interessante para entender como o fenômeno ocorre em contextos geológicos menos robustos, formado por camadas geológicas mais horizontalizadas e poucos elementos geológicos anisotrópicos à propagação da onda sísmica, como matacões e sistemas de fraturas (SCHUCK & LANGE, 2007). Em contextos geológicos simples, formados por duas camadas geológicas, a espessura da camada superior ( $h_1$ ) pode ser obtida a partir do tempo total de viagem das ondas refratadas e a lei de Snell (Eq. 17) (Figura 44A):

$$h_1 = \frac{t_i V_1 V_2}{2(V_2^2 - V_1^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

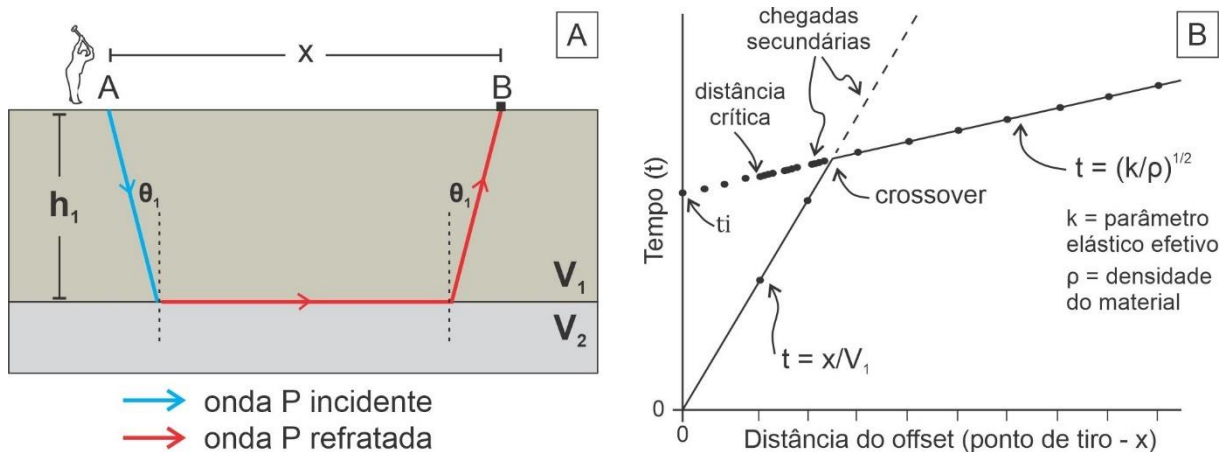
onde  $t_i$  é o tempo de interceptação da onda refratada. Nesse contexto, a velocidade das camadas é determinada a partir da medição das inclinações das ondas diretas e refratadas. Outra alternativa, é utilizar a distância cruzada para determinar a espessura (Eq. 18) (Figura 44B).

$$h_1 = \frac{X_{cross}}{2} \left[ \frac{(V_2 - V_1)}{(V_2 + V_1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Ao plotar o tempo de interceptação da onda refratada ( $t_i$ ) no eixo vertical e a distância de off set no eixo horizontal, a inclinação da reta do gráfico é a recíproca da

velocidade do meio físico em que ocorreu a refração crítica. Embora raramente seja o caso, duas camadas horizontais apresentaram dois segmentos de linha reta nos dados de tempo e distância. As velocidades das duas camadas podem ser determinadas a partir da recíproca da inclinação de cada reta (LANKSTON, 1990).

**Figura 44:** a) Refração da onda sísmica em contextos geológicos simples; b) utilização da distância cruzada para determinar a espessura da camada geológica.

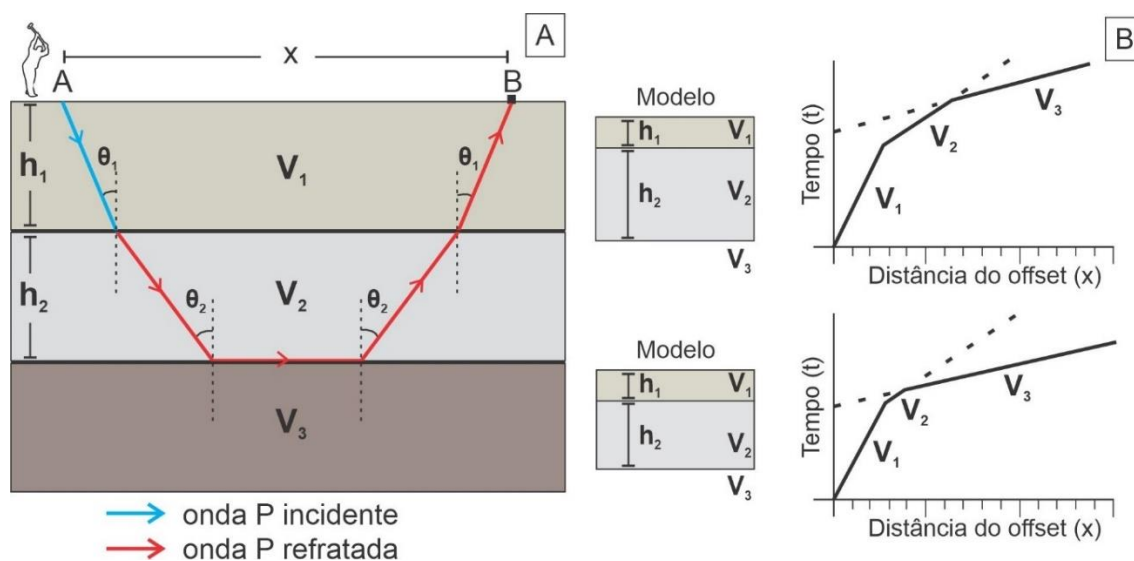


**Fonte:** modificado de Lankston, 1990.

No caso de interfaces com ângulo de mergulho superiores a 10% não é possível determinar a direção do mergulho a partir da aplicação de um tiro de apenas uma extremidade da propagação. Para determinar a direção do mergulho, é necessário inverter o perfil, ou seja, gerar fontes (disparo) tiros em ambas as extremidades da linha de aquisição (RABEL, 2009). Este procedimento foi realizado em todas as linhas de aquisições do trabalho.

Em contextos geológicos mais complexos, com três ou mais camadas geológicas, cada camada refratada resulta em uma inclinação linear na curva de tempo de viagem (Figura 45A). A partir da aplicação do mesmo princípio de interceptação do tempo ou distância cruzada é possível determinar a espessura de cada camada (LANKSTON, 1990) (Figura 45B). A Figura 45 mostra a relação entre as curvas de tempo de viagem e as variações na espessura das camadas geológicas.

**Figura 45:** a) Refração da onda sísmica em contextos geológicos mais complexos; b) interceptação do tempo ou distância cruzada em diferentes espessuras de camada.



**Fonte:** modificado de Lankston, 1990.

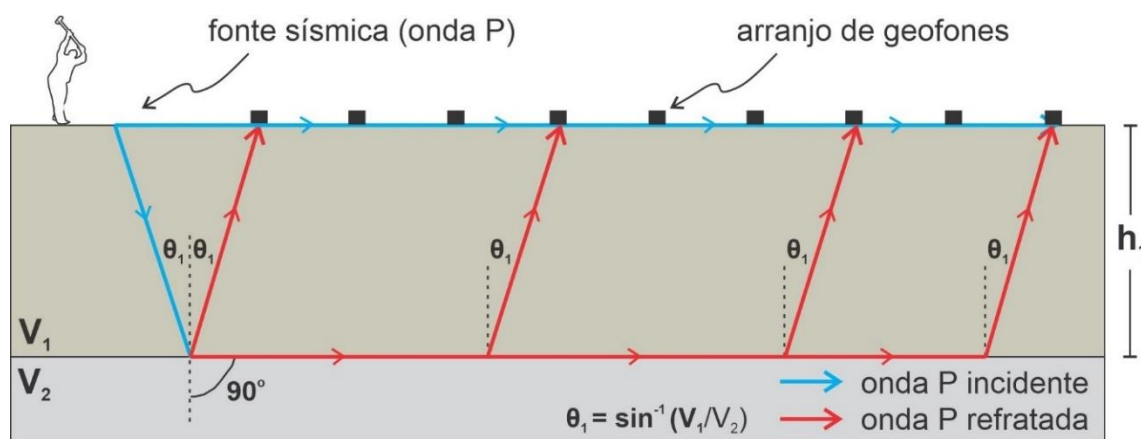
Ambas as ondas sísmicas, refratadas e refletidas, são registradas em sismogramas que mostram a curva de tempo de viagem da onda através da comparação entre o tempo versus a distância. A geração das curvas de tempo versus distância ocorrem a partir da instalação de sensores acoplados no solo, chamados de geofones (Figura 46). A quantidade de geofones é mensurada de acordo com as necessidades de cada investigação. Além da quantidade de geofones, as aquisições sísmicas fazem uso de geofones com características diferentes, como frequência e sentido da vibração do aparelho. Após determinados esses critérios, os sensores são conectados por um cabo ou via wireless ao sismógrafo.

O sismógrafo é conectado a uma fonte sísmica, responsável por induzir artificialmente ondas sísmicas no meio. Em estudos geotécnicos e ambientais, em investigações rasas, é comum o uso de uma marreta para geração das ondas sísmicas. Nos primeiros estudos de sísmicas de refração era comum o uso de explosivos, uma vez que os sismógrafos não eram tão modernos e robustos iguais os atuais, o que tornava necessária o uso desta fonte sísmica. Indiferente do tipo de fonte sísmica utilizada, é necessário um gatilho mecânico (*trigger*) no equipamento, a fim de registrar o momento exato da emissão da onda sísmica no solo (RABEL, 2009).

As fontes sísmicas podem ser geradas nas extremidades da linha de aquisição ou no meio. A geração de apenas uma fonte (disparo) é suficiente, porém, a fim de

melhorar a relação sinal-ruído, geralmente vários tiros (marretadas no solo) são realizados, e os resultados são empilhados juntos (TELFORD et al., 1990).

**Figura 46:** Esquema da aquisição de dados sísmicos de refração.



**Fonte:** modificado de Lankston, 1990.

#### 7.1.4 ANÁLISE MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIAIS (MASW)

Em estudos geotécnicos e de engenharia, a análise do comportamento da dispersão de ondas superficiais no meio físico tem como principal objetivo a obtenção do perfil de velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ). Os valores de  $V_s$ , especialmente a velocidade média da onda de cisalhamento nos 30 m mais superficiais do subsolo – dito  $V_{s30}$ , são utilizados em cálculos da construção civil destinados a elaboração de estruturas resistentes a terremotos em zonas sísmicas (FOTI et al., 2018).

Além do uso em estudos de ameaça sísmica, a compreensão do caráter dispersivo das ondas superficiais em meios estratificados, por exemplo, a fim de inferir variações nas propriedades elásticas da subsuperfície tem outra importância na geologia de engenharia, uma vez que a velocidade das ondas S possui relação direta com o grau de rigidez do material analisado e é praticamente insensível a saturação do maciço terroso (MAVKO & JIZBA, 1994; XIAOQIANG et al., 2021). A relação entre os valores de  $V_s$  e diferentes parâmetros geotécnicos foi apresentada no tópico 7.3.1.2 ONDAS SÍSMICAS E OS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS desta tese.

Inicialmente, a análise da dispersão das ondas superficiais era realizada pela técnica espectral (em inglês, *Spectral Analysis of Surface Waves - SASW*), baseada na mudança de fase entre dois receptores em função da frequência (LIN et al., 2017). O método consistia em induzir artificialmente fontes superficiais a partir de disparos

(fontes sísmicas) com diferentes aberturas entre os geofones. As diferentes aberturas permitiam com os diferentes comprimentos de ondas fossem registrados através de dois sensores (NAZARIAN et al., 1983; EIKMEIER, 2018).

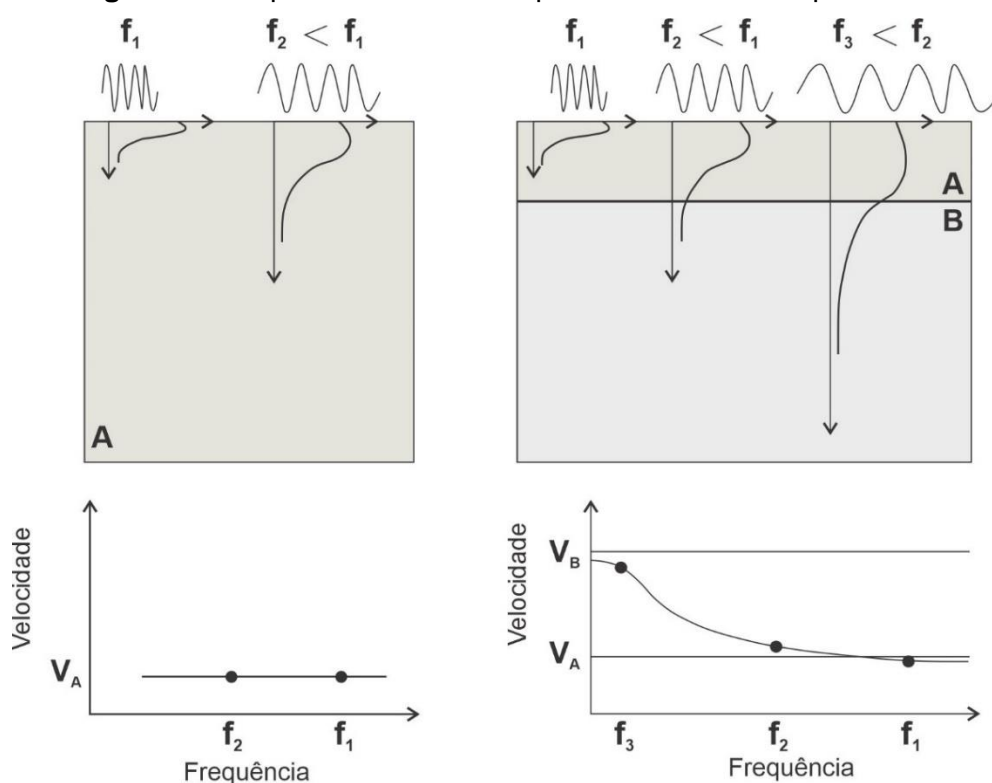
Na década de 90, o desenvolvimento de equipamentos e softwares de processamento mais robustos permitiu o aumento da quantidade de estações receptoras e a criação da técnica da análise multicanal de ondas superficiais (em inglês, *Multichannel Analysis of Surface Waves - MASW*), em um projeto do Serviço Geológico do Kansas. A análise das ondas superficiais pode ser realizada através de fontes passivas ou ativas (PARK et al., 1996, 1998, 1999).

O MASW utiliza as propriedades de dispersão do meio. Esse fenômeno ocorre quando as ondas harmônicas com diferentes frequências propagam no meio dispersivo com velocidades distintas. Dessa maneira, o pacote de ondas apresenta uma forma alterada constantemente durante a propagação (EIKMEIER, 2018). A expressão gráfica da variação das velocidades de fase em função da frequência é chamado de curva de dispersão no método (WEI, 2022).

O fenômeno da dispersão pode ser significativo em um meio estratificado que apresente diferentes valores de velocidades de propagação das ondas sísmicas, situação bastante comum em ambientes de investigação rasa (PARK et al., 1999). Devido às mudanças das propriedades elásticas com a profundidade em um meio não homogêneo, comprimentos de ondas longos (longos períodos/baixas frequências) propagam em maiores profundidades e fornecem informações das velocidades das camadas mais profundas, enquanto que os comprimentos de ondas curtos (curtos períodos/altas frequências) propagam mais próximos à superfície e são influenciados pelas velocidades das camadas mais rasas (Figura 47). Portanto, diferentes comprimentos de onda propagam com diferentes valores de velocidades (XIA et al., 1999; WEI, 2022).

Indiferente da fonte sísmica utilizada, ativa ou passiva, o método tem como base a relação entre os ângulos de fase e *offset* fonte-receptor (PARK et al., 1999; LIN et al., 2017; SASTRY & CHAHAR, 2019). O MASW ativo tem como princípio a geração de uma curva de dispersão proveniente de uma dupla transformada de Fourier do registro multicanal de ondas superficiais geradas artificialmente por uma fonte sísmica (XIA et al., 2000). O MASW passivo utiliza os ruídos do ambiente (PARK et al., 2007).

**Figura 47:** Esquema do caráter dispersivo das ondas superficiais.



**Fonte:** modificado de Richart et al. (1970).

A aquisição de MASW faz uso de geofones de componente vertical. A frequência natural dos geofones está diretamente relacionada com o nível de investigação desejada (STROBBIA, 2002; EIKMEIER, 2018). A relação entre a frequência mais baixa ( $f_{min}$ ) e a velocidade da onda de mínima frequência ( $V_{fmin}$ ) pode ser utilizada para estimar o nível de profundidade da investigação ( $Z_{máx}$ ), de acordo com a Eq. (19). Dessa maneira, em investigações rasas, de poucos metros de profundidade, comuns em estudos geotécnicos, geoambientais e de engenharia, é sugestivo o uso de geofones de baixa frequência natural (<10 Hz) (PARK et al., 1999; STROBBIA, 2002).

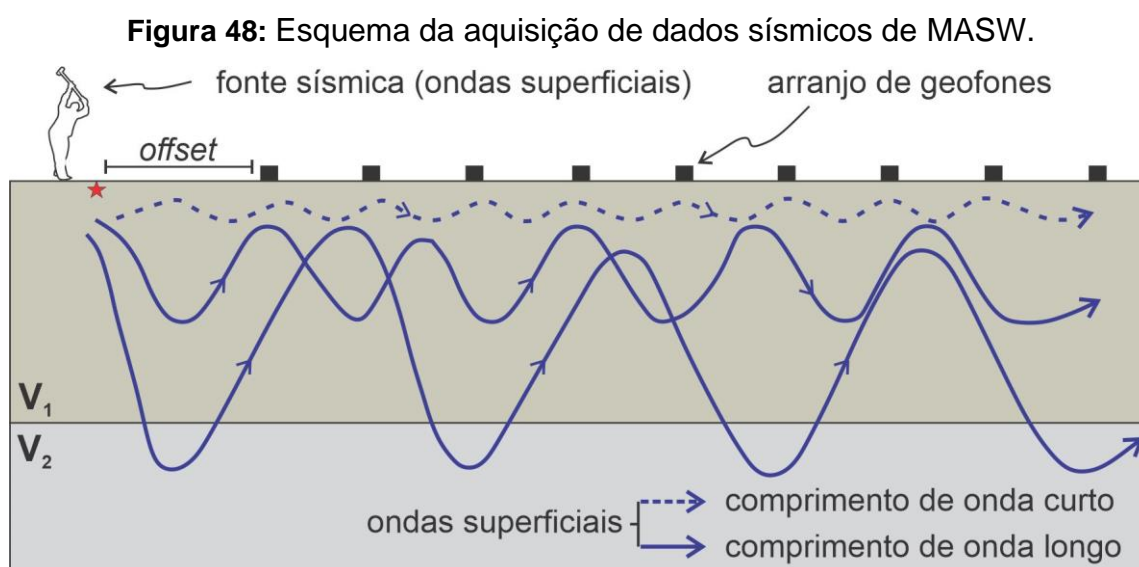
$$Z_{máx} = -0,5 \frac{V_{fmin}}{f_{min}} \quad (19)$$

Além da utilização de geofones com frequências menores, o intervalo de amostragem do MASW necessita ser maior, normalmente entre 0,5 ms a 1,0 ms. Isso ocorre devido a velocidade de propagação das ondas superficiais e seu registro mais tardio nos geofones quando comparado com o tempo de chegada das ondas de corpo.

O intervalo de amostragem (ou comprimento de janela de tempo –  $T$ ) suficiente para registro do espectro da onda de superfície em sua totalidade pode ser obtido de acordo com a relação entre o comprimento do arranjo de geofones ( $L$ ) e a velocidade mínima ( $V_{min}$ ) esperada (Eq. 20) (STROBBIA, 2002; EIKMEIER, 2018).

$$T = \frac{L}{V_{min}} \quad (20)$$

Na execução do ensaio MASW é recomendada a aquisição dos dados a partir do uso de diferentes pontos de geração de ondas sísmicas ("offsets" mínimos) com a finalidade de obter um bom registro das ondas Rayleigh. Dessa maneira, é minimizada a interferência de outros eventos sísmicos, tais como os de refração das ondas de corpo (DAL MORO, 2015; EIKMEIER, 2016). No presente trabalho foi respeitada essa recomendação. Em todas as linhas de aquisição foram utilizados diferentes *offsets* nas duas áreas de estudo (Figura 48).



## 7.2 MÉTODOS ELÉTRICOS

O método da Eletroresistividade consiste em introduzir corrente elétrica de maneira artificial no solo e gerar um campo elétrico. A partir de diferentes sensores, conhecidos como eletrodos, acoplados de maneira ordenada na superfície do solo, dito arranjos geoeletricos, são realizadas medidas das diferenças de potencial no meio

geológico (PARASNIS, 1967; KAUFMAN & ANDERSON, 2010). Duas técnicas de aquisições de dados geoeletricos são consagradas na literatura: sondagem elétrica e tomografia elétrica (ERKAN, 2008).

Os dados de resistividade elétrica aparente coletados são inseridos em softwares de inversão de dados dedicados. A partir do uso de diferentes algoritmos de inversão geofísica, o resultado é uma seção bidimensional (2D) ou um modelo tridimensional (3D) com o melhor ajuste entre os valores medidos em campo e o modelo que representa os dados (ELLIS et al., 1994; LOKE, 2000). Assim como em boa parte dos métodos geofísicos, variações na propriedade física utilizada pelo método fornecem informações a respeito das heterogeneidades do meio investigado (GALLAS, 2000; BAGDASSAROV, 2021).

No caso do método da Eletrorresistividade, a propagação da corrente elétrica em subsuperfície pode sofrer alterações de acordo com os diferentes elementos do modelo geológico. A disposição das camadas geológicas compostas por materiais de mineralogias distintas e, portanto, diferentes propriedades físicas são um exemplo. O entendimento dos desvios dos valores de diferença de potencial analisados pelo método tornam mais desafiador em cenários geologicamente mais heterogêneos e complexos (MUSSET & KHAN, 2000).

A resistividade elétrica de um material geológico é definida como a resistência ao fluxo ordenado de corrente elétrica imposta através de um campo elétrico no material. A geração do campo elétrico ocorre a partir da injeção de corrente elétrica artificial através de fios conectados a uma fonte. A injeção de corrente produz uma força elétrica com potencial de atuação sobre as cargas presentes no meio físico. A relação entre a intensidade da corrente elétrica injetada ( $I$ ), a diferença de potencial entre as extremidades do material ( $V$ ) e o resistor ( $R$ ) pode ser obtida pela equação da 1ª Lei de Ohm (Eq. 21). O resultado é obtido em Ohm ( $\Omega$ ).

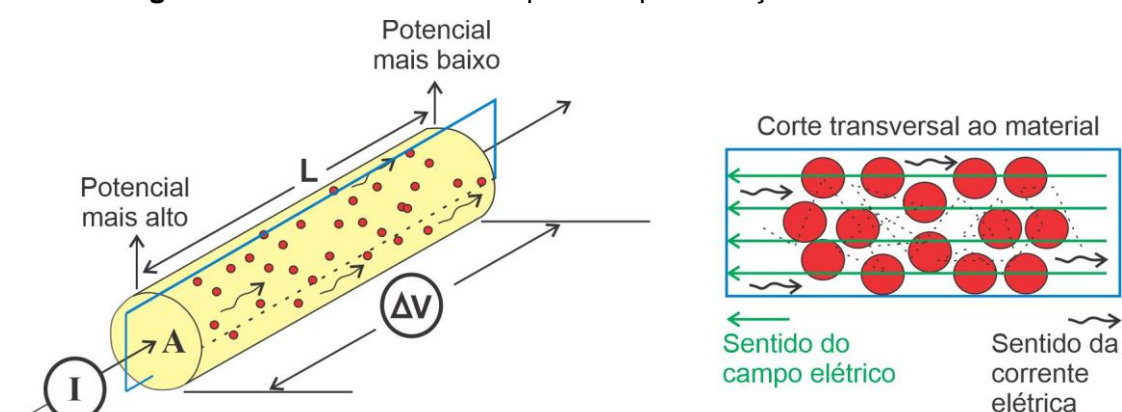
$$R = \frac{V}{I} \quad (21)$$

Geometricamente, um circuito elétrico simples é constituído por uma fonte de injeção de corrente elétrica e fios elétricos responsáveis por conectar a fonte as extremidades do resistor de forma paralela. A medição das diferenças de tensão entre

as extremidades é realizada através de um voltímetro. O instrumento é usado para medir a diferença de potencial ou tensão entre dois pontos em um circuito elétrico.

A unidade de diferença de potencial é medida em volts (V). A conexão de forma paralela com o objeto no qual a tensão deve ser medida é importante, pois o instrumento é construído com o objetivo de ter um alto valor de resistência. Se a alta resistência estiver conectada em série, o fluxo de corrente será quase zero, o que significa que o circuito foi aberto (Figura 49).

**Figura 49:** Circuito elétrico simples e representação da Lei de Ohm.



**Fonte:** modificado de Musset & Khan, 2000.

O entendimento da 1ª Lei de Ohm e do circuito elétrico simples permitem a compreensão de como a diferença de potencial é mensurada em um objeto. Entretanto, outros parâmetros devem ser levados em consideração. O comprimento e a forma do objeto influenciam no fluxo da corrente elétrica no interior do material. A 2ª Lei de Ohm apresenta a relação entre a resistividade elétrica ( $\rho$ ), a área da seção transversal ( $A$ ) e o comprimento de um corpo cilíndrico homogêneo ( $L$ ), dada pela Eq. 22. O resultado, obtido em Ohm.m ( $\Omega\text{m}$ ), representa a resistência por volume unitário e é uma propriedade inerente ao material.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (22)$$

A 2ª Lei de Ohm mostra que a dimensão e o posicionamento dos elementos geológicos devem ser levados em consideração, uma vez que a resistividade elétrica é inversamente proporcional ao comprimento do corpo e diretamente proporcional à área de sua seção transversal. Além disso, define que os materiais podem possuir

resistividades elétricas ( $\rho$ ) iguais, entretanto, apresentarem resistências diferentes ( $R$ ). Dois cilindros feitos do mesmo material, por exemplo, com dimensões diferentes, apresentariam a mesma resistividade elétrica, porém resistências diferentes.

Em alguns estudos, como em investigações geoeletricas do grau de saturação de solos (DIMECH et al., 2019), por exemplo, é mais conveniente utilizar o inverso da resistividade elétrica: a condutividade elétrica ( $\sigma$ ), expressa em siemens por metro (Sm). O fluxo da corrente elétrica ( $J$ ) através de um material com determinada resistividade ( $\rho$ ) e área de seção transversal ( $A$ ) pode ser expresso da seguinte forma a partir da aplicação e substituição das Leis de Ohm. A partir da 1ª Lei de Ohm (Eq. 22) e a substituição da resistência ( $R$ ) inerente do material na fórmula (Eq. 21), temos:

$$R = \frac{V}{I}$$

$$\frac{\rho \Delta x}{A} = \frac{\Delta V}{I} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{I \rho}{A} \quad (23)$$

Dessa forma, a partir da aplicação das Leis de Ohms, o fluxo da corrente elétrica ( $J$ ) em um meio contínuo pode ser expresso como  $J = \sigma E$ , onde  $E$  é a intensidade do campo elétrico, em Volts por metro (Eq. 24).

$$\frac{dV}{dx} = E = \frac{I \rho}{A} = J \rho \quad (24)$$

### 7.2.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA E OS MATERIAIS GEOLÓGICOS

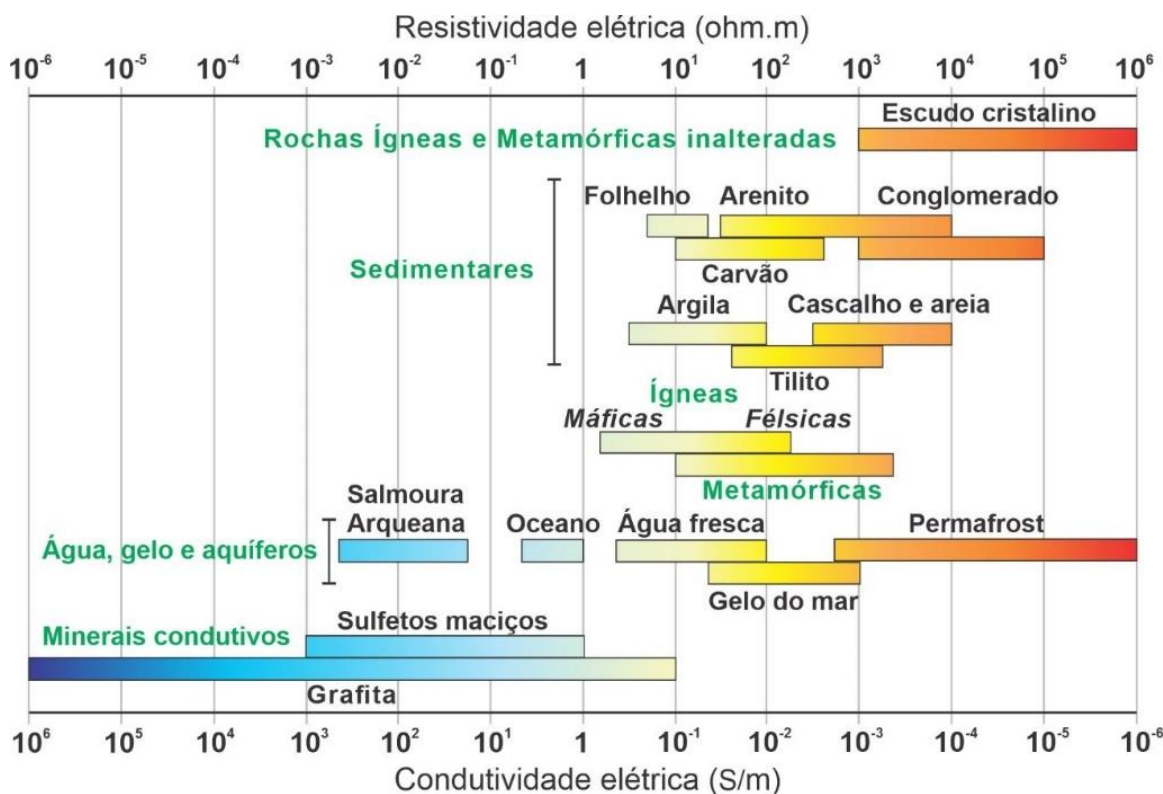
O método da Eletrorresistividade aplicado a geociências é consagrado na literatura graças a diversos estudos de investigações do meio físico publicados, os quais comprovam a eficiência e as vantagens do uso da metodologia. A metodologia faz uso de uma propriedade física dos materiais que possui grande variação dos valores: a resistividade elétrica (SHARMA, 1997; LOWRIE, 2007; REYNOLDS, 2011).

A resistividade elétrica dos elementos geológicos está diretamente relacionada com as propriedades físico-químicas destes materiais e suas alterações (TELFORD et al., 1990). As variações destas propriedades estão correlacionadas com diversos fatores condicionantes, como nível de saturação do material, grau de compactação,

alterações na mineralogia, grau de alteração, por exemplo (BAGDASSAROV, 2021). Outros parâmetros físico-químicos como o grau de porosidade do material, a mobilidade dos íons, as variações nas concentrações iônicas e alterações da temperatura também influenciam nos valores de resistividade elétrica (PARKHOMENKO, 1967; MICKUS, 2021).

As alterações nas propriedades físico-químicas dos materiais resultam em alterações na capacidade do material geológico permitir o fluxo da corrente elétrica no seu interior. As variações na dificuldade desse fluxo podem ser medidas indiretamente pelos métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos (EM-38 e TDEM). Dessa maneira, uma vez que os diferentes tipos de rochas possuem comportamentos geológicos diferentes e processos de formações diferentes, em condições normais as rochas ígneas apresentam maiores resistividades e as rochas sedimentares menores valores. As rochas metamórficas apresentam valores intermediários, mas comumente sobrepõem aos outros dois tipos (Figura 50) (LESMES & FRIEDMAN, 2005).

**Figura 50:** Variações da resistividade e condutividade elétricas em diferentes materiais geológicos.



**Fonte:** modificado de Palacky, 1987 e Miensopust, 2010.

Os dados da Figura 50 mostram que as rochas sedimentares possuem uma considerável variação de valores de resistividade elétrica. Esse comportamento ocorre principalmente em função do teor de água nestes materiais. A maioria das investigações geoeletricas em estudos ambientais, por exemplo, é realizada em contextos geológicos de rochas sedimentares ou em solos (MICKUS, 2021). A relação empírica desenvolvida por Archie (1942) apresenta alguns fatores atrelados a formação geológica que estão diretamente relacionados com os valores de resistividade elétrica do material (Eq. 25).

$$\rho = \alpha \varphi^{-m} s^{-n} \rho_w \quad (25)$$

onde  $\rho$  é a resistividade elétrica do material,  $\rho_w$  é a resistividade elétrica da água,  $\varphi$  é a porosidade,  $s$  é a fração volumétrica de poros,  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  são constantes em que  $0,5 \leq \alpha \leq 2,5$ ;  $1,3 \leq m \leq 2,5$  e  $n$  é aproximadamente 2. Esta relação é utilizada em estudos de perfilagens geoeletricas (REYNOLDS, 2011).

### 7.2.2 TÉCNICA DA TOMOGRAFIA ELÉTRICA

As técnicas e algoritmos de inversões geofísicas foram um importante marco na área da geofísica aplicada atrelado ao desenvolvimento técnico-científico das últimas décadas do século 20 (ORELLANA, 1972; LOKE et al., 2003). Diversos avanços aconteceram na área neste período, como o desenvolvimento de novos instrumentos, mais rápidos e com maiores capacidades de leitura de dados e, com o avanço da computação, técnicas de processamento de dados foram desenvolvidas com o objetivo de obter modelos mais robustos e eficientes (PARASNIS, 1990; OLAYINKA & YARAMANCI, 2000).

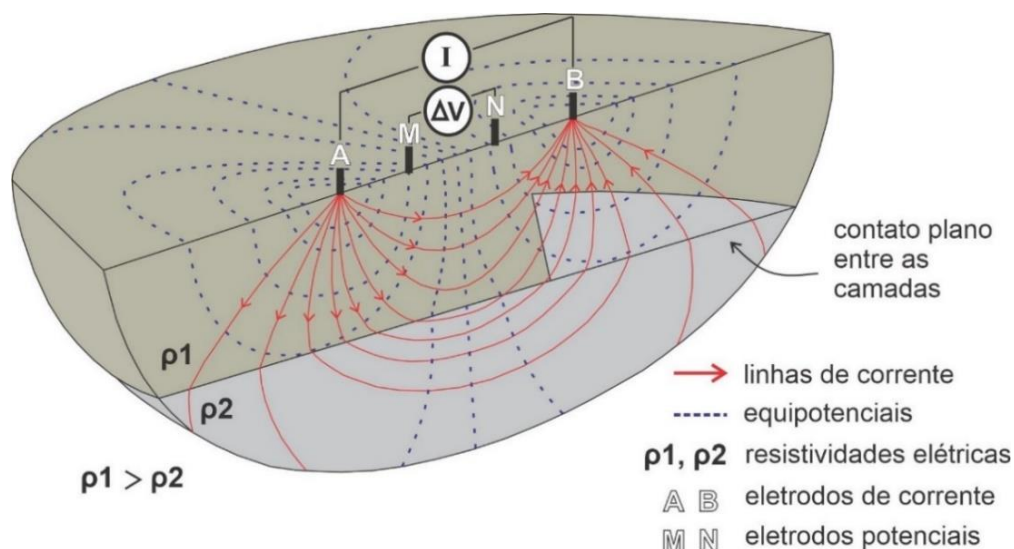
O desenvolvimento da teoria e prática da técnica de tomografia elétrica (em inglês, *Electrical Resistivity Tomography* - ERT) aconteceu nos últimos anos da década de 1980 e início dos anos de 1990. O conceito que fundamenta a técnica foi descrito pela primeira vez por Lytle e Dines a partir da junção de outra técnica elétrica já existente, a sondagem elétrica tradicional, introduzida pelos irmãos Schlumberger, e os novos métodos de inversão de dados da tomografia (DAILY et al., 2004).

A técnica de tomografia elétrica tem como objetivo imagear de maneira não destrutiva a subsuperfície através da obtenção de diferentes valores de resistividade

elétrica medidas na superfície. As diferenças de resistividade elétrica são obtidas a partir da injeção artificial de alta tensão de corrente alternada, baixa corrente e baixa frequência de potência (LOKE, 2000). Dessa maneira, são gerados seções e modelos dos valores de resistividade elétrica aparente da região subsuperficial investigada. A variação dos valores de resistividade elétrica em subsuperfície podem ser interpretados como alterações na porosidade, no conteúdo dos fluidos e ao grau de saturação do material em subsuperfície, por exemplo (KARATO & WANG, 2013).

A medição dos valores de resistividade elétrica aparente ocorrem a partir da instalação de sensores em subsuperfície, também conhecidos como eletrodos. Esses instrumentos são hastes metálicas dispostas de maneira ordenada e acoplada ao solo. A disposição e espaçamento dos eletrodos no solo é chamada de arranjo de eletrodos. Existem diferentes arranjos de eletrodos, cada qual com particularidades distintas de operação em campo. De maneira geral, um par de eletrodos (A e B), dito eletrodos de corrente, é responsável pela injeção de corrente elétrica no solo, e outros pares são responsáveis pela leitura das diferenças de potencial (M e N), dito eletrodos de potencial (Figura 51).

**Figura 51:** Propagação do campo elétrico em um meio tridimensional.



**Fonte:** modificado de Knödel et al. (2007).

Alguns arranjos geoeletricos são mais consagrados na literatura devido a vasta aplicação em diferentes estudos de investigações geofísicas. Entre os arranjos mais utilizados, podemos destacar: dipolo-dipolo, Wenner e Schlumberger (Figura 52). As principais diferenças técnicas entre os arranjos, e, motivos condicionantes para suas

escolhas ou não de acordo com os objetivos das investigações, são: o alcance em profundidade do arranjo e a capacidade ou não em manter uma boa resolução em níveis mais profundos, e boas resoluções no imageamento de elementos geológicos horizontais ou verticais (GANDOLFO, 2007; MOREIRA et al., 2016; 2019).

O arranjo dipolo-dipolo é constituído por dois dipolos formados pelos eletrodos de corrente em uma extremidade da linha de aquisição e eletrodos de potencial do outro lado, os quais são deslocados conforme ocorre o avanço das leituras. Os espaçamentos entre os pares de eletrodos de corrente e potencial são os mesmos. A distância entre os pares (AB) e (MN) pode ser calculada a partir do múltiplo inteiro ( $n$ ) da distância ( $a$ ) (Figura 52).

O arranjo Wenner é estruturado a partir da disposição dos dois eletrodos de corrente (A e B) nas extremidades do arranjo. A diferença de potencial é medida entre o par de eletrodos de potencial (M e N) instalados no centro da linha de aquisição. O espaçamento entre os eletrodos de potencial e corrente aumenta concomitantemente. As distâncias entre todos os eletrodos para cada medição são iguais e respeitadas (Figura 52).

O arranjo Schlumberger possui uma configuração semelhante ao arranjo Wenner. Os eletrodos de corrente (A e B) são instalados nas extremidades da linha de aquisição e é adotado um ponto central na linha da tomografia elétrica. O avanço das leituras e ganho de profundidade de investigação são realizados a partir do aumento do espaçamento ( $L$ ) entre os eletrodos de corrente. Entretanto, a distância entre os eletrodos de potencial (M e N) não são alteradas (Figura 52).

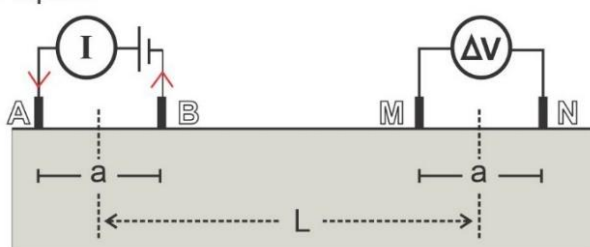
As variações nas disposições dos eletrodos em superfície resultam em características próprias dos arranjos geoeletricos. O arranjo dipolo-dipolo apresenta os melhores resultados em relação a resolução horizontal, porém profundidade de investigação mais rasa do que o arranjo Wenner (FURMAN et al., 2003; MOREIRA et al., 2016). Além disso, a relação sinal-ruído do arranjo dipolo-dipolo é menor e o número necessário de leituras para completar a aquisição é a maior entre os três arranjos apresentados (LOKE, 2003).

Em relação a profundidade de investigação, o arranjo Wenner possui um alcance moderado, entretanto, o uso desse arranjo é interesse em estudos que almejam obter boa resolução de estruturas geológicas horizontais em profundidade (MOREIRA et al., 2016; 2019). Outra característica desse arranjo é o fato dele exigir um número total de medições menor do que outros arranjos, dessa maneira o tempo

necessário para concluir a aquisição dos dados é comparativamente curta. Porém, menos informações do subsolo são obtidas quando comparado com outros arranjos geolétricos. O arranjo Schlumberger possui profundidade de investigação relativamente maior em comparação com arranjos de eletrodos mais simples. Esse aumento da profundidade de investigação está relacionado com a separação entre os eletrodos (SZALAI et al., 2011). Portanto, os arranjos Schlumberger e dipolo-dipolo são mais adequados para investigações em maiores profundidades em relação ao arranjo Wenner, que é mais eficaz em estudos superficiais (MOREIRA et al., 2016).

**Figura 52:** Esquema dos arranjos geolétricos.

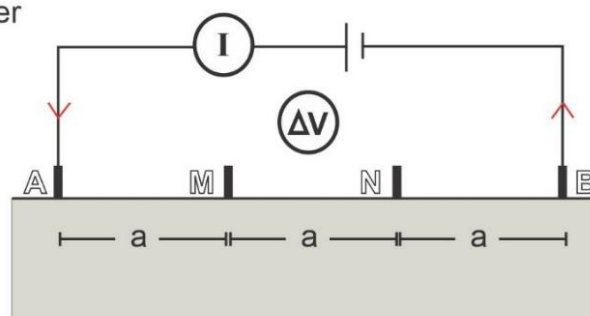
Dipolo-dipolo



$$\begin{aligned} r_{AM} &= L & r_{AN} &= L + a \\ r_{MB} &= L - a & r_{NB} &= L \end{aligned}$$

$$\rho_a = \pi \frac{V}{I} \frac{L(L^2 - a^2)}{a^2}$$

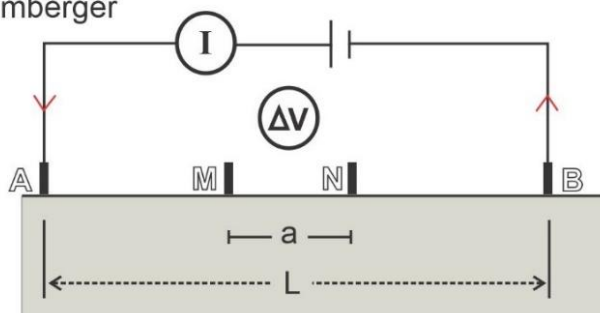
Wenner



$$\begin{aligned} r_{AM} &= a & r_{AN} &= 2a \\ r_{MB} &= 2a & r_{NB} &= a \end{aligned}$$

$$\rho_a = 2\pi \frac{V}{I} a$$

Schlumberger



$$\begin{aligned} r_{AM} &= \frac{L - a}{2} & r_{AN} &= r_{MB} \\ r_{MB} &= \frac{L + a}{2} & r_{NB} &= r_{AM} \end{aligned}$$

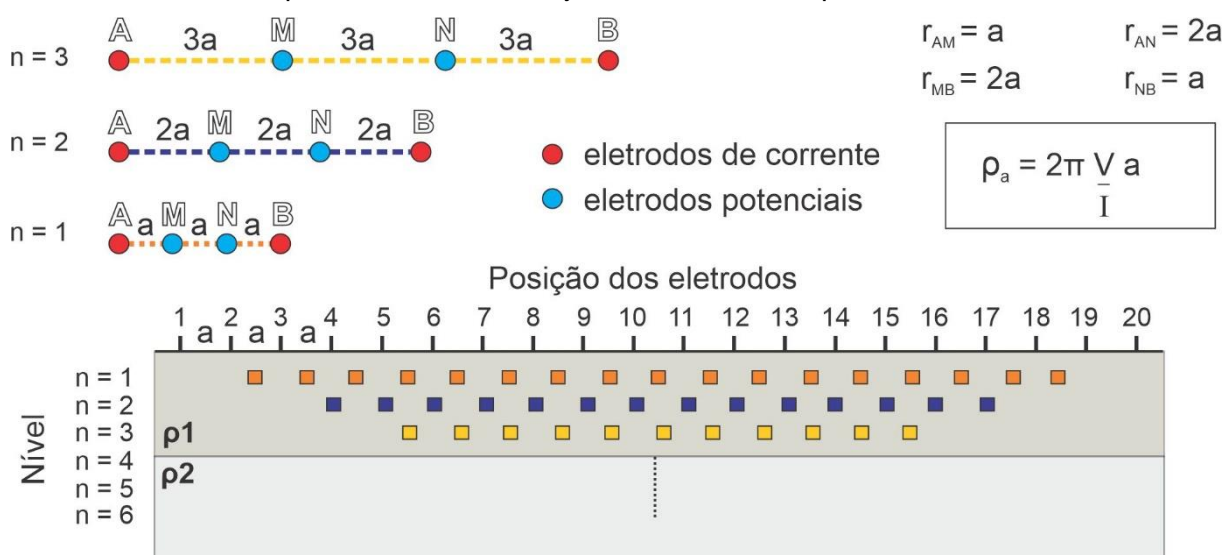
$$\rho_a = \frac{\pi V}{4 I} \frac{(L^2 - a^2)}{a}$$

**Fonte:** modificado de Lowrie, 2007.

A seção de tomografia elétrica é construída a partir da aquisição dos dados de resistividade elétrica aparente obtidos em campo com os diferentes arranjos geolétricos. A disposição dos eletrodos no solo é estabelecida de acordo com a configuração particular de cada arranjo e o ensaio consiste em avançar lateralmente

os eletrodos de corrente e potencial ao longo da linha de aquisição. A execução de leituras a partir do arranjo geoeletrico do tipo Wenner, por exemplo, é realizada através de dois eletrodos de corrente e dois eletrodos de potencial com espaçamento entre os eletrodos (Figura 53). O espaçamento entre os eletrodos de corrente define a profundidade da medição de resistividade aparente, ou seja, quanto maior o espaçamento entre estes eletrodos, maior será a profundidade de investigação (LOKE et al., 2003; LOWRIE, 2007).

**Figura 53:** Esquema de aquisição dos dados geoeletricos na técnica de tomografia elétrica a partir do uso do arranjo de eletrodos do tipo Wenner.



Fonte: modificado de Loke, 2018.

O presente trabalho utilizou os arranjos dipolo-dipolo e Schlumberger. Os critérios de escolha dos arranjos geoeletricos foram apresentados no tópico 8. AQUISIÇÕES DOS DADOS GEOFÍSICOS E MEDIDAS ESTRUTURAIS. Após realizadas as aquisições de dados em campo, os dados geoeletricos foram processados em softwares de inversão de dados. Essa etapa consiste em aplicar um algoritmo de inversão apropriado ao conjunto de dados de resistividade elétrica aparente obtidos a fim de determinar valores de resistividade elétrica específicos em uma seção tomográfica bidimensional ou tridimensional (LOKE et al., 2003).

Nos últimos anos, devido ao desenvolvimento da linguagem de programação em *python*, foram desenvolvidos interessantes softwares focados em inversão de dados geofísicos com diferentes bibliotecas de métodos geofísicos: sísmicos (GUEDES et al., 2022), elétricos (RÜCKER et al., 2017), eletromagnéticos (MATHER

& DELHAYE, 2019) e gravimétricos (COCKETT et al., 2015), por exemplo. No presente trabalho, os processamentos dos dados de resistividade elétrica foram realizados no software de código aberto ResIPy. O software foi desenvolvido em uma interface de programação de aplicações em linguagem python e faz uso de uma família de códigos R para inversão de dados de resistividade elétrica bidimensionais e tridimensionais, e polarização induzida desenvolvidas por BINLEY, (2015) (BEFUS, 2018; BLANCHY et al., 2020).

Estudos realizados em diferentes contextos geológicos, como em geologia ambiental, investigações geotécnicas e de engenharia, apresentam a capacidade do software em processar dados geoeletricos e ser uma interessante alternativa de código aberto para o processamento de dados em cenários complexos e robustos (DOYORO et al., 2022; MOREIRA et al., 2022). A família de códigos R fornece um conjunto de ferramentas robustas para modelagem e inversões de dados elétricos (BINLEY & KEMNA, 2005). Os códigos exigem a inserção de arquivos de texto de entrada para a geração da malha de elementos finitos, modelagem e inversão. No entanto, ResIPy possui uma interface gráfica do usuário, a qual facilita o usuário nas fases de pré e pós-processamento (BLANCHY et al., 2020). Dessa maneira, usuários não familiarizados com a linguagem de programação em *python* conseguem utilizar o software com certa facilidade.

### **7.3 FOTOGRAMETRIA DIGITAL APLICADA EM ESTUDOS GEOLÓGICOS**

O uso de fotografias aéreas tem papel importante no desenvolvimento da ciência conhecida como Sensoriamento Remoto (LILLESAND et al., 2015). Com exceção das fotografias digitais, as quais usam sensores eletrônicos e ainda assim foram enquadradas como uma técnica fotográfica de coleta digital de dados, todas as fotografias são classificadas como imagens quando detectadas e gravadas em filme. Enquanto que o termo imagens é reservado para qualquer representação pictórica de dados de imagem (SANTOS, 2020).

A manipulação de fotografias através de técnicas de processamentos ocorre a partir da aquisição de registros fotográficos por um sensor imageador. Os registros são realizados pelos sensores através da captação da energia eletromagnética da radiação de pequenas amostras da superfície. As amostras são chamadas de *pixels* e são convertidas em sinais elétricos de intensidade equivalente à radiação em cada

*pixel*. Por fim, em softwares dedicados, os *pixels* são filtrados em valores digitais dimensionados e convertidos em valores de brilho (tons de cinza, por exemplo) (MENESES & ALMEIDA, 2012; SANTOS 2020).

Nos últimos anos o desenvolvimento da indústria de plataformas aéreas não tripuladas com sensores de imageamento embarcados cresceu de maneira considerável em boa parte do mundo (JENSEN, 2009). No Brasil, as normas de operação de aeronaves não tripuladas remotamente pilotadas, também conhecidas popularmente como drones, são definidas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Pelo regulamento, os aeromodelos são as aeronaves não tripuladas remotamente pilotadas usadas para recreação e lazer e as aeronaves remotamente pilotadas (RPA) são as aeronaves não tripuladas utilizadas para outros fins como experimentais, comerciais ou institucionais (ANAC, 2017).

Nas últimas décadas, além do aumento no uso dos VANTs, foi observado uma diversificação nas áreas de aplicação da instrumentação (ABER et al., 2010). Inicialmente o uso era praticamente exclusivo para fins militares, com foco no reconhecimento de terrenos. Atualmente, diversas outras áreas do conhecimento, como engenharia (STEAD et al., 2019; JUNAID et al., 2022), biologia (NOWAK et al., 2018) e geociências (NESBIT et al., 2018; WANG et al., 2019; GUIRELI NETTO et al., 2023) já fizeram uso da metodologia para diferentes objetivos.

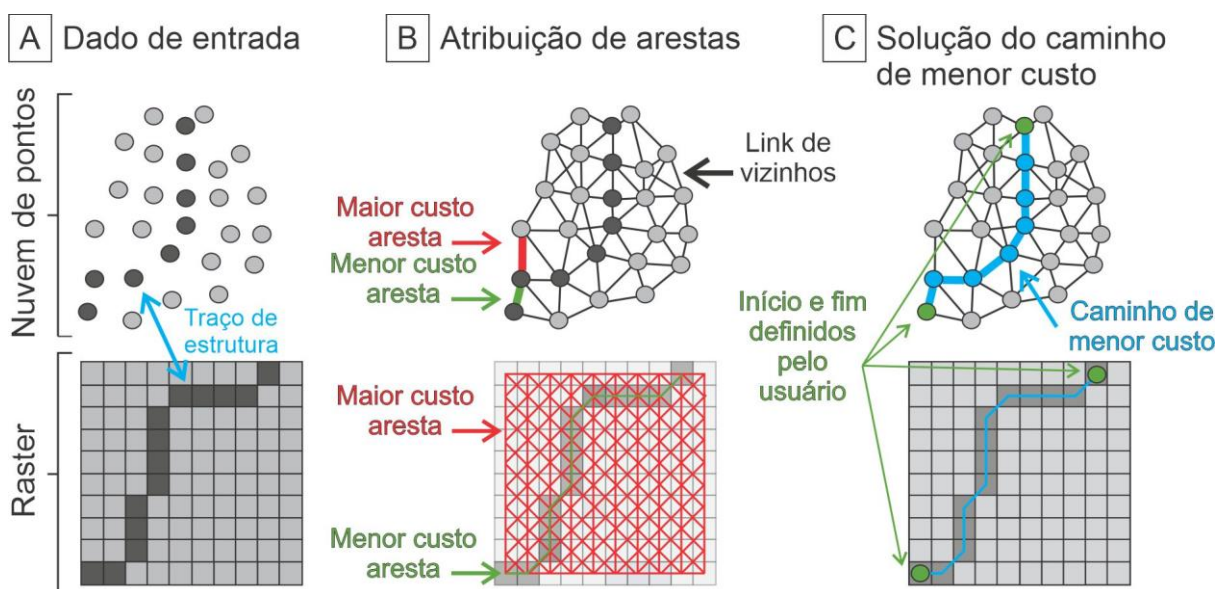
O uso da fotogrametria digital em estudos geológicos, especialmente para fins de mapeamento estrutural, é uma ferramenta interessante para obtenção de uma quantidade considerável de dados em um curto intervalo de tempo. Diferentemente das técnicas tradicionais de levantamento estrutural, realizadas manualmente com o uso de bússola magnética, a fotogrametria digital obtém uma boa área de cobertura a partir do processamento das fotografias (VIANA, 2021). Em alguns cenários geotécnicos que envolvem risco geológico, como taludes de antigas cavas de mineração abandonadas e áreas de movimentação de blocos de rocha, a realização da análise estrutural sem a necessidade de exposição humana ao afloramento pode ser uma interessante maneira de evitar acidentes (HARTWIG & MOREIRA, 2021).

A técnica de fotogrametria digital em estudos de análise estrutural é fundamentada no registro fotográfico com qualidade suficiente que permita um processamento das imagens e posterior extração das discontinuidades do maciço rochoso. Dessa maneira, a obtenção de imagens é uma etapa importante para um resultado de qualidade e deve ser realizada de acordo com critérios técnicos

(SALVINI et al., 2017). O processamento dos registros dos afloramentos é efetuado em softwares dedicados, cada qual com algoritmos distintos. Dentre os algoritmos, o algoritmo de caminho de menor custo (“*least-cost path*” em inglês) apresentou resultados interessantes na extração das discontinuidades presentes em maciços rochosos (THIELE et al., 2017; ALBARELLI et al., 2021).

O princípio básico da análise do caminho de menor custo é determinar as melhores rotas ou corredores de interação em um gráfico através da igualdade entre células e pares de células adjacentes com nós e arcos (Figura 54). A aplicação de algoritmos de caminho de menor custo é encontrada em diferentes áreas de estudos na literatura (MUNDELI & SHIRABE, 2019). Estudos de engenharia relacionados ao tráfego e mobilidade em rodovias e estradas (YU et al., 2003, SCAPARRA et al., 2014); determinação da infraestrutura em linhas de energia (MONTEIRO et al., 2005, BAGLI et al., 2011) e oleodutos (KANG & LEE, 2017). Estudos ambientais relativos a corredores de conservação da vida selvagem (CHETKIEWICZ & BOYCE, 2009, RAYFIELD et al., 2010).

**Figura 54:** Esquema do princípio da análise do caminho de menor custo.



**Fonte:** modificado de Thiele et al. (2017).

Os algoritmos já foram aplicados em outros estudos com o objetivo de identificar estruturas lineares em uma variedade de dados de imagem. Os resultados foram bastante satisfatórios e robustos mesmo em cenários com baixas relações sinal-ruído (THIELE et al., 2017). De maneira geral, o mapeamento estrutural de

maciços rochosos a partir da aplicação da fotogrametria digital consiste em fotografar o afloramento em diferentes pontos. As fotos são inseridas em softwares de processamento dedicados capazes de gerar uma nuvem de pontos a partir dos pixels da foto. O resultado é um modelo tridimensional com a disposição da nuvem de pontos, o qual é georreferenciado através de medidas de GPS diferencial. As ferramentas de extração de medidas estruturais presentes nos softwares fazem uso de algoritmos de least-cost path para determinar o posicionamento e orientação do elemento geológico em relação ao norte geográfico.

## **8. AQUISIÇÕES DOS DADOS GEOFÍSICOS E MEDIDAS ESTRUTURAIS**

As atividades de campo consistiram nas aquisições geofísicas, nos levantamentos de imagens com uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) e nas medidas a partir do uso de bússola. As aquisições dos dados ocorreram no período de seca na área de estudo em pontos estratégicos com foco nos objetivos propostos neste estudo.

Os procedimentos adotados nas aquisições dos dados foram apresentados de acordo com o método geofísico para cada área de estudo: barragem de armazenamento de rejeito de urânio e bacias de decantação de águas ácidas. Por fim, foi apresentada a localização do afloramento de maciço rochoso escolhido entre as áreas de estudo, onde foi realizado o levantamento fotográfico com uso do VANT e coletadas as medidas estruturais a partir de bússola.

### **8.1 AQUISIÇÕES DE DADOS SÍSMICOS**

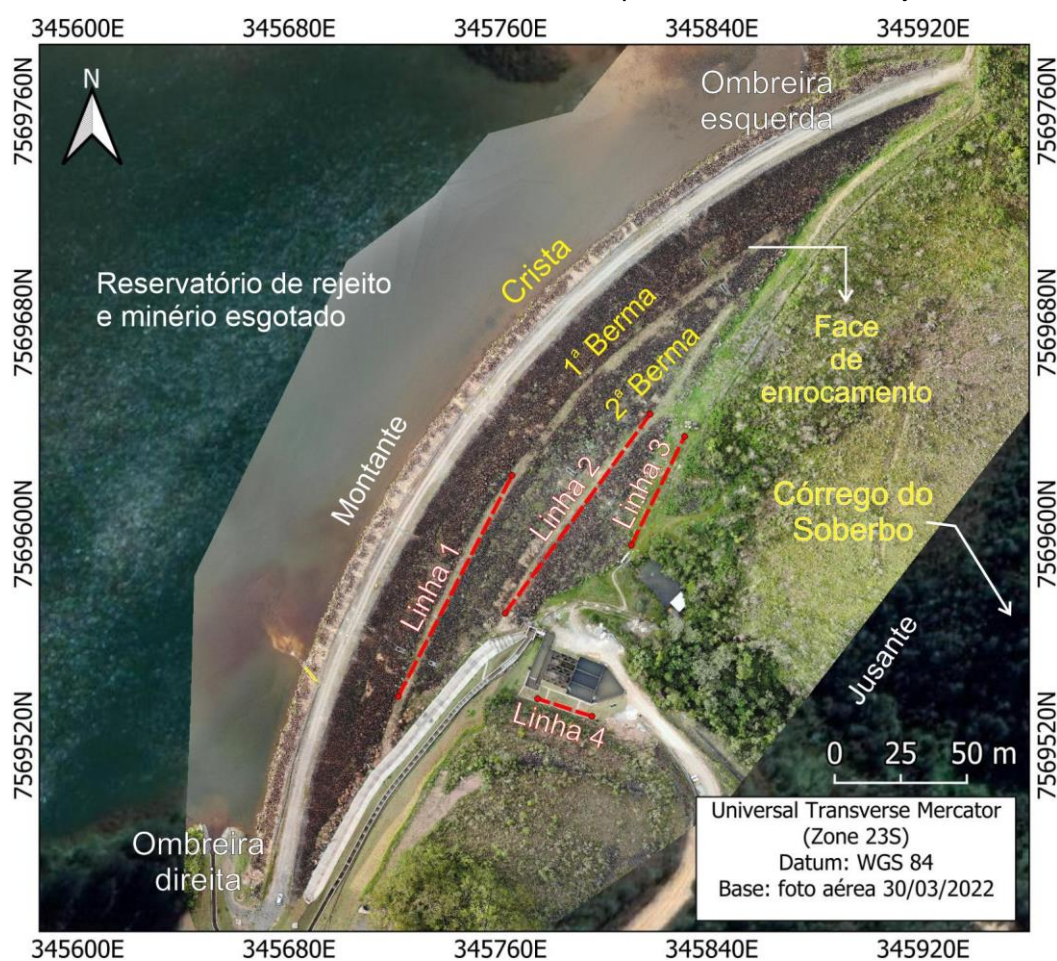
#### **8.1.1 BARRAGEM DE ARMAZENAMENTO DE REJEITO DE URÂNIO**

O posicionamento das linhas de aquisições de dados foi determinado de acordo com os objetivos do estudo e foram respeitadas as condições fisiográficas da área, as dimensões do maciço da barragem (área de cobertura) e questões de segurança. As barragens, especialmente as estruturas de médio e grande porte, possuem consideráveis ângulos de inclinação do talude de jusante, onde são realizadas as aquisições de dados. Linhas de aquisições perpendiculares à crista do barramento podem causar acidentes durante as atividades de campo devido à necessidade de mobilização da equipe. De maneira geral, foram coletados dados nas regiões da crista e, principalmente, na base do barramento.

Os levantamentos de sísmica de refração foram realizados na base do talude de jusante (próximo à ombreira esquerda e a zona de contato) e nas bermas do maciço, em base única. Os espaçamentos entre os geofones adotados foram de 4 metros nas linhas de aquisições das bermas, 2 metros na linha de aquisição da base do talude (em direção à ombreira esquerda) e 1 metro na linha de aquisição na região frontal, próximo a zona de contato entre o maciço e o relevo natural.

Cada linha de aquisição realizada nas bermas do maciço possui 92 metros de comprimento (Linhas 1 e 2), o que totaliza 184 metros de aquisições sísmicas nessa área (Figura 55). A linha de aquisição realizada na base do talude de jusante (Linha 3) possui metade do comprimento das linhas de aquisições realizadas na berma, com comprimento total de 46 metros. Isso ocorreu devido ao objetivo da investigação nesse local. Nessa área foram observados afloramentos próximos a base do barramento, os quais mostraram a presença de rocha neste ponto. Dessa maneira, foi escolhido um arranjo com menor espaçamento entre os geofones a fim de obter uma aquisição com mais detalhe (Linha 4).

**Figura 55:** Posição das linhas de aquisições sísmicas 1, 2, 3 e 4 com sentido NE-SW na barragem de rejeito de urânio. As linhas foram instaladas nas bermas do barramento, na base do barramento e em um afloramento próximo ao talude de jusante.



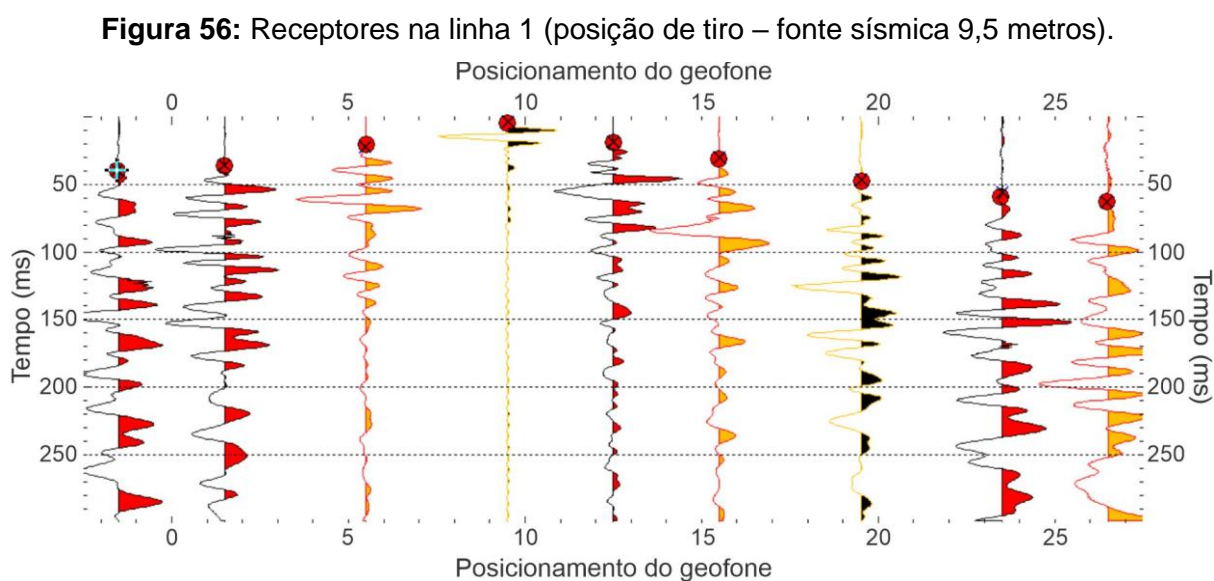
**Fonte:** elaborado pelo autor.

As características do arranjo (tamanho e posição das linhas) e o espaçamento entre os geofones foram escolhidos com o objetivo de realizar leituras ao longo de

toda a linha de aquisição, ou seja, em todos os pontos de tiros amostrados, os geofones mais distantes da fonte de emissão conseguiram registrar a chegada da onda sísmica (Figura 56).

Os espaçamentos entre os geofones foram os mesmos para as Linhas 2, 3 e 4. Na linha de aquisição da 1ª berma (Linha 1) foi utilizado espaçamento de 4 metros entre os sensores. Nas linhas de aquisições da 2ª berma (Linha 2), da base do talude (em direção à ombreira esquerda) (Linha 3) e região frontal (Linha 4), próximo a zona de contato entre o maciço e o relevo natural foi adotado o espaçamento de 1 metro entre os geofones.

Esse critério foi utilizado devido ao nível de profundidade de alcance do métodos. As linhas 2, 3 e 4 foram realizadas próximas ao nível do embasamento rochoso. Entretanto, a linha 1 foi realizada aproximadamente 20 metros acima do nível do embasamento rochoso da fundação do barramento. Dessa maneira, foi necessário utilizar uma linha de aquisição de maior comprimento a fim de tentar obter maior nível de investigação em profundidade (EVERETT, 2013).



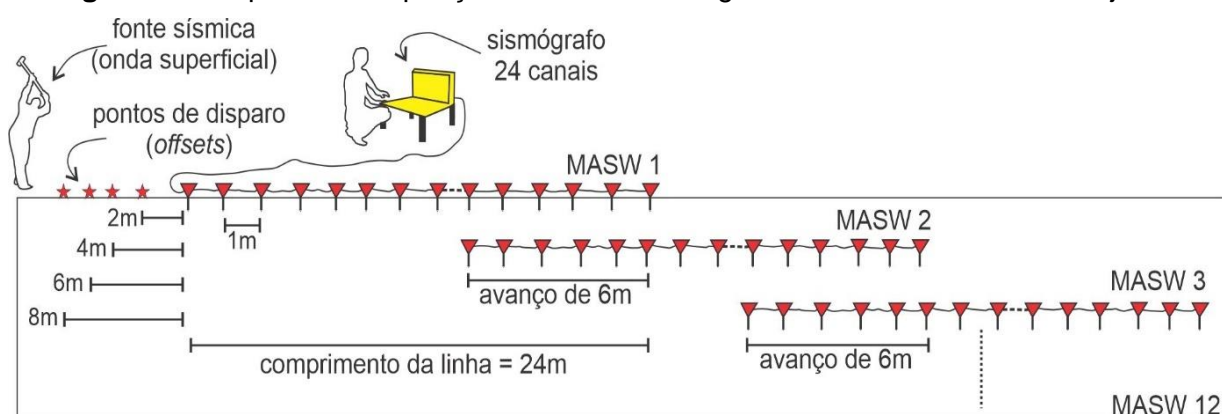
**Fontes:** dados da pesquisa.

O levantamento de MASW foi realizado na 2ª berma do talude de jusante. A linha foi disposta no mesmo posicionamento da linha de aquisição do método de sísmica de refração (Linha 2). Esse critério foi adotado a fim de correlacionar os resultados. Antes de iniciar a aquisição foi testado o princípio da heterogeneidade lateral, o qual consiste em realizar ensaios nas duas extremidades da linha de

aquisição a fim de garantir a ausência de significativas alterações no meio investigado (FOTI et al., 2018; EIKMEIER, 2018). Foram realizados 12 ensaios de MASW, sobrepostos nos últimos 6 geofones. Dessa maneira, foram gerados 12 perfis de MASW com espaçamento de 6 metros entre eles. O resultado foi uma seção MASW 2D de 66 metros. Foram utilizados offsets de 2, 4, 6 e 8 metros (Figura 57).

Ambas as aquisições das técnicas de tomografia de refração sísmica e MASW fizeram uso do sismógrafo Geode (Geometrics) de 24 canais. Uma vez que as ondas sísmicas possuem comportamentos e características distintas, como velocidade de propagação e amplitude diferentes, foram utilizadas configurações dedicadas para a aquisição de cada técnica sísmica (Tabela 10).

**Figura 57:** Esquema da aquisição MASW na barragem de armazenamento de rejeito.



**Fonte:** elaborado pelo autor.

**Tabela 10 -** Configurações das aquisições sísmicas na barragem de rejeito de urânio.

Método sísmico	Frequência dos Geofones (Hz)	Tipo de geofone	Espaçamento entre os geofones (m)	Intervalo de amostragem (ms)
Refração sísmica	10	Vertical	4	0,5
MASW	4,5	Vertical	1 e 4	0,5

### 8.1.2 BACIAS DE DECANTAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

Nas bacias de contenção de águas ácidas (D1 e D2), o posicionamento das linhas de aquisições de dados foi determinado de acordo com as condições fisiográficas da área e o objetivo da investigação: identificar alterações nos parâmetros físico-químicos do material geológico que pudessem ser interpretados como possíveis

zonas de percolação do material do reservatório. Uma vez que as duas bacias estavam instaladas paralelamente em cotas topográficas diferentes, as linhas de aquisições foram dispostas na região central da face lateral das estruturas de armazenamento de maneira perpendicular a possíveis zonas de vazamentos e/ou fluxos subterrâneos nas regiões entre as bacias e o Córrego do Soberbo (Figura 58).

**Figura 58:** Posição das linhas de aquisições sísmicas nas bacias de decantação D1 e D2.



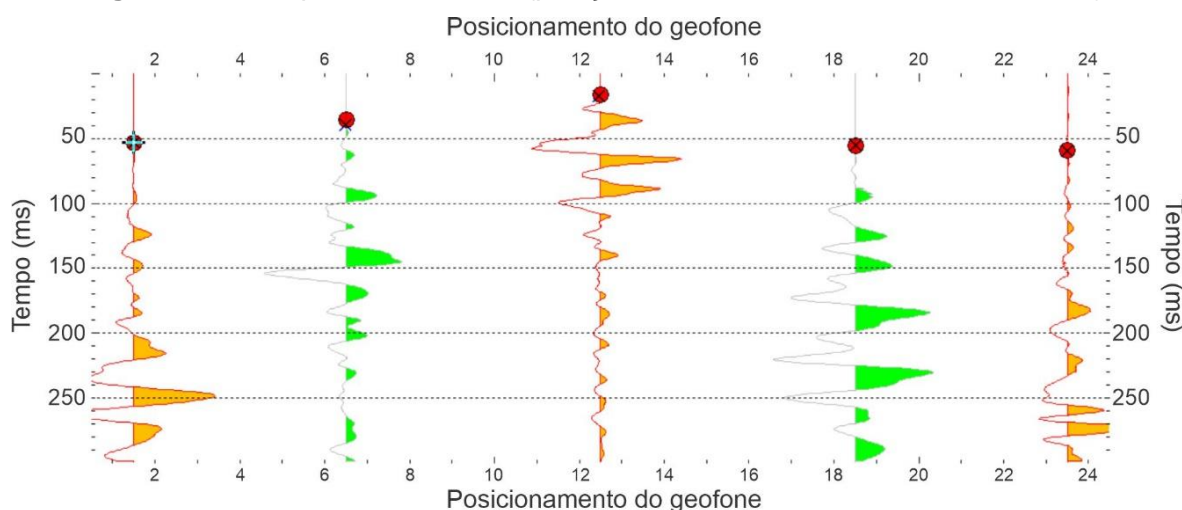
**Fonte:** elaborado pelo autor.

Os levantamentos de dados sísmicos foram realizados na berma de solo compactado que separa as duas bacias de contenção de águas ácidas D1 e D2, e no corpo de também solo compactado da bacia D2. Dessa maneira foi possível cobrir boa parte da área do corpo das estruturas. Devido ao contexto fisiográfico da área, como o objetivo da aquisição era identificar possíveis zonas de alteração da integridade física relacionadas ao carregamento de material por conta de um possível fluxo de água ácida no interior do corpo da bacia, as linhas foram dispostas paralelamente em sentido NW-SE (Figura 58).

Ambas as linhas (Linhas 5 e 6) possuem 92 metros de comprimento e foram executadas a partir do mesmo espaçamento de 4 metros entre os geofones tanto para a aquisição de tomografia de refração sísmica como para a análise multicanal de ondas superficiais. Como já mencionado, o ensaio foi realizado no período de seca. Dessa maneira, o nível do reservatório estava abaixo da capacidade máxima e a inspeção visual das duas estruturas permitiu identificar a presença de rocha com diferentes níveis de fraturamento sob o solo compactado.

O posicionamento e comprimento da Linha 5 permitiu investigar boa parte do material compactado responsável por separar as duas bacias de contenção de águas ácidas. Foi realizado um teste antes de iniciar as aquisições para garantir que todos os geofones recebessem as ondas sísmicas artificialmente induzidas (Figura 59). A Linha 6, posicionada paralelamente ao corpo da bacia de contenção D2 e ao córrego do Soberbo, tem papel fundamental na identificação de anomalias que possam ser interpretadas como avarias na integridade física da estrutura. Possíveis vazamentos e fluxos subterrâneos de água ácida nesse ponto podem acarretar em contaminações na área externa a mineração.

**Figura 59:** Receptores na linha 5 (posição de tiro – fonte sísmica 12,5 metros).

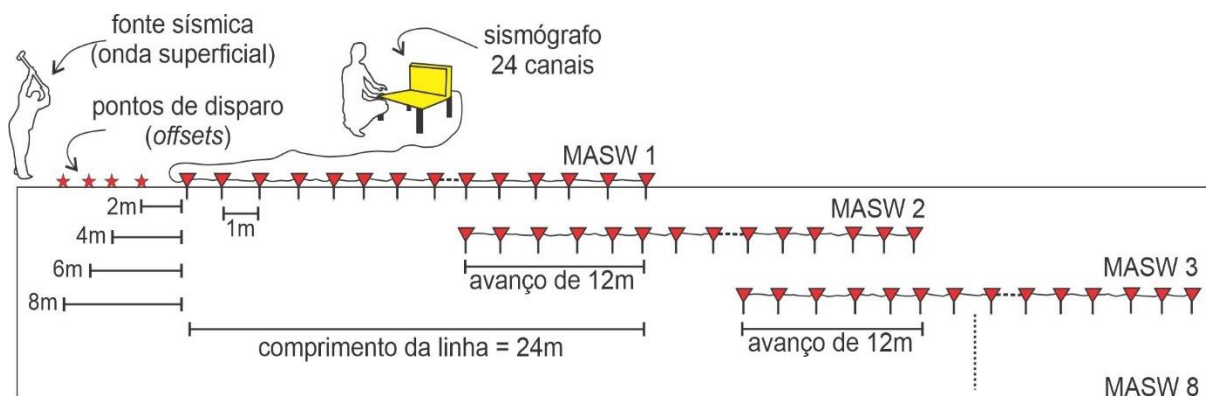


**Fonte:** dados da pesquisa.

Os levantamentos de MASW foram realizados de forma sobrepostos as linhas de aquisições do método de sísmica de refração. Esse critério foi adotado a fim de correlacionar os resultados. Em ambas as linhas de aquisições, dispostas nas bermas de solo compactado que separa as duas bacias de contenção de águas ácidas D1 e D2, e no corpo de também solo compactado da bacia D2, foram utilizados o mesmo

espaçamento de geofones de 1 metro. Foram realizados 8 ensaios de MASW em cada uma das linhas, sobrepostos nos últimos 12 geofones. Dessa maneira, foram gerados 8 perfis de MASW com espaçamento de 12 metros entre eles. O resultado foi uma seção MASW 2D de 88 metros. Foram utilizados offsets de 2, 4, 6 e 8 metros (Figura 60).

**Figura 60:** Esquema da aquisição MASW nas bacias de decantação de água ácida.



**Fonte:** elaborado pelo autor.

As ondas sísmicas foram geradas a partir do golpe de marreta sísmica em placa de ferro. As aquisições das técnicas de tomografia de refração sísmica e análise multicanal de ondas superficiais fizeram uso do sismógrafo Geode (Geometrics) de 24 canais e as configurações dedicadas para a aquisição de cada técnica sísmica estão apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11 -** Configurações das aquisições sísmicas nas bacias de decantação.

Método sísmico	Frequência dos Geofones (Hz)	Tipo de geofone	Espaçamento entre os geofones (m)	Intervalo de amostragem (ms)
Refração sísmica	10	Vertical	4	0,5
MASW	4,5	Vertical	1	0,5

## 8.2 AQUISIÇÕES DOS DADOS GEOELÉTRICOS

### 8.2.1 BARRAGEM DE ARMAZENAMENTO DE REJEITO DE URÂNIO

Os levantamentos de dados geoeletricos foram realizados na crista do barramento e nas bermas do maciço de jusante a partir da execução de 4 linhas de aquisições. Em ambos os casos foi utilizada a técnica de aquisição de dados elétricos do caminhamento elétrico e arranjo geoeletrico do tipo Schlumberger. O arranjo foi definido graças aos diversos estudos ambientais e geotécnicos que apresentaram bons resultados na modelagem de estruturas tridimensionais verticalizadas de baixa resistividade elétrica, como era esperado no caso das fraturas preenchidas por água na área de estudo (LOKE, 2003; MOREIRA et al., 2016). O equipamento utilizado foi o resistivímetro ABEM Terrameter LS (84 canais, 250W, com uma resolução de 1  $\mu\text{V}$  e uma corrente máxima de 2,5A) (ABEM 2012).

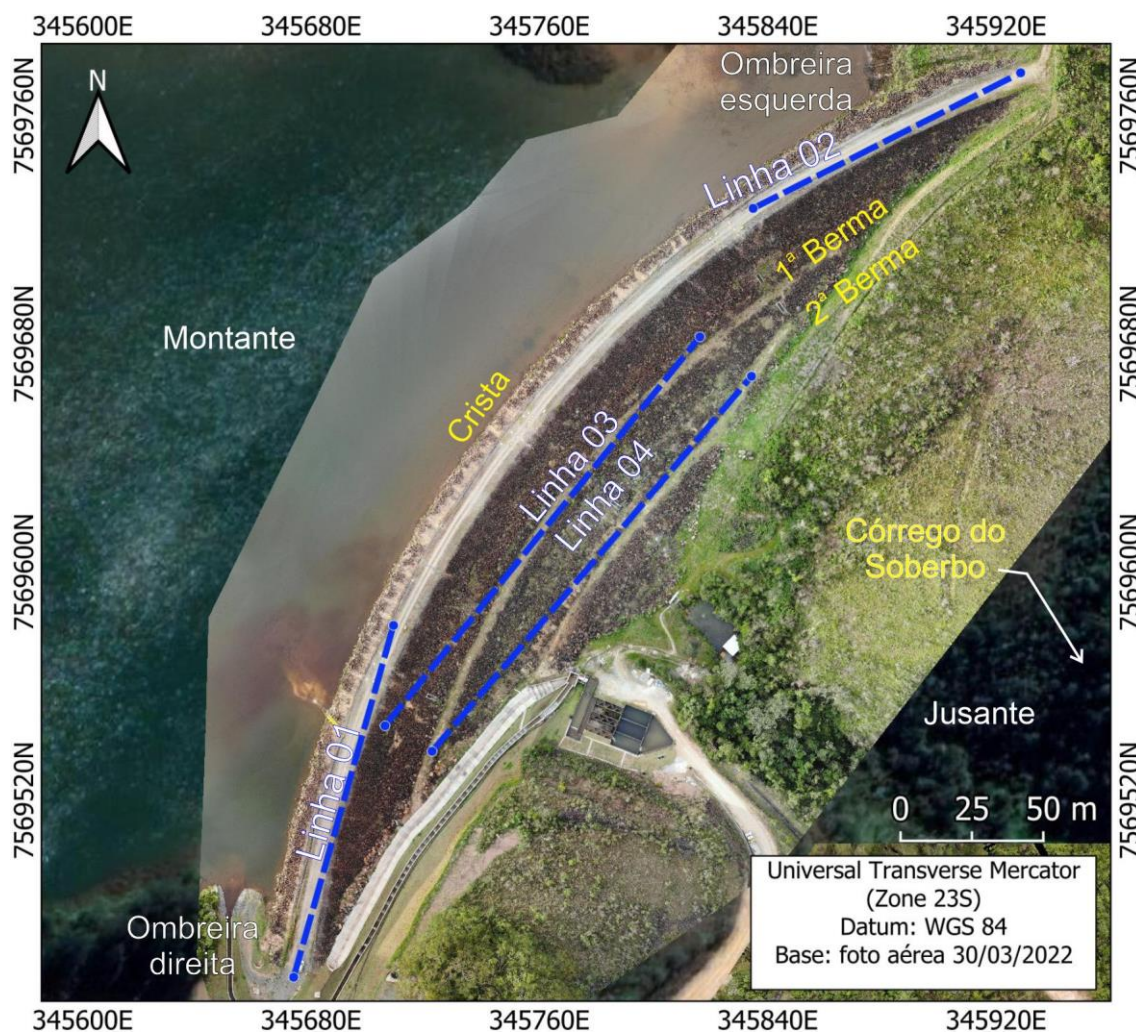
A escolha do posicionamento das linhas levou em consideração o nível de profundidade do maciço rochoso fraturado da fundação do barramento, disposto aproximadamente na cota topográfica de 1270 metros. De acordo com a seção típica do barramento, o maciço rochoso estava disposto a aproximadamente 20 metros de profundidade em relação a 1ª berma, 10 metros de profundidade em relação a 2ª berma e 35 metros de profundidade em relação a crista do barramento (ver Figura 19 do tópico 5.1 CARACTERIZAÇÕES DOS EMPREENDIMENTOS MINEIROS). Neste caso, as linhas de aquisições dispostas na crista do barramento necessitaram de grandes comprimentos para atingir a profundidade do maciço rochoso da fundação.

As linhas de aquisições realizadas na crista do barramento (Linhas 01 e 02) foram instaladas de maneira retílinea e respeitaram o eixo de curvatura do maciço. As linhas foram dispostas próximas as ombreiras direita e esquerda, respectivamente, e ambas as linhas possuem 114 metros de comprimento. O posicionamento das duas linhas de aquisições cobriu boa parte da região da crista do barramento e também do contato entre o maciço e o relevo natural. Essa região é de interesse em estudos de engenharia de barragem, pois muitas vezes podem apresentar pontos de fluxo d'água subterrânea na zona de contato (Figura 61).

As linhas 03 e 04 foram realizadas nas duas bermas do talude de jusante. A linha de aquisição 03, disposta na 1ª berma, possui distância vertical de 14 metros em relação a linha de aquisição 04, disposta na 2ª berma. Em ambas as linhas foram

utilizados 2 cabos de 21 eletrodos, espaçamento de 6 metros entre os eletrodos e comprimento total de cada linha de 230 metros. As linhas são paralelas entre si e em ambos os casos foram orientadas no sentido SW-NE (Figura 61).

**Figura 61:** Posição das linhas de aquisições geolétricas na barragem.



Fonte: elaborado pelo autor.

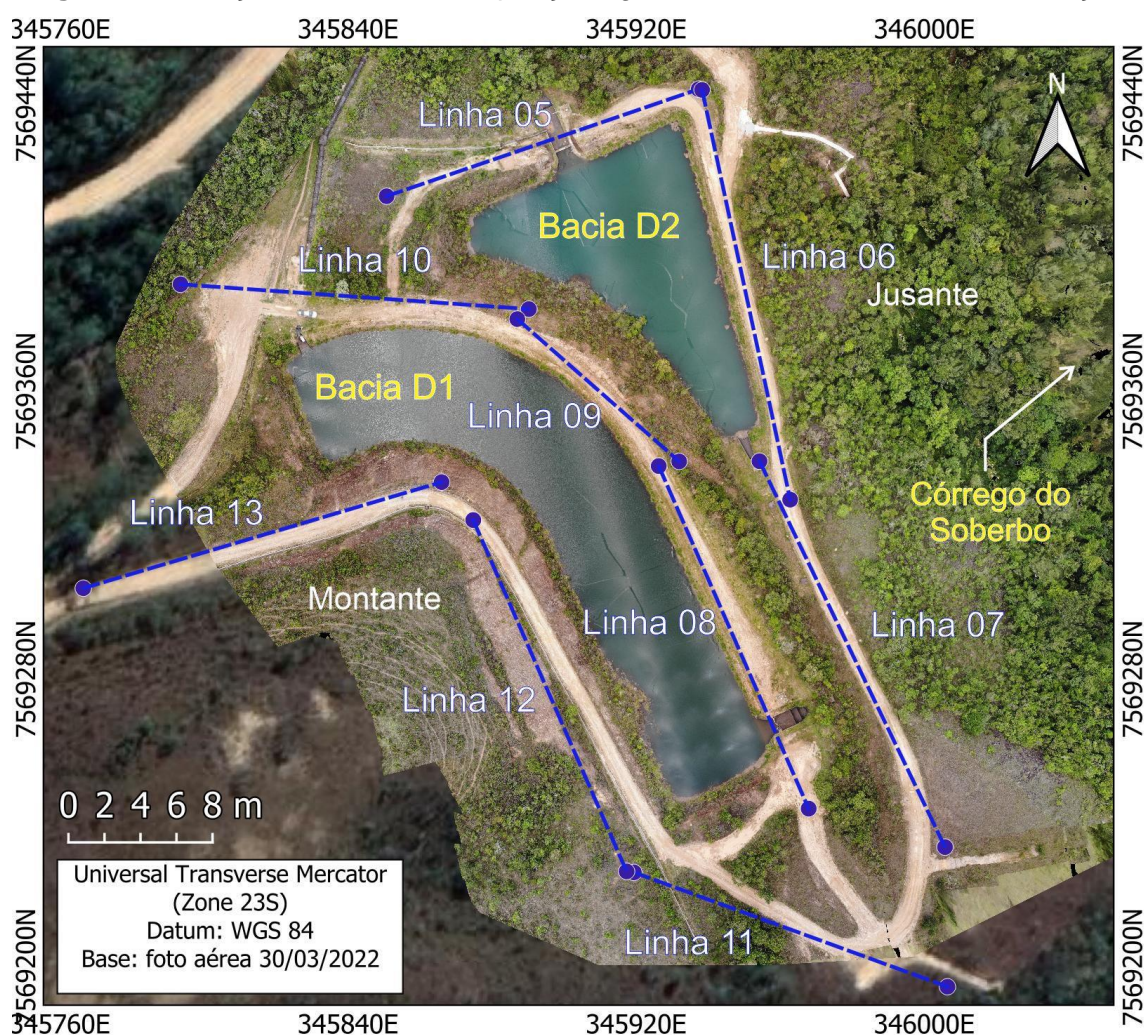
### 8.2.2 BACIAS DE DECANTAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

Os levantamentos de dados geolétricos foram realizados ao redor e entre as bacias de contenção de águas ácidas. Dessa maneira, o posicionamento das linhas de tomografia elétrica permitiu a geração de uma malha de aquisição de dados robusta. Através de investigações geolétricas nas laterais de ambos os reservatórios, nas cristas do aterro compactado e do relevo natural localizado topograficamente mais elevado do que o posicionamento das bacias, as aquisições tinham como objetivo

identificar possíveis cenários de fluxo de água ácida oriundo dos reservatórios, principalmente no maciço rochoso fraturado da fundação das estruturas de armazenamento.

Foi utilizada a técnica de aquisição de dados elétricos do caminhamento elétrico. As linhas foram executadas a partir de dois arranjos elétricos: dipolo-dipolo e Schlumberger. Em estudos de investigações geolétricas é desejável o uso de diferentes arranjos elétricos, uma vez que um fator limitante de um determinado arranjo, como boa resolução lateral, pode ser suprida pelo outro arranjo (LOKE, 2003; MOREIRA et al., 2016). No total foram realizadas 9 linhas de aquisições na área das bacias de decantação D1 e D2. O espaçamento entre os eletrodos utilizados foi de 5 metros (Figura 62). Assim como na aquisição da barragem de rejeitos, foi utilizado o resistivímetro ABEM Terrameter LS (ABEM 2012).

**Figura 62:** Posição das linhas de aquisições geolétricas nas bacias de decantação.



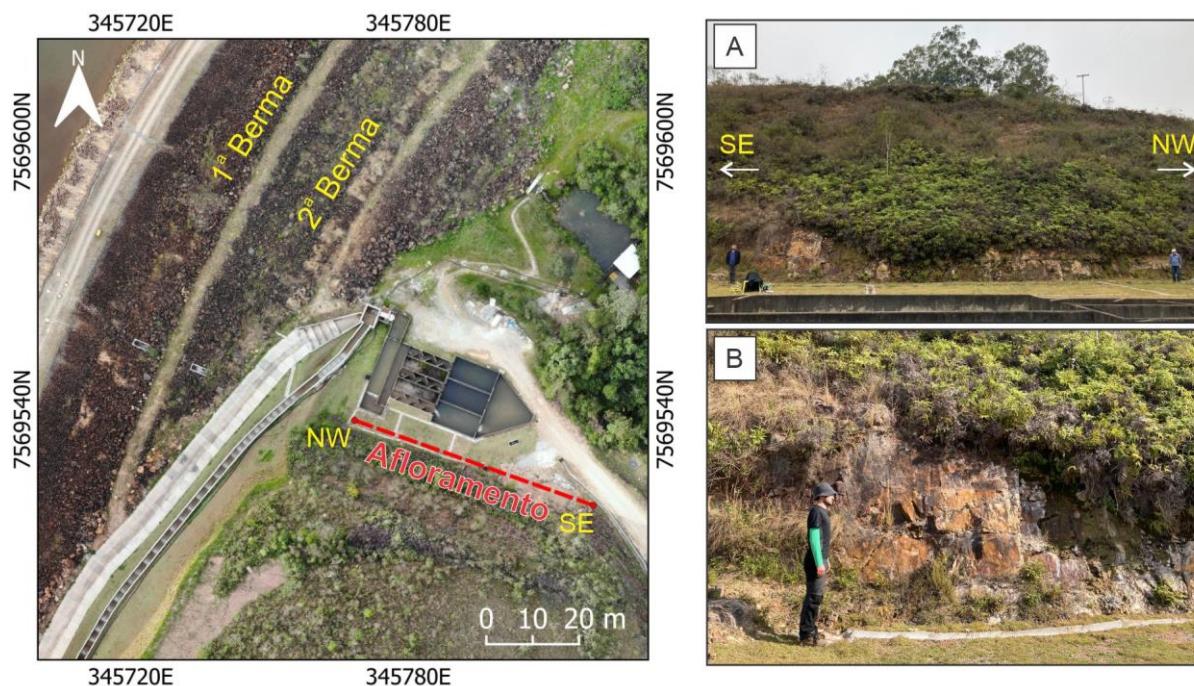
Fonte: elaborado pelo autor.

### 8.3 AQUISIÇÕES DE DADOS ESTRUTURAIS

Os dados estruturais foram coletados em um afloramento localizado próximo a região da base da barragem de armazenamento de rejeito de urânio (Figura 63A). O afloramento possui aproximadamente 60 metros de comprimento e 4 metros de altura e foi escolhido por apresentar o maciço rochoso condicionado pelo comportamento estrutural, ou seja, alto grau de fraturamento. A rocha, exposta ao intemperismo físico-químico, apresentava fraturamento bem-marcado em ângulos de mergulho sub-horizontais e verticais (Figura 63B).

As medidas estruturais foram coletadas a partir de levantamento tradicional com o uso de uma bússola de estrato Clar e veículo aéreo não tripulado (popularmente chamado de drone). O objetivo na aplicação das duas técnicas para aquisições das orientações de fraturas e falhas era comparar a viabilidade e limitações de uma coleta indireta de dados com uma metodologia já consagrada em diversos estudos geológico-geotécnicos de mapeamento estrutural de maciços fraturados (SALVINI et al., 2017, ALBARELLI et al., 2021, JUNAID et al., 2022).

**Figura 63:** Localização do afloramento utilizado para aquisições de dados estruturais. a) Vista frontal do afloramento. b) Afloramento em detalhe (homem em escala: 1,77 metros).



**Fonte:** dados da pesquisa.

### 8.3.1 MEDIDAS ESTRUTURAIS COM BÚSSOLA

As medidas de bússola foram realizadas ao longo de todo o afloramento em diferentes pontos (Figura 64). Foi utilizada uma bússola de estrato Clar, modelo GEKOM-PRO, produzida pela empresa alemã Breithaupt. Para cada parâmetro analisado (fraturas F1, fraturas F2, etc.) foram realizadas 20 coletas. Devido às dimensões do afloramento e o número de amostras espalhadas ao longo do maciço rochoso era esperado obter uma amostragem representativa do comportamento estrutural desse ponto de estudo.

**Figura 64:** a) medida estrutural com bússola em detalhe; b) dimensão do afloramento; c) maciço rochoso fraturado em detalhe (bússola em escala).



**Fonte:** dados da pesquisa.

### 8.3.2 MEDIDAS ESTRUTURAIS COM VANT

O levantamento fotogramétrico foi realizado com o drone Mavic Air, modelo CP.PT.00000165.01, produzido pela empresa chinesa DJI. As especificações técnicas do drone são apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12** - Especificações técnicas drone Mavic Air.

<b>Categoria</b>	<b>Câmera RGB</b>
Sensor	Pixels Efetivos CMOS de 1 / 2,3: 12 MP
Lentes	FOV: 85 ° / 35 mm Formato Equivalente: 24 mm / Abertura: f / 2.8 / Alcance de Disparo: 0.5 ma 8.
ISO Range	100 - 3200 (manual - para fotos)
Tamanho da imagem	4056 x 3040 pixels
Formato da imagem	JPEG / DNG (RAW)
Sistema de posicionamento por satélite	GPS/GLONASS

### 8.3.2.1 AQUISIÇÃO DE IMAGENS COM VANT

Foram realizados dois voos de aproximadamente 15 minutos cada para registro fotográfico total do afloramento em diferentes ângulos. No total, 108 imagens foram registradas. Os critérios utilizados como controle de qualidade durante os levantamentos de drone foram:

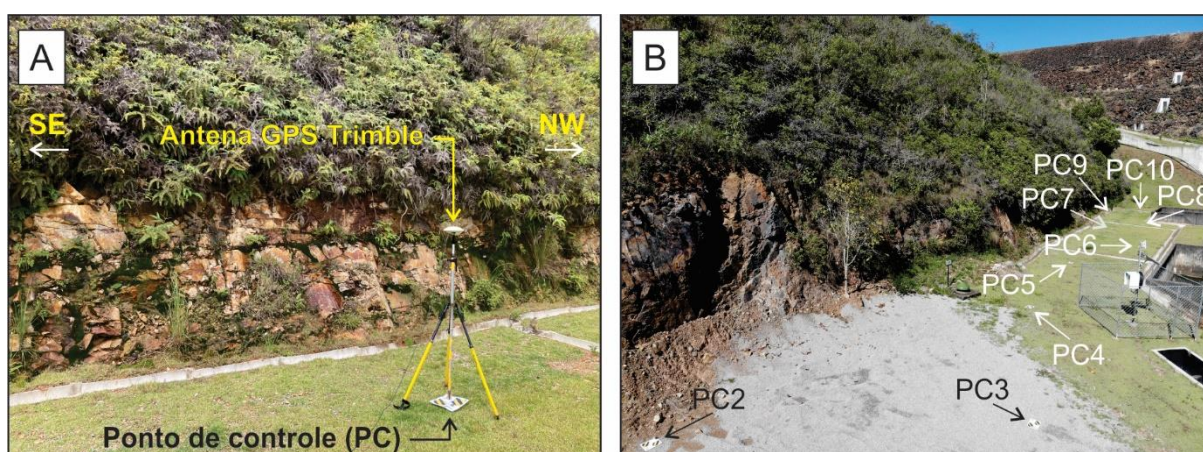
1. As fotos foram tiradas com o drone estabilizado no ar e não em movimento, a fim de evitar imagens distorcidas;
2. Foram registradas fotos oblíquas do afloramento, com diferentes visadas para capturar a mesma feição em fotos diferentes e evitar porções não imageadas (oclusão);
3. Em teoria, quanto mais próximo do afloramento for tirada a foto, mais detalhes serão visíveis no modelo 3D a ser construído e, portanto, melhor a extração de dados estruturais. De maneira geral, os registros mais próximos ao afloramento fizeram uso do sensor de aproximação do drone, o qual limita a aproximação do equipamento em 2 metros do objeto de colisão;
4. As fotos do afloramento foram registradas em uma rodada única, por exemplo, por 30 minutos ou 1 hora consecutivos, para evitar diferenças de luminosidade e sombras em períodos diferentes do dia;
5. Os registros fotográficos foram realizados com tempo ensolarado, a fim de evitar sombras no afloramento recorrentes em dias nublados;
6. As fotos foram descarregadas no computador à noite para verificar a qualidade do voo. Caso fosse preciso, o registro poderia ser realizado novamente no dia seguinte.

O sistema de georreferenciamento a bordo do VANT forneceu imagens georreferenciadas no sistema de coordenadas WGS 84. Essas imagens permitiram a reconstrução de um modelo 3D orientado. Apesar de possuir um sistema de georreferenciamento com precisão na escala métrica, devido ao objetivo do estudo, os quais dependem diretamente de um georreferenciamento preciso, foram realizadas medidas em 10 pontos de controle (PC) através de um GPS diferencial (Figura 65A).

O posicionamento dos pontos de controle não foi definido de forma aleatória, os seguintes critérios foram utilizados:

1. Não foram utilizadas feições naturais do terreno como PC. Os pontos de controle adotado foram marcos impresso em folha A4 para posicionamento da antena de GPS;
2. Os PC's não foram posicionados alinhados. Os 10 pontos foram bem distribuídos e espaçados uns dos outros (Figura 65B);
3. As fotos tiradas dos pontos de controle levaram em consideração o arredor do ponto (pouco zoom). Esse procedimento ajuda na identificação dos mesmos na etapa de georreferenciamento do modelo no software fotogramétrico;
4. Como os pontos de controle precisam aparecer nas imagens tiradas pelo drone, foi necessário tirar fotos mais afastadas do afloramento para garantir que os PC's fossem registrados.

**Figura 65:** a) aquisição do GPS digital; b) pontos de controle (PC).



**Fonte:** dados do autor.

O GPS Trimble Pathfinder 85340-00 foi usado para adquirir as coordenadas dos pontos de controle através de medições de posicionamento absoluto no modo estático durante 5 minutos para cada ponto. Posteriormente, as coordenadas dos PC's

foram pós-processadas para aumentar sua precisão a partir do serviço online gratuito fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Este serviço utiliza o programa Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) desenvolvido pela Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada no qual as coordenadas finais pós-processadas são referenciadas ao SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) e ao Quadro de Referência Terrestre Internacional (ITRF). As coordenadas pós-processadas dos pontos de controles variaram de 0,80 metros a 2,20 metros de precisão para a posição planimétrica (x, y) e de 1,92 metros a 4,55 metros de precisão na posição altimétrica (y).

## **9. PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS E DE FOTOGRAMETRIA DIGITAL**

O processamento dos dados coletados no presente trabalho consistiu em realizar procedimentos de inversões geofísicas e reconstrução do modelo digital 3D do afloramento para extração das medidas estruturais. Ambos os procedimentos foram realizados em softwares dedicados. Em relação aos métodos geofísicos, foram utilizados os mesmos procedimentos para inversão dos dados das duas áreas de estudo. Dessa maneira, os processamentos foram apresentados de acordo com a técnica geofísica utilizada e os resultados obtidos para cada área investigada. Por fim, foram apresentadas as etapas e os critérios adotados para execução da fotogrametria digital do afloramento localizado entre os empreendimentos mineiros estudados.

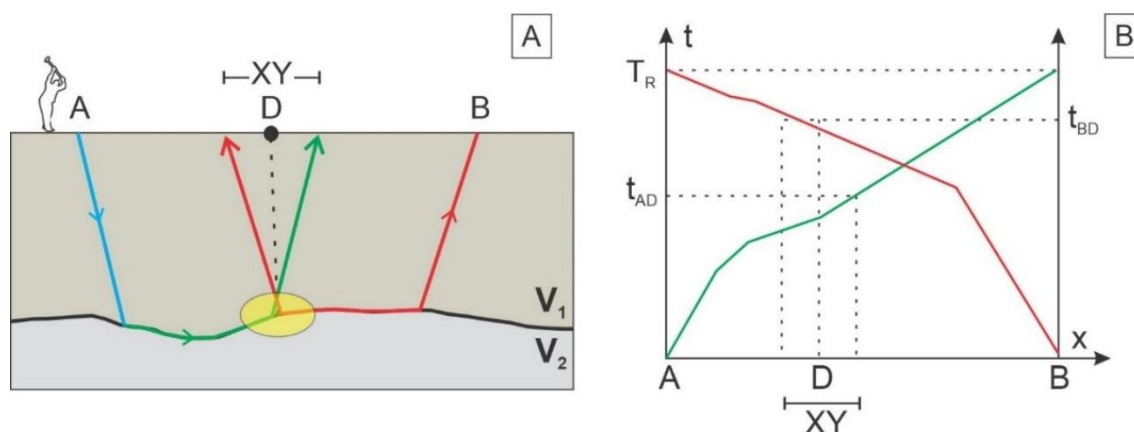
### **9.1 TOMOGRAFIA DE REFRAÇÃO SÍSMICA (SRT – SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY)**

Após realizados os levantamentos de dados sísmicos de refração da onda P em campo, os dados foram armazenados no sismógrafo e posteriormente foram realizadas inversões sísmicas a partir de algoritmos dedicados. No presente trabalho, os dados de sísmica de refração foram processados no software Rayfract (by Intelligent Resources Inc.). O software possui uma série de aplicações em estudos de processamentos sísmicos de alta cobertura (LECOMTE et al., 2000, CHEN et al., 2017, BUTCHIBABU et al., 2021). A robustez do software foi comprovada em estudos recentes que obtiveram resultados positivos no uso do software em processamentos para mapeamento estrutural de maciços rochosos através da técnica de sísmica de refração (BENJUMEA et al., 2021, GRANJA-BRUÑA et al., 2021).

O processamento da tomografia de refração sísmica do software Rayfract utiliza o método de inversão Wavepath Eikonal Traveltime (WET) de Schuster e Quintus-Bosz (1993). As equações de inversão WET usam a abordagem de volume de fresnel para modelar a propagação da energia de primeira quebra de uma maneira fisicamente significativa (ZELT et al., 2013) e pode ser considerada uma versão otimizada do algoritmo do Generalized Reciprocal Method (GRM) proposto por Palmer (1981).

O GRM foi desenvolvido para determinar mudanças laterais na velocidade do refrator e obter uma seção transversal do refrator migrado para sua posição correta no espaço (Figura 66A). O algoritmo auxiliou a evolução do método de sísmica de refração para atingir a sofisticação necessária para lidar com os problemas geológicos encontrados em águas subterrâneas e estudos de engenharia (LANKSTON, 1990; ZELT et al., 2013). Ao invés de usar uma separação constante do receptor fornecida pelo usuário ao longo do perfil, o método WET estima automaticamente a separação do receptor local em cada geofone a partir dos ângulos das ondas direta e reversa (Figura 66B) (AK, 2006; LECOMTE et al., 2000). Assim, a separação dos receptores obtidos pode variar lateralmente ao longo do perfil, o que explica o sucesso de estudos em topografias relativamente acentuadas (CAPIZZI & MARTORANA, 2014, TOMÁS et al., 2018).

**Figura 66:** a) Migração da posição correta no espaço do refrator; b) Separação do receptor local em cada geofone a partir dos ângulos das ondas direta e indireta.



**Fonte:** modificado de Ak, 2006.

A partir de uma equação de velocidade de onda (Eq. 26), o método realiza a conversão dos dados de unidades de tempo para unidades de distância. As distâncias são calculadas a partir dos valores de velocidade e tempo. Posteriormente, o ponto de profundidade deve ser migrado abaixo de um ponto em superfície, ou seja, de um ponto onde um geofone está posicionado, para sua posição correta no espaço (PALMER, 1980; LANKSTON, 1990; ROHDEWALD, 2011).

$$t_G = \frac{(t_{AY} + t_{BX} - t_{AB} - \frac{XY}{v_n})}{2} \quad (26)$$

onde  $t_G$  é a profundidade temporal generalizada na interpretação da refração sísmica e  $V_n$  é a velocidade aparente determinada a partir da função de velocidade. O valor da função da Eq. 26 é referente a G, que está posicionado entre X e Y. A inversão da  $V_n'$  obtida por um refrator pode ser definida como a inclinação de uma linha ajustada aos valores de  $t_G$  para a melhor posição XY obtida. O melhor posicionamento XY é um ponto comum entre as ondas diretas e refratadas no refrator. Quando  $V_n$  é a velocidade real do refrator e  $\theta_{n-1}$  é o ângulo de mergulho do refrator, pode tomar  $V_n'$  como a velocidade real do refrator na maioria das situações. A expressão que define a velocidade em relação ao ângulo da refração no método GRM é:

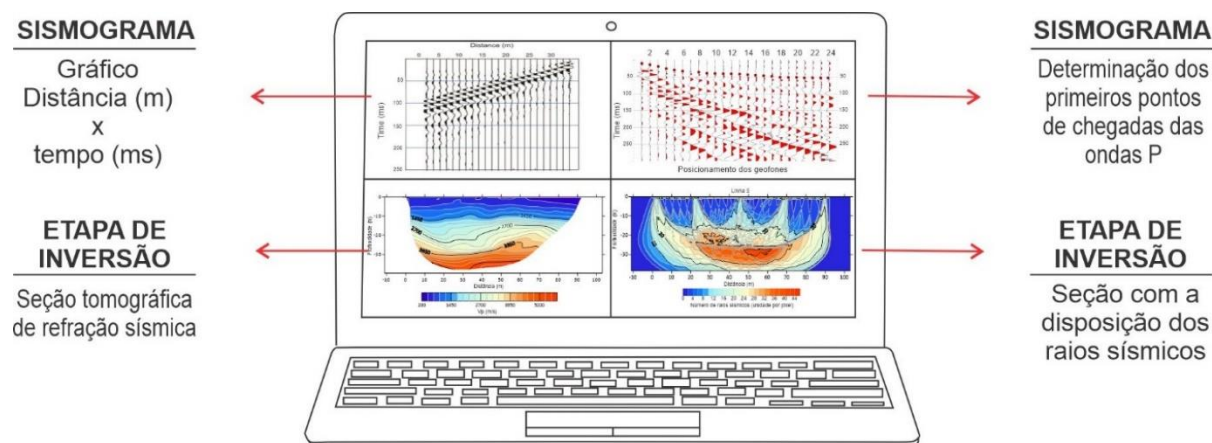
$$V_n \cong V_n' \cos \theta_{n-1} \quad (27)$$

O método de inversão WET do software Rayfract foi realizado em todas as linhas de aquisições individualmente. Após a inserção das características de cada uma das linhas, como a posição inicial do geofone, o espaçamento entre elas, o delay do trigger e as dimensões topográficas de cada geofone, foram determinados manualmente os primeiros tempos de chegada das ondas P para todos os tiros (geração artificial de onda sísmicas) ao longo de cada linha, tanto na barragem de rejeitos como nas bacias de decantação (Figura 67). Todos os sismogramas gerados e os primeiros tempos de chegada das ondas P foram apresentados no Anexos II (barragem de armazenamento de rejeito) e III (bacias de decantação de radioisótopos).

Após determinados os pontos de chegadas das ondas P, o software realiza o processamento dos dados através de uma inversão WET suave a partir de um modelo inicial de gradiente 1D. O resultado é uma seção tomográfica de refração sísmica com a disposição dos valores de  $V_p$  ao longo da linha de aquisição e em profundidade visualizada no software SurferTM (Figura 67). Além da geração de um grid com os valores de  $V_p$ , o processamento resulta em outro grid com a disposição da quantidade de raios sísmicos da aquisição. Esses dados também podem ser interpolados no software SurferTM e fornecem informações importantes a respeito do comportamento dos raios sísmicos na área de aquisição dos dados. Nas duas áreas de estudo, foram observados variações na disposição do raios sísmicos no meio físico de acordo com a presença ou não de determinados elementos geológicos. Esses elementos podem

atuar como fatores relevantes na propagação da onda sísmica no meio, como blocos de rocha na área de aquisição.

**Figura 67:** Etapas de processamento dos dados de refração sísmica.



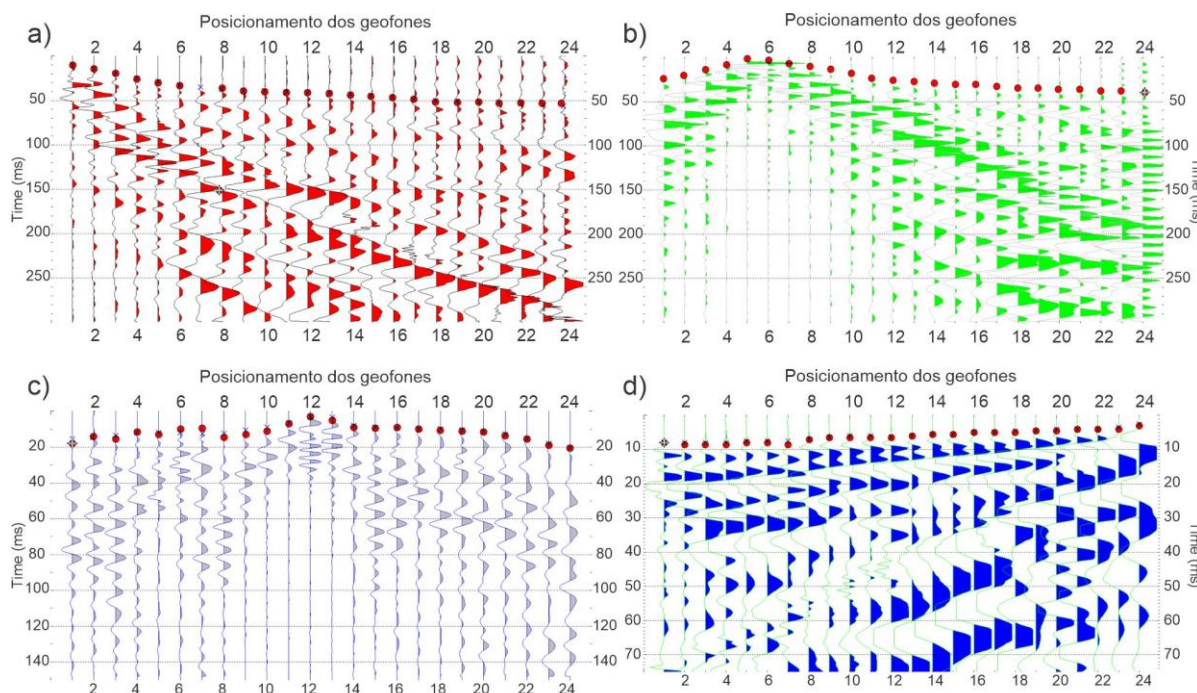
**Fonte:** elaborado pelo autor.

### 9.1.1 BARRAGEM DE ARMAZENAMENTO DE REJEITO DE URÂNIO

A Figura 68 apresenta exemplos de sismogramas gerados nas 4 linhas de aquisições em diferentes pontos de tiro: a) Linha 1, fonte sísmica 1,5 metros; b) Linha 2, fonte sísmica 5,5 metros; Linha 3, fonte sísmica 12,5 metros e Linha 4, fonte sísmica 23,5 metros; e as respectivas primeiras chegadas da onda sísmica. Nos sismogramas foi possível observar a chegada da onda P em todos os geofones. Durante as atividades de campo, embora a barragem estivesse localizada em uma região praticamente com ausência de fluxo de grandes veículos e pessoas, foi observado e monitorado o nível de ruído antes de iniciar as aquisições e geração de fontes sísmicas. Os sismogramas mostraram a chegada de ruídos nos últimos geofones em pequena quantidade, o que não interferiu na qualidade dos dados coletados.

Após a determinação manual dos primeiros tempos de chegada das ondas P em todos os pontos de tiro, foi gerado um gráfico (tempo x distância), onde foi possível observar as leituras de tempo realizadas na aquisição e avaliar a coerência dos dados (Figura 69). Como foram realizados tiros em pontos espelhados na parte interna do arranjo de geofones, o gráfico de tempo versus distância permitiu identificar a reciprocidade no tempo de chegada das ondas sísmicas compressoriais em relação aos pontos de tiro (Figura 69). Essa observação pode ser utilizada como um controle de qualidade na coleta dos dados sísmicos de refração.

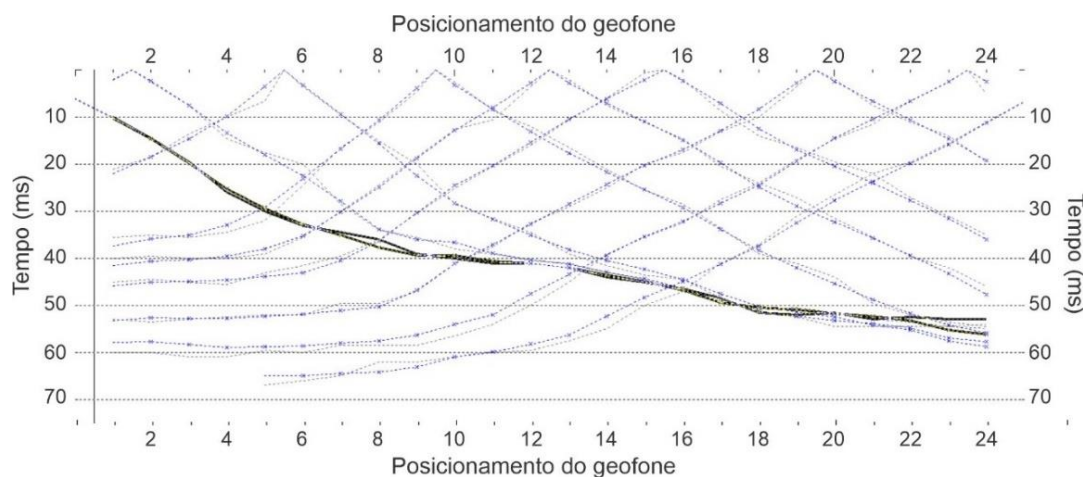
**Figura 68:** Sismogramas gerados na aquisição de sísmica de refração (onda P) na área da barragem de armazenamento de rejeito; a) linha 1; b) linha 2; c) linha 3 e d) linha 4. Os círculos vermelhos representam as primeiras chegadas da onda sísmica.



**Fonte:** dados da pesquisa.

O parâmetro geométrico que fundamenta o comportamento dos caminhos das ondas sísmicas no meio físico em estudos de sísmica de refração é justamente a refração de parte da onda quando atingir algum limite de contraste de velocidade na subsuperfície, normalmente associado a característica elástica do material (Figura 69) (LANKSTON, 1990; STOKOE & SANTAMARINA, 2000).

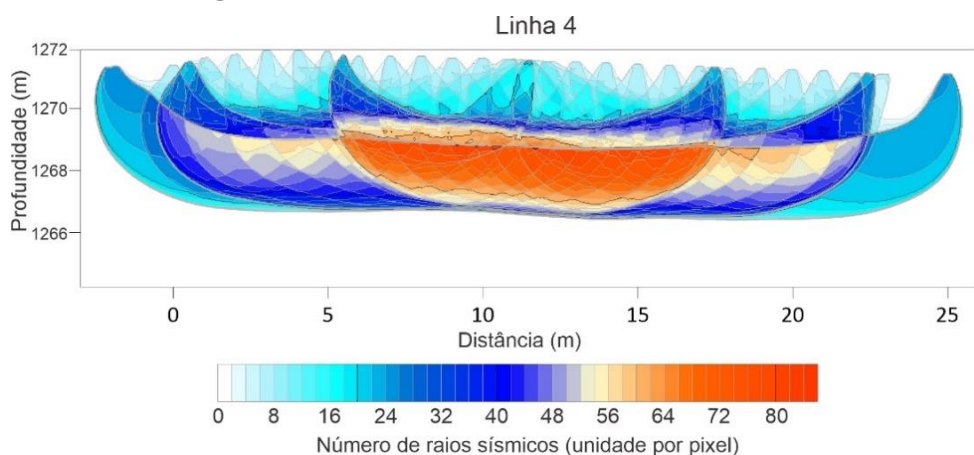
**Figura 69:** Gráfico tempo x distância para cada geofone da linha 1.



**Fonte:** dados da pesquisa.

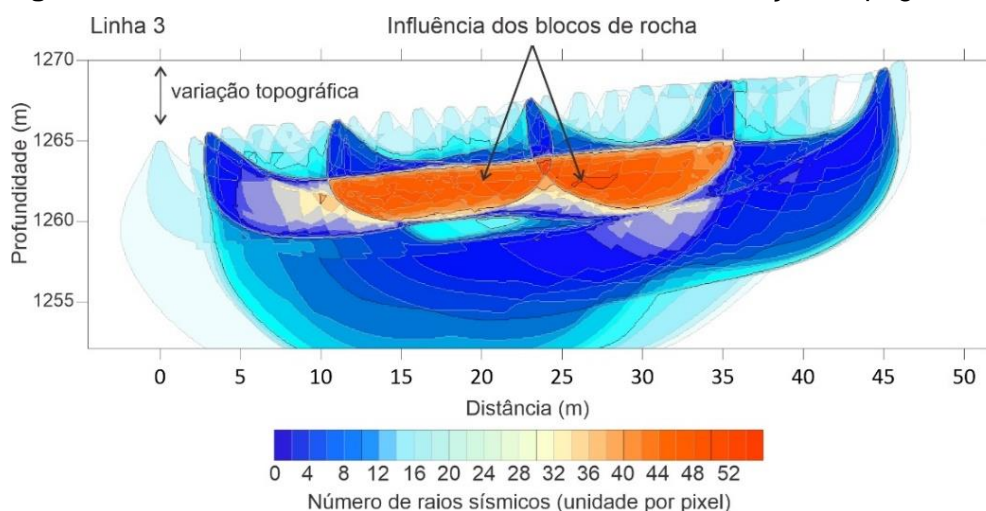
Em todas as linhas, a inversão WET foi realizada através de 20 iterações a partir do modelo inicial. O maior RMS foi de 1,17ms (linha 1) e o menor de 0,40ms (linha 4). Ambos foram satisfatórios e mostraram confiabilidade no processamento dos dados. Além do baixo erro associado ao modelo, o software fornece um mapa das áreas de cobertura dos raios sísmicos em relação à profundidade (Figura 70). A área de cobertura foi boa em todas as linhas, com quantidade considerável de ondas sísmicas, inclusive em aquisições com topografia mais acentuada (Figura 71). Todas as seções com os raios sísmicos foram apresentadas no Anexo IV. Por fim, o resultado foi a seção tomográfica com os valores das velocidades de propagação da onda P obtidos em cada aquisição apresentada no tópico de 10. Resultados e Discussões.

**Figura 70:** Número de raios sísmicos na linha 4.



**Fonte:** dados da pesquisa.

**Figura 71:** Número de raios sísmicos na linha 3, com variações topográficas.

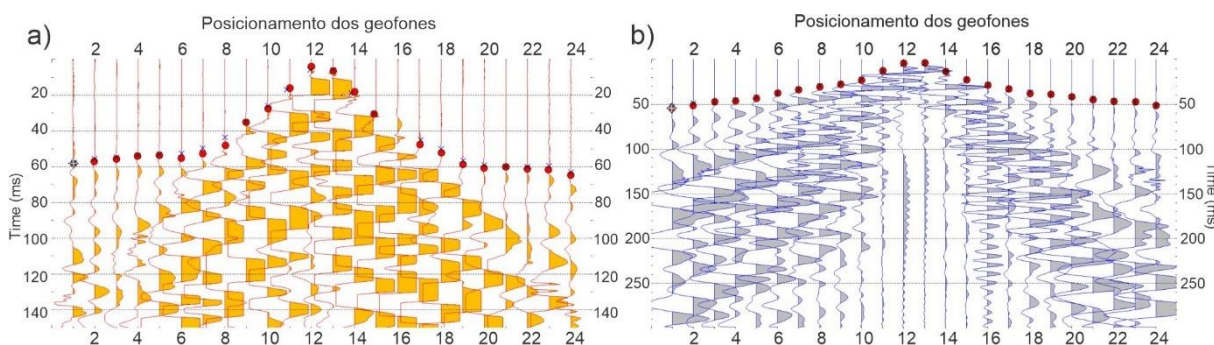


**Fonte:** dados da pesquisa.

### 9.1.2 BACIAS DE DECANTAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

As linhas de aquisições 5 e 6 de dados sísmicos de refração foram processadas individualmente. Em ambos os casos, todos os pontos de geração fonte sísmica artificial (pontos de tiro) registrados em campo pelo sismógrafo foram inseridos no software *Rayfract*. Dessa maneira, foram gerados sismogramas do posicionamento dos geofones e o tempo de chegada, em ms, das ondas sísmicas registradas. A partir dos sismogramas foram lidos os primeiros tempos de chegada da onda P para cada posição de tiro (Figura 72).

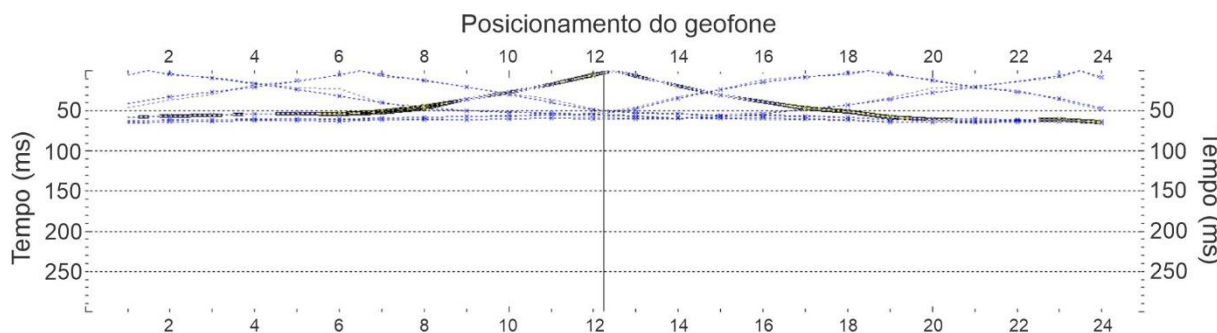
**Figura 72:** Sismogramas gerados na aquisição de sísmica de refração (onda P) na área das bacias de decantação de água ácida, a) linha 5 e b) linha 6.



**Fonte:** dados da pesquisa.

Foi observada uma boa disposição dos tempos de chegadas das ondas P a partir de cada ponto de tiro ao longo de ambas as linhas (Figura 73).

**Figura 73:** Gráfico tempo x distância para cada geofone da linha 5.

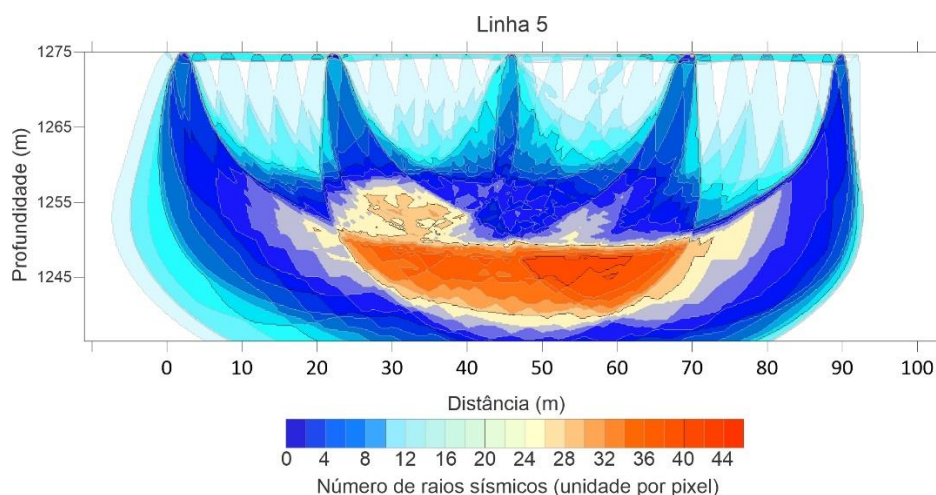


**Fonte:** dados da pesquisa.

Nas linhas 5 e 6, a inversão WET foi realizada através de 20 iterações a partir do modelo inicial. O maior RMS foi obtido na linha 5 (1,85 ms) e o menor na linha 6

(1,44 ms). Em ambas as aquisições foram obtidos uma boa quantidade de raios sísmicos em profundidade na área de investigação. A Linha 5 apresentou uma distribuição do comportamento da onda sísmica mais uniforme (Figura 74).

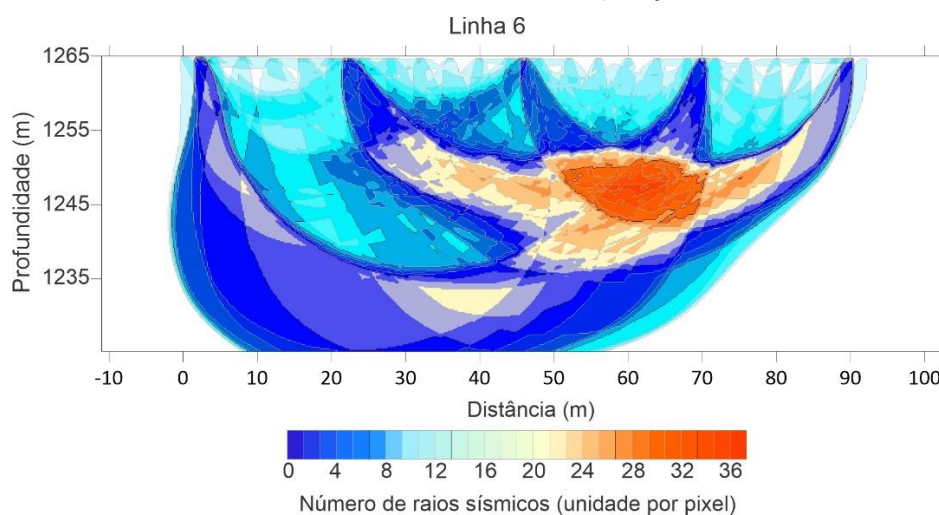
**Figural 74:** Número de raios sísmicos na linha de aquisição 5 da bacia de decantação.



**Fonte:** dados da pesquisa.

A Linha 6 apresentou um aumento do número de raios sísmicos entre 10 metros e 20 metros de profundidade na distância entre 50 metros e 75 metros ao longo da seção tomográfica (Figura 75). Esse comportamento ocorre em meios sísmicamente anisotrópicos. A anisotropia está associada as propriedades elásticas intrínsecas do meio físico e suas variações medidas de um ponto ao outro, muitas vezes por conta de elementos geológicos (LIU & MARTINEZ, 2012).

**Figural 75:** Número de raios sísmicos na linha de aquisição 6 da bacia de decantação.



**Fonte:** dados da pesquisa.

## 9.2 ANÁLISE MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIAIS

O processamento dos dados de ondas superficiais foi realizado no software SeisImager 2.9.1.9 (SEISIMAGER/SW MANUAL, 2009). O software, desenvolvido pela Geometrics, é especializado na análise e interpretação de dados sísmicos, especialmente focado em métodos de ondas superficiais, como a Análise Multicanal de Ondas Superficiais e refração sísmica. A partir de uma combinação de algoritmos e fórmulas matemáticas, o software é amplamente utilizado em estudos de engenharia geotécnica, geologia e investigações ambientais (EIKMEIER, 2018; PARK, 2013). Além da vasta aplicação em estudos de geotecnia e meio ambiente, o software apresenta bons resultados em estudos geofísicos realizados em maciços de solo compactado de barragens (GUEDES et al., 2022; GUIRELI NETTO et al., 2020b), o que torna interessante e pertinente o uso deste software no presente trabalho.

Em uma interface simples, o software permite que o usuário utilize os diferentes módulos individualizados para a leitura e interpretação dos dados de sísmica de refração e análise de ondas superficiais, como o *PickwinTM*, *PlotrefaTM*, *WaveEqTM* e *GeoPlotTM*. No presente trabalho, foram utilizados apenas os módulos *PickwinTM* e o *WaveEq*. O módulo *PickwinTM* possui uma interface simples a qual permite a visualização das formas de ondas sísmicas registradas através de um gráfico que plota a posição dos geofones no eixo horizontal e o tempo no eixo vertical. O módulo possui também uma ferramenta especializada para a análise de ondas superficiais. A seguir, é descrito alguns critérios utilizados durante a etapa de aquisição dos dados, o funcionamento das ferramentas de processamento e como elas foram utilizadas para a análise dos dados sísmicos no presente estudo. O mesmo procedimento foi adotado para o processamento dos dados de ondas superficiais coletados na região da barragem de armazenamento de rejeito e nas bacias de decantação de radioisótopos.

Em cada offset (distância da fonte sísmica e o primeiro geofone de leitura), os dados foram empilhados verticalmente. Esse procedimento é comumente realizado em aquisições geofísicas para aumentar a razão sinal (S/R) dos dados (EIKMEIER, 2018). O empilhamento foi realizado através de uma fonte sísmica ativa. A partir do diferimento de golpes com uma marreta sísmica de 5kg em uma placa metálica alocada na superfície do solo, foram realizados 5 empilhamentos. Esse padrão foi mantido em todos offsets de todas as linhas de MASW. Os dados foram salvos e

exportados do sismógrafo em formato SEG-2. Esse formato de arquivo é rotineiramente utilizado em diversos programas de processamento de dados sísmicos. Os dados foram importados no módulo *Pickwin<sup>TM</sup>* do SeisImager e foram obtidos os sismogramas com os tempos de chegadas das ondas sísmicas. Todos os sismogramas utilizados no processamento dos dados de MASW podem ser visualizados nos Anexo VI (barragem de armazenamento de rejeitos) e VII (bacias de armazenamento de radioisótopos).

O processamento dos dados de fontes ativas no software SeisImager utiliza a ferramenta de Transformada de Fourier (FT) para converter os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. O algoritmo aplica uma transformada de Fourier bidimensional para que os dados sejam transformados do domínio distância – tempo  $(x, t)$  para o domínio frequência - número de onda  $(f, k)$  (Eq. 28). O procedimento é realizado na ferramenta *Active FK* e o resultado apresenta as propriedades dispersivas das ondas de Rayleigh.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{Eq. (28)}$$

onde  $X(f)$  é a função de frequência,  $x(t)$  é a função de tempo,  $j$  é a unidade imaginária e  $f$  é a frequência. A partir deste resultado é obtida a curva de dispersão (velocidade de fase em função da frequência) resultado da identificação dos máximos de energia para cada frequência (PARK et al., 1999). Ao final desta etapa é obtido o espectro  $(V, f)$ , através do qual é possível extrair as curvas de dispersões de cada modo visível com base nos máximos de energia (EIKMEIER, 2018). Todas as imagens de dispersão (frequência x velocidade) obtidas para os 12 ensaios de MASW realizados na 2ª berma do barramento e para os 16 ensaios de MASW realizados na área das bacias de armazenamento de radioisótopos podem ser visualizadas nos Anexos VIII e IX.

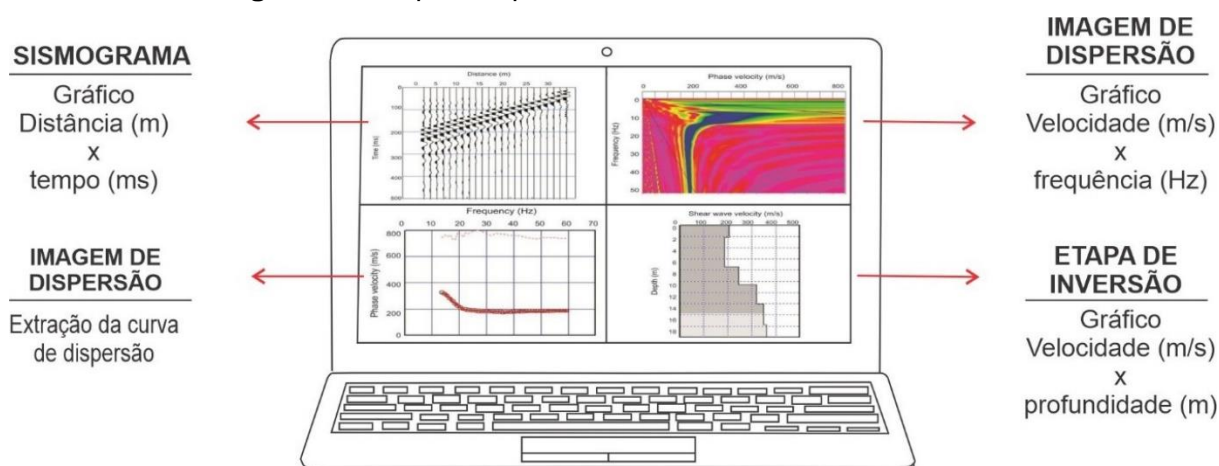
Por fim, através da aplicação de processos matemáticos de inversão da curva de dispersão, é obtido um perfil 1D da variação de velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ) com a profundidade para cada ensaio realizado atribuída ao centro do arranjo de geofones. A inversão é um processo iterativo utilizado para ajustar um modelo teórico aos dados observados, com o objetivo de estimar o perfil de velocidade de cisalhamento ( $V_s$ ) do subsolo. No software SeisImager, a inversão é realizada para

minimizar uma função objetivo que mede a diferença entre os dados observados e os dados calculados pelo modelo através da seguinte relação (Eq. 29).

$$\phi(m) = \sum_{i=1}^N [d_i^{obs} - d_i^{calc}(m)]^2 \quad \text{Eq. (29)}$$

onde  $\phi(m)$  é a função objetivo,  $d_i^{obs}$  são os dados observados,  $d_i^{calc}(m)$  são os dados calculados a partir do modelo  $m$  e  $N$  é o número de observações. Os diversos perfis 1D realizados ao longo de uma linha possibilitam a construção de uma seção 2D com a distribuição de  $V_s$  em subsuperfície a partir do procedimento estatístico de interpolação dos dados. Neste estudo, em ambas as áreas de estudo, os perfis 1D foram interpolados a partir da técnica estatística de vizinho natural, a qual estima os valores em novos pontos através dos valores dos pontos mais próximos, sem a necessidade de um modelo matemático complexo. Esta técnica preserva as características locais dos dados originais, o que é crucial para representar fielmente as variações das velocidades de cisalhamento em áreas geotécnicas heterogêneas. Isso é importante porque a interpolação não deve suavizar excessivamente as variações que podem indicar importantes características geológicas (NONOGAKI et al., 2021). O esquema das etapas de processamento dos dados de MASW podem ser visualizados na Figura 76.

**Figura 76:** Etapas de processamento dos dados de MASW.



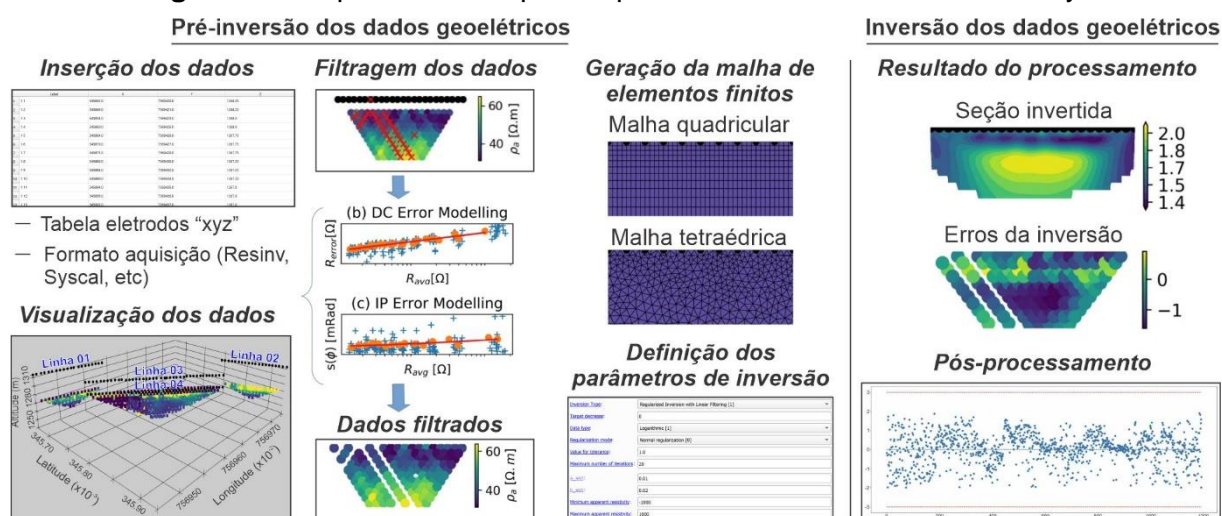
**Fonte:** modificado de Gireli Netto et al. (2020b).

### 9.3 TOMOGRAFIA ELÉTRICA

Após finalizadas as aquisições geoeletricas em campo, os dados foram salvos na memória do equipamento de medição e inserido em software de processamento dedicado à inversão geofísica. O procedimento de inversão dos dados consiste em obter os valores de resistividade elétrica dos elementos tetraédricos do modelo escolhido durante a etapa de inversão a partir dos dados de resistividade elétrica aparente medidos em campo. A diferença entre os dados medidos em campo e os valores obtidos no modelo de inversão é conhecido como erro quadrático médio (em inglês, *mean squared error* – RMS) (BINLEY, 2015).

O presente estudo utilizou o software ResIPy para processamento dos dados geoeletricos (Figura 77) (BLANCHY et al., 2020). O software, em linguagem *python*, permite que o usuário realize a inversão geofísica bidimensional das linhas de tomografia elétrica de maneira individual. Entretanto, a partir da inserção de todas as linhas de aquisições e as respectivas coordenadas geográficas e topográficas de todos os eletrodos, o software dispõe as linhas em um modelo 3D (BOYD et al., 2019), ou seja, embora a inversão dos dados seja 2D, os resultados do processamento são apresentados em um formato 3D (cubo) para facilitar a interpretação dos resultados. Esse procedimento foi adotado nos processamentos dos dados geoeletricos das duas áreas de estudo.

**Figura 77:** Esquema das etapas de processamento no software ResIPy.



**Fonte:** modificado de Blanchy et al. (2020).

O ResIPy utiliza uma família de códigos R de inversão ERT proposto por Binley & Kemna (2015), a qual foi fundamentada nos códigos de modelagem e inversão dedicados aos dados geoeletricos elaborados por Befus (2018). A partir da criação de uma malha de elementos finitos e a inserção do número e espaçamento dos eletrodos, o software utiliza os códigos de inversão para obter o melhor modelo de dados de resistividade elétrica a partir dos dados de resistividade elétrica aparente coletados em campo (Figura 77) (BLANCHY et al., 2020).

O mesmo procedimento de tratamento dos dados foi utilizado nas duas áreas de estudo. A etapa inicial consistiu em inserir os dados geoeletricos no software. Essa etapa é crucial, pois o software permite a visualização de parâmetros importantes dos dados, como a localização geográfica dos eletrodos e os valores de resistividade elétrica aparente em seções bidimensionais e tridimensionais (BOYD et al., 2019; BLANCHY et al., 2020). O posicionamento e as cotas topográficas corretas dos eletrodos foram analisados e, caso identificado algum valor anômalo, como um valor de coordenada errado ou algum eletrodo sem cota topográfica, o erro foi corrigido.

Após a inserção e controle de qualidade dos dados, foi iniciada a etapa de pré-processamento. Essa etapa consiste em gerar uma malha de elementos finitos, tetraédrica ou retangular, com uma quantidade robusta de nódulos lateralmente e em profundidade. Em ambas as áreas de estudo foram utilizadas malhas de elementos finitos com grande quantidade de nódulos em todas as linhas de aquisições.

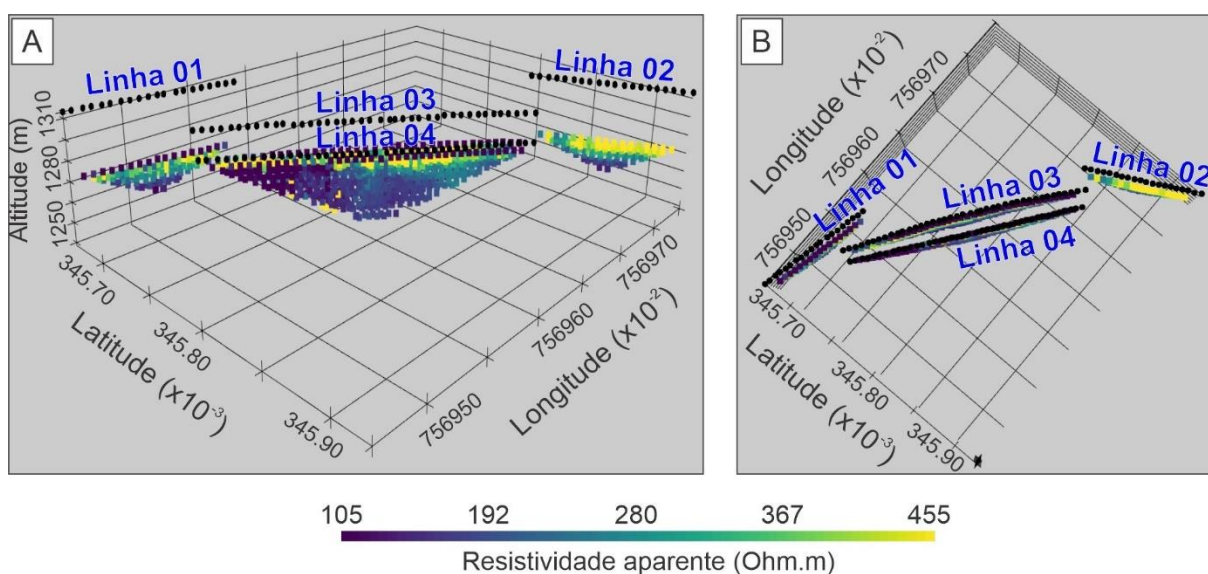
Após gerada a malha tetraédrica de elementos finitos, foram determinados os parâmetros de inversão dos dados geoeletricos. Em todos os processamentos foram definidos um número máximo de 15 iterações para cada linha de aquisição no processamento de ambos os arranjos geoeletricos. Esse valor foi definido uma vez que durante a inversão, o erro RMS tende a diminuir rapidamente nas primeiras iterações, conforme o modelo ajusta aos dados medidos. No entanto, após certo número de iterações, a redução do RMS é menos significativa, o que indica que o modelo já alcançou um ajuste satisfatório. Portanto, o limite de 15 iterações é uma forma de garantir que o processo de inversão seja eficiente. Entretanto, quando a variância dos valores de resistência entre os erros dos dados de campo e os dados obtidos pelo modelo de inversão atingiu aproximadamente o equivalente a 2% de RMS, o processamento da linha de aquisição foi finalizado automaticamente pelo software. Devido as características de cada área de estudo, como dimensão da área, quantidade de linhas de aquisições realizadas e espaçamento entre as linhas, os

detalhes e parâmetros adotados para cada área de estudo serão descritos a seguir de maneira individualizada.

### 9.3.1 BARRAGEM DE ARMAZENAMENTO DE REJEITO DE URÂNIO

As 4 linhas de ERT realizadas na região da crista e bermas do corpo do barramento foram inseridas no software ResIPy. Nessa etapa, caso ocorra a inserção de eletrodos de corrente com o mesmo posicionamento geográfico dos eletrodos de potencial, o software identifica o erro e avisa o usuário. Não foi identificado esse problema no processamento de dados geoeletricos da barragem de armazenamento de rejeito de urânio. Os eletrodos foram posicionados de acordo com seu posicionamento geográfico e topográfico. Dessa maneira, foi possível observar as linhas de ERT em um modelo 3D (Figura 78). Após inserir as 4 linhas de ERT e verificar o posicionamento de todos os eletrodos, foram analisados possíveis valores anômalos nos dados. Esses valores podem estar associados com altas resistividades elétricas aparentes de contato entre o eletrodo de aquisição e o solo, por exemplo (LOKE et al., 2003). Neste caso, a leitura realizada é retirada do processamento. Não foram observados valores dessa natureza nos dados das 4 linhas de ERT.

**Figura 78:** a) Disposição das linhas ERT em um modelo 3D; b) Visão superior das linhas de ERT na barragem de armazenamento de rejeito.

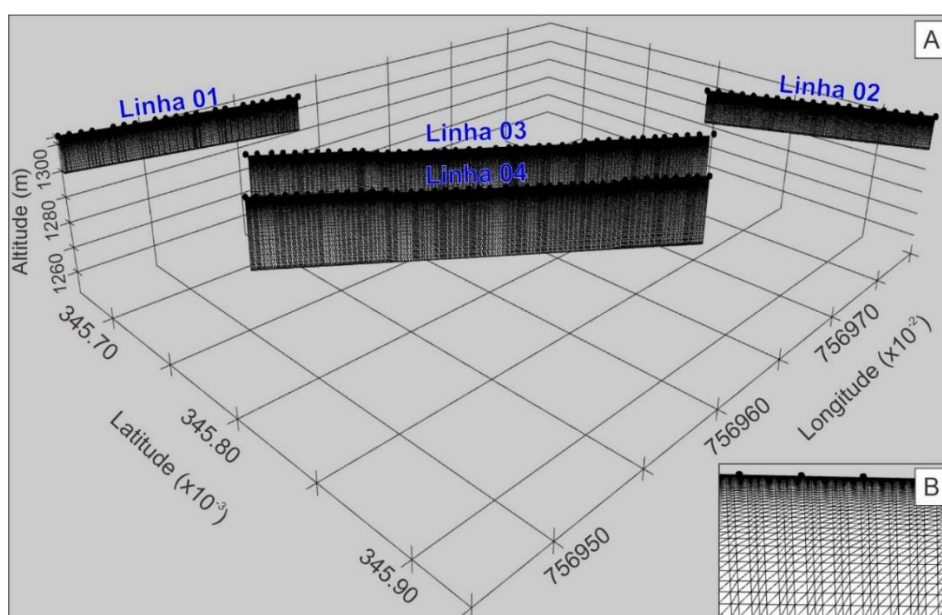


Fonte: dados da pesquisa.

No processamento dos dados geelétricos da barragem de rejeito de urânio, a construção da malha de elementos finitos fez uso de nódulos retangulares (Figura 79A). Como as linhas foram dispostas em setores aplainados nas regiões da crista e bermas, a malha de elementos finitos retangular apresenta um bom encaixe geométrico as condições do meio físico estudado e pode ser utilizada nesse contexto (BLANCHY et al., 2020).

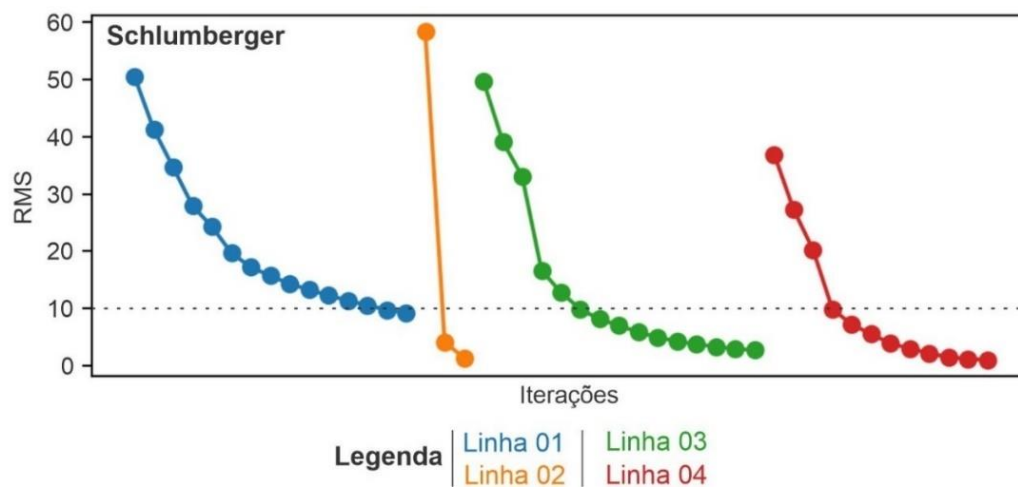
O processamento buscou utilizar uma grande quantidade de nódulos na malha de elementos finitos. Dessa maneira, a ferramenta de refino do software foi utilizada na determinação do tamanho e quantidade dos nódulos da malha (BOYD et al., 2019). O resultado foi uma malha robusta, com quantidade de nódulos suficientes nos níveis mais rasos e profundos, graças ao baixo fator de crescimento com a profundidade. O tamanho dos nódulos em profundidade também não foi relativamente alterado (Figura 79B). Após realizada a etapa de inversão dos dados geelétricos a partir das iterações para cada linha de aquisição no processamento de ambos os arranjos geelétricos. Os RMS obtidos foram inferiores a 10 em todas as linhas (Figura 80). As linhas de ERT 02, 03 e 04 apresentaram RMS inferiores a 5. O menor RMS foi observado na linha 04, próximo a 1. O maior RMS foi observado na linha 1, com valor próximo a 8. Os baixos valores de RMS forneceram confiabilidade no processamento realizado e asseguram a robustez no processamento dos dados.

**Figura 79:** a) Malha de elementos finitos retangular utilizada no processamento das linhas ERT da barragem de armazenamento de rejeito; b) Detalhe dos nódulos da malha.



Fonte: dados da pesquisa.

**Figura 80:** Resultado RMS da inversão de dados geoeletricos da barragem de armazenamento de rejeito.

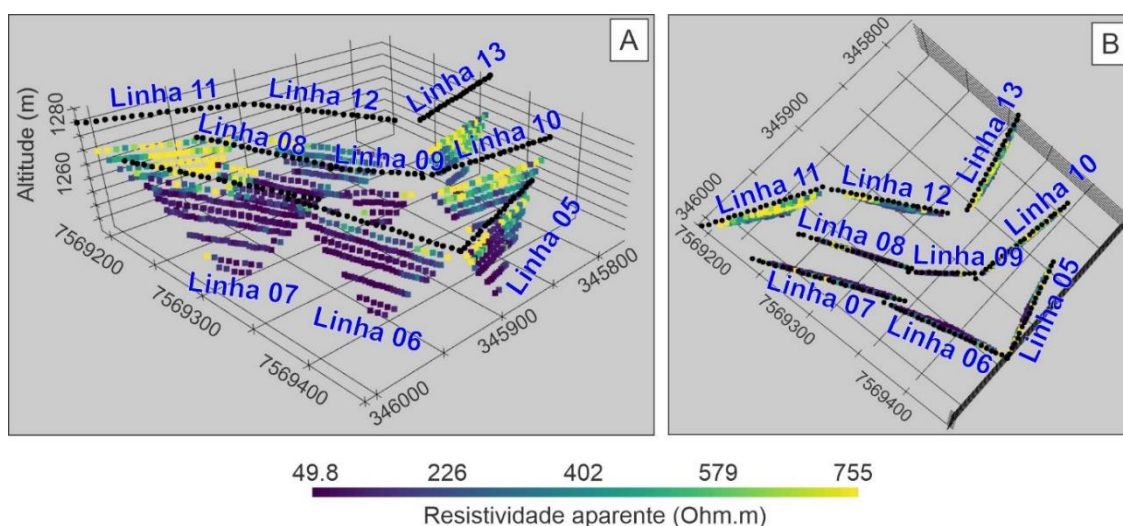


Fonte: dados da pesquisa.

### 9.3.2 BACIAS DE DECANTAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

As linhas de ERT executadas em diferentes pontos da área de estudo foram inseridas no software ResIPy (Figura 81).

**Figura 81:** a) Disposição das linhas ERT em um modelo 3D; b) Visão superior das linhas de ERT na bacia de decantação de águas ácidas.



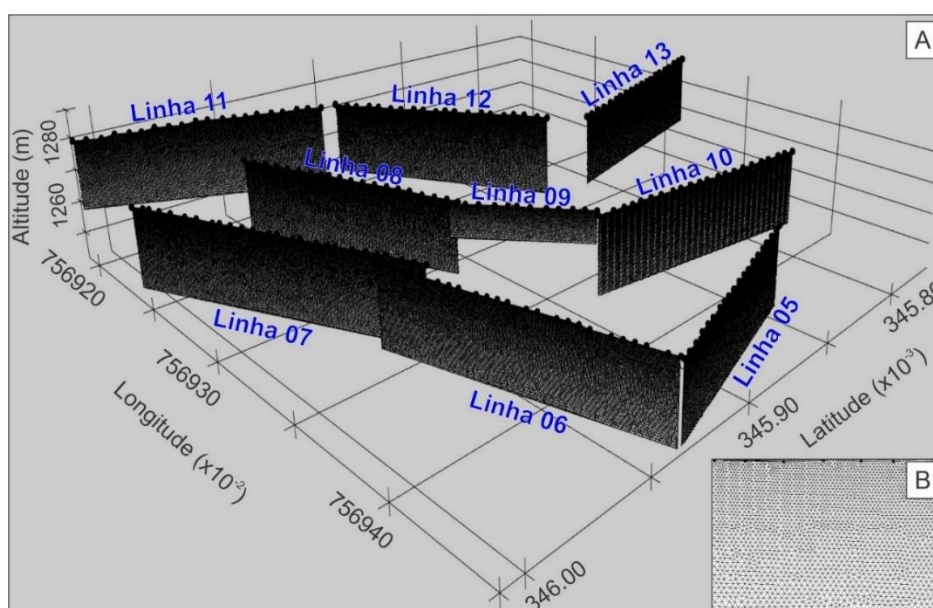
Fonte: dados da pesquisa.

O mesmo procedimento foi adotado para o processamento dos dados obtidos no arranjo dipolo-dipolo e Schlumberger. A primeira etapa consistiu em observar possíveis erros no posicionamento geográfico dos eletrodos de potencial ou corrente.

Não foi identificado esse problema no processamento de dados geoeletricos da bacia de decantação de águas ácidas. As coordenadas geográficas de todos os eletrodos das linhas de aquisições foram inseridas. O resultado foi a disposição dos dados de resistividade elétrica aparente em linhas 2D em um modelo 3D para melhor visualização dos resultados pré e pós processamento (Figura 81). Após a inserção de todas as linhas ERT adquiridas na área de estudo, as seções 2D foram analisadas individualmente a fim de identificar valores anômalos nas leituras. Retirados os valores anômalos, foi definida a malha de elementos finitos para as seções de ERT (Figura 82A).

O processamento dos dados de ERT das bacias de decantação de águas ácidas utilizou uma malha de elementos finitos tetraédrica (Figura 82A). Essa malha foi adotada uma vez que em uma das linhas de aquisições geoeletricas (Linha 06) apresentava uma variação topográfica considerável. Dessa maneira, os nódulos da malha de elementos finitos em formato tetraédrico geometricamente formam uma rede mais condizente com o meio físico estudado, diferentemente dos nódulos quadriculares (BOYD et al., 2019). Foi utilizada a ferramenta de refino para determinação do tamanho e quantidade dos nódulos da malha. O fator de crescimento com a profundidade foi baixo. Dessa maneira, o tamanho dos nódulos em profundidade não foi relativamente alterado (Figura 82B).

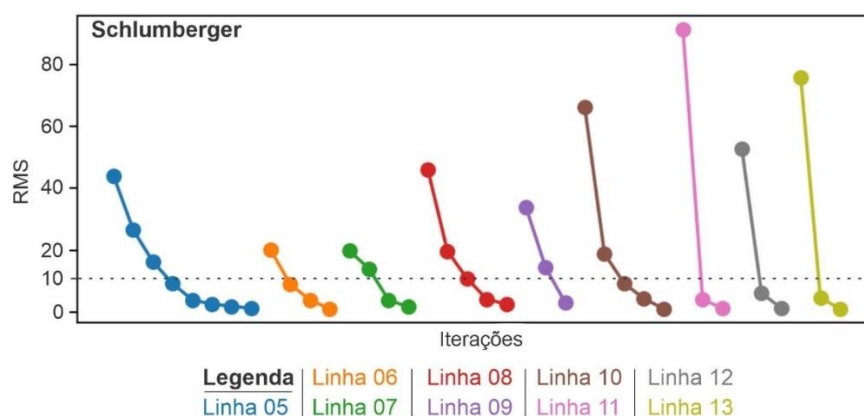
**Figura 82:** a) Malha de elementos finitos tetraédrica utilizada no processamento das linhas ERT das bacias de decantação; b) Detalhe dos nódulos da malha.



Fonte: dados da pesquisa.

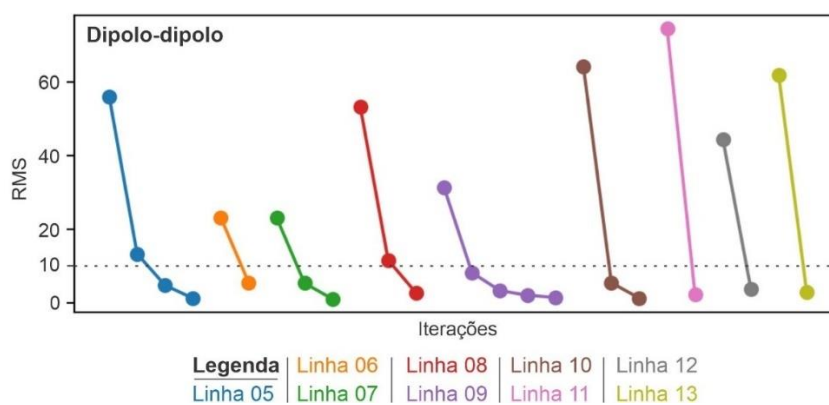
O resultado foi uma malha de elementos finitos robusta com grande quantidade de nódulos ao longo de toda a linha de aquisição, a qual foi utilizada para a inversão dos dois arranjos geométricos: dipolo-dipolo e Schlumberger. Após finalizadas as etapas de inversão dos dados geométricos foi gerado o gráfico com os valores de RMS obtidos em todas as linhas (Figuras 83 e 84).

**Figura 83:** Resultado RMS da inversão de dados geométricos da bacia de decantação de águas ácidas: arranjo Schlumberger.



**Fonte:** dados da pesquisa.

**Figura 84:** Resultado RMS da inversão de dados geométricos da bacia de decantação de águas ácidas: arranjo dipolo-dipolo.

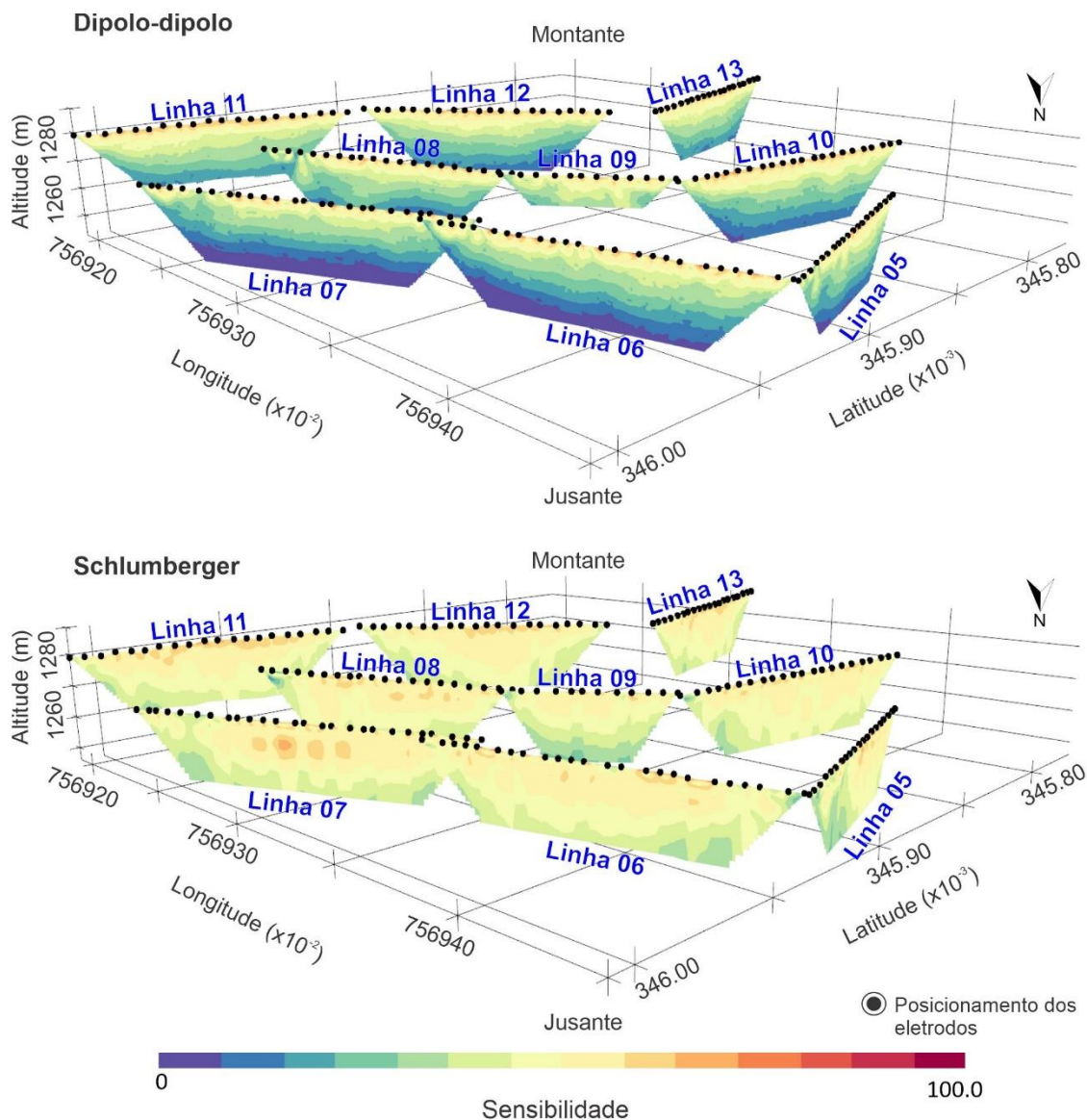


**Fonte:** dados da pesquisa.

Em ambos os arranjos geométricos utilizados no estudo, os valores de RMS foram inferiores a 5 e não foi necessário realizar o número máximo de iterações (15) em nenhuma linha de aquisição. Esse resultado mostrou a confiabilidade nos resultados do processamento de ambos os arranjos geométricos. Além do controle de

qualidade dos dados através do erro RMS, foram observadas as sensibilidades do processamento para cada arranjo geolétrico adotado (Figura 85).

**Figura 85:** Sensibilidade do processamento dos diferentes arranjos geolétricos.



**Fonte:** dados da pesquisa.

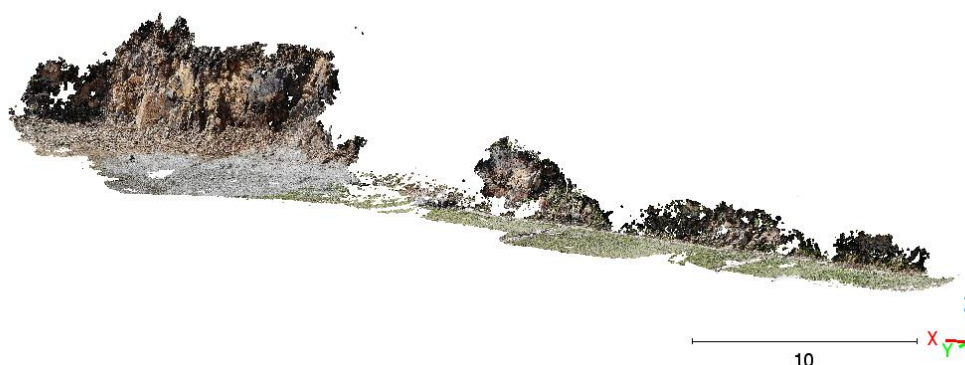
O arranjo geolétrico do tipo Schlumberger apresentou melhor sensibilidade com o aumento da profundidade em relação ao arranjo geolétrico do tipo dipolo-dipolo. Como foi discutido no tópico 7.3.2.2 TÉCNICA DA TOMOGRÁFIA ELÉTRICA da fundamentação teórica do presente trabalho, o arranjo geolétrico do tipo dipolo-dipolo apresenta melhores resoluções laterais, porém profundidade de investigação mais rasa do que outros arranjos, como Wenner e Schlumberger. Esse

comportamento mostrou a importância em utilizar diferentes arranjos geométricos para aquisição dos dados, especialmente em cenários com variações topográficas.

#### 9.4 FOTOGRAMETRIA DIGITAL E GERAÇÃO DE NUVEM DE PONTOS

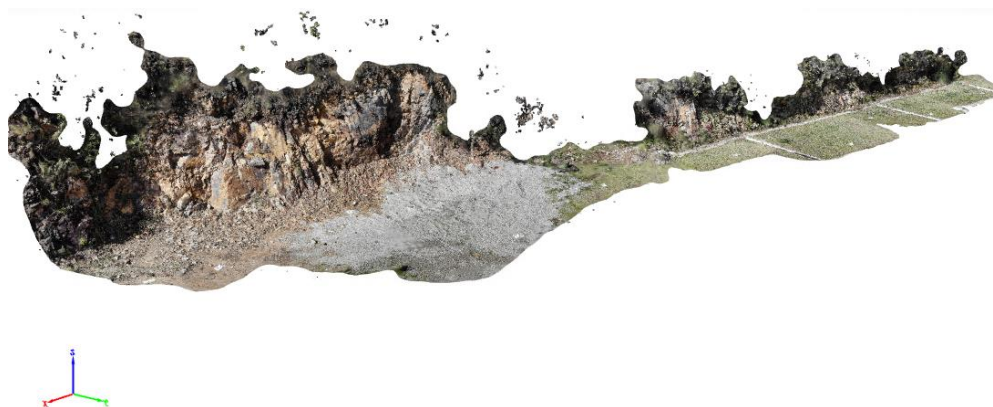
As imagens foram inseridas no software fotogramétrico *Pix4D mapper* versão 4.6.4 para a reconstrução do modelo digital 3D do afloramento como uma nuvem de pontos densificada (Figura 86) e malha texturizada (Figura 87). Esta última comumente denominada na comunidade científica como *Digital Outcrop Model* (DOM).

**Figura 86:** Nuvem de pontos do afloramento obtida por fotogrametria digital.



**Fonte:** dados do autor.

**Figura 87:** *Digital Outcrop Model* (DOM) obtido a partir de fotogrametria digital.

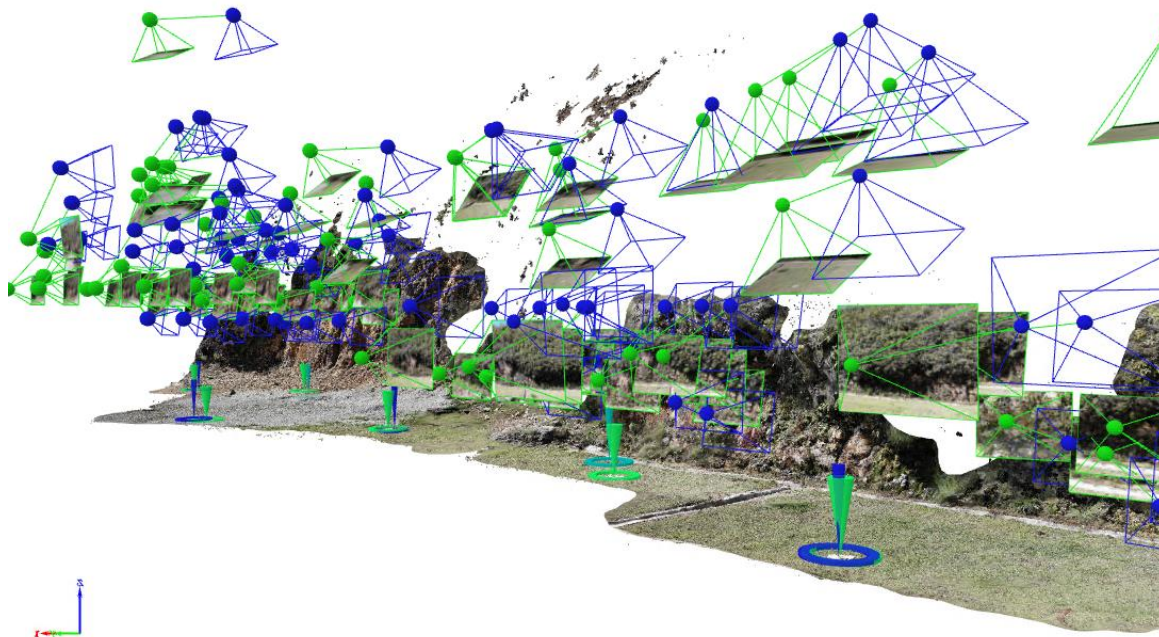


**Fonte:** dados do autor.

Os parâmetros de processamento padrão do modelo 3D fornecido pelo software foram usados para permitir um tempo de processamento razoavelmente rápido e qualidade confiável da nuvem de pontos. Além disso, 7 PC's coletados na

campanha de campo foram inseridos no modelo para melhorar a precisão relativa (medições) e absoluta (georreferenciação) da reconstrução do modelo (Figura 88), e 3 PC's foram usados independentemente como *Check Points* (CPs) para acessar a precisão absoluta.

**Figura 88:** DOM com a posição da câmera do VANT e PC's/CPs no solo.



**Fonte:** dados do autor.

Vale ressaltar que como a precisão altimétrica ( $y$ ) dos PC's/CPs obtida após o pós-processamento (1,92 metros a 4,55 metros) não correspondia à realidade do terreno horizontal (próximo de zero), as coordenadas inseridas para a reconstrução do modelo foram exatamente as mesmas para melhor representar a horizontalidade do terreno. O resultado foi a geração de uma nuvem de pontos densificada com aproximadamente 5 milhões de pontos, uma distância de amostragem do solo (GSD) de 1,9 mm/pixel, espaçamento de pontos inferior a 1 mm e uma densidade média de pontos de 336.809 pontos/m<sup>3</sup>. Os resultados da precisão absoluta do modelo são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13** - Resultados da precisão absoluta do *Digital Outcrop Model*.

	Erros PC's (m)			Erros Pontos de Checagem (m)		
	x	y	z	X	y	Z
Mean	0,01	-0,01	0,00	-0,34	0,05	-0,05
St. Dev.	0,46	0,32	0,03	0,90	0,89	0,12
Erro RMS	0,47	0,32	0,03	0,96	0,89	0,13

#### 9.4.1 EXTRAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

Os traços e planos de descontinuidades na superfície do afloramento foram mapeados manualmente na nuvem de pontos através do plugin *Compass* (THIELE et al., 2017) do software open source *CloudCompare v2.12.4* (2023). A ferramenta “*Trace*” usa um algoritmo de caminho de menor custo para conectar automaticamente traços entre um ponto inicial e final escolhido pelo usuário (Figura 89) e, em seguida, estima a orientação de um plano de melhor ajuste para o traço mapeado (Figura 90).

O software usa uma implementação otimizada do algoritmo de Dijkstra. A partir de cinco funções de custo simples (Brilho da cor, similaridade de cor, gradiente, curvatura, por exemplo) diferentes estruturas e tipos de dados geológicos, como fraturas e falhas, podem ser mapeados (Tabela 14) (THIELE et al., 2017; NESBIT et al., 2018).

**Tabela 14** - Parâmetros e funções de custo simples.

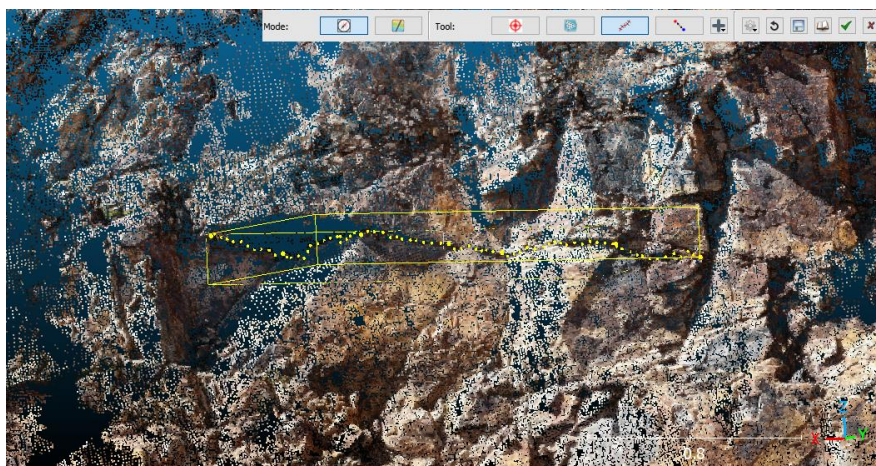
Parâmetro	Funções de custo simples
Brilho da cor	$cost = \frac{(e_R + e_G + e_B)}{3}; cost = 1 - \frac{e_R + e_G + e_B}{3}$
Similaridade da cor	$cost = \frac{1}{2} \left( \frac{ s_{RGB} - e_{RGB} }{\sqrt{3}} + \frac{ s_{RGB} - B_{RGB}  +  s_{RGB} - E_{RGB}  +  e_{RGB} - B_{RGB}  +  e_{RGB} - E_{RGB} }{4\sqrt{3}} \right)$
Gradiente	$cost = 1 - \frac{\min(G[N_{start}] + G[N_{end}], l)}{l}$
Curvatura	$cost = 1 - \frac{\min(\log(C[N_{end}], l))}{l}$

**Fonte:** Thiele et al. (2017).

onde  $e_{RGB}$  é o brilho da cor final de uma borda,  $e_R$ ,  $e_G$ ,  $e_B$  são os brilhos das cores vermelho, verde e azul, respectivamente.  $B_{RGB}$  é a cor inicial,  $E_{RGB}$  é a cor final,  $N_{start}$  é a magnitude dos vetores de cor ao longo do início,  $N_{end}$  é a magnitude dos vetores

de cor através dos vizinhos finais e  $G$  é o gradiente. Cada função fornece um valor entre 0 e 1. Dessa maneira, é possível calcular a influência de cada parâmetro, combinar as funções através da soma dos valores e trabalhar com os dados não estruturados, no caso a própria nuvem de pontos, e dados estruturados, as imagens (THIELE et al., 2017).

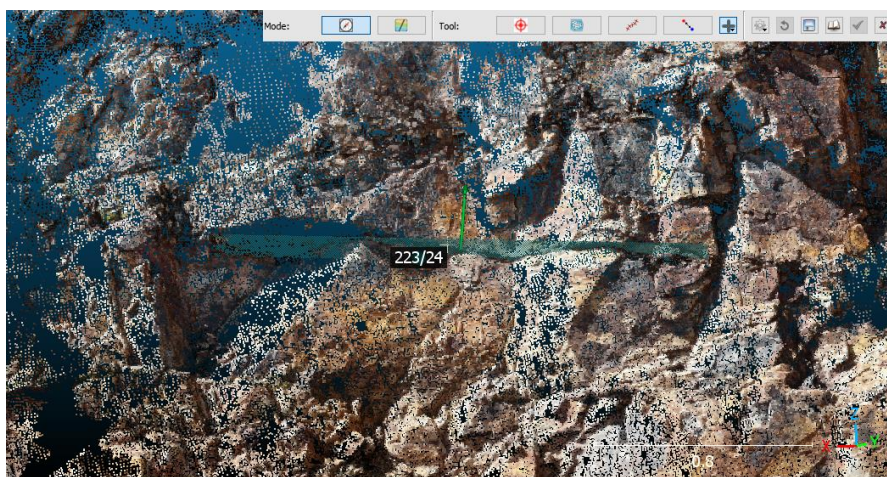
**Figura 89:** Mapeamento de traço de descontinuidade (pontos amarelos) usando a ferramenta *Trace* no plug-in *Compass* no software CloudCompare.



**Fonte:** dados do autor.

A ferramenta “Plano” permite medir a orientação das superfícies a partir da aplicação de um plano de melhor ajuste de mínimos quadrados em um ponto escolhido pelo usuário, neste caso na superfície do talude (Figura 91).

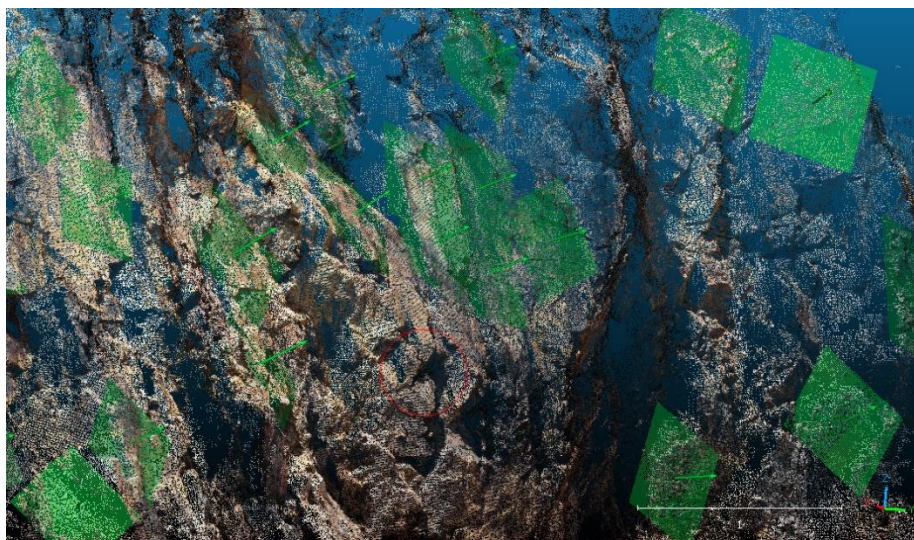
**Figura 90:** Plano de melhor ajuste (em verde) e vetor normal à descontinuidade mapeada da Figura 89, com orientação estimada de 223/24 (direção do mergulho/mergulho).



**Fonte:** dados do autor.

O procedimento foi realizado ao longo das descontinuidades do maciço rochoso encontradas ao longo de todo o afloramento. Um total de 61 traços de descontinuidades e 61 planos na superfície do afloramento foram mapeados e medidos digitalmente (Figura 91). As medidas coletadas foram exportadas em uma tabela para posteriormente ser inserida em projeção estereográfica utilizada em estudos de análises estrutural.

**Figura 91:** Planos de melhor ajuste (em verde) e vetores normais para vários pontos escolhidos na superfície da inclinação, a partir da ferramenta Plano no plug-in *Compass*, software *CloudCompare*.



**Fonte:** dados do autor.

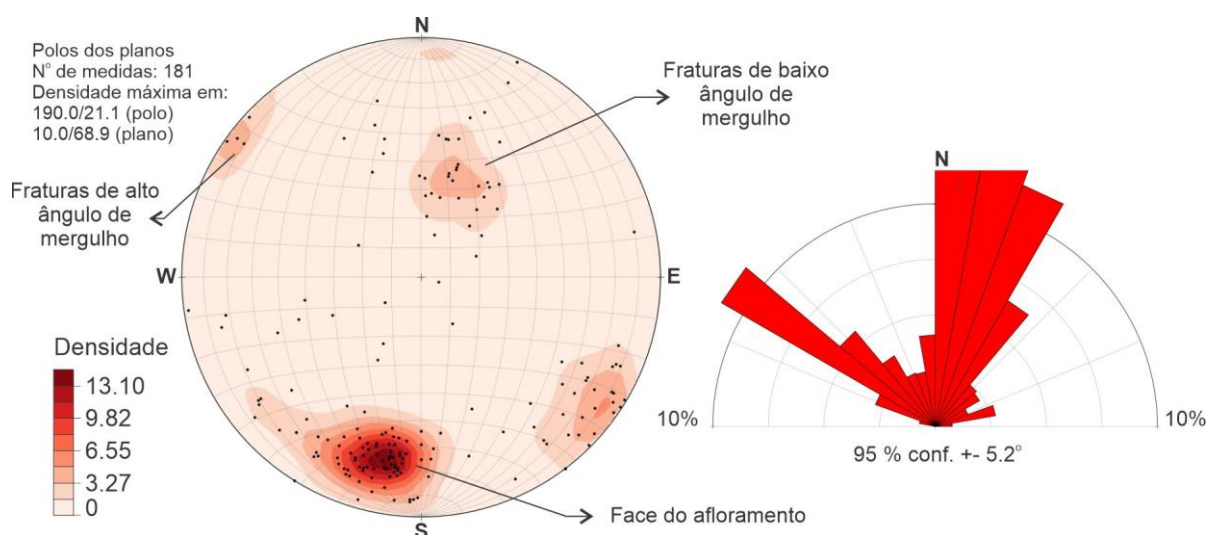
## 10. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 10.1 ANÁLISE ESTRUTURAL LOCAL

A análise estrutural da área de estudo foi realizada a partir de levantamentos de VANT e bússola. O levantamento foi realizado em um afloramento entre os dois alvos de estudo e, portanto, as informações obtidas podem ser utilizadas como análise estrutural local para os dois empreendimentos mineiros: barragem e bacia de decantação. Foram realizadas medidas estruturais das principais famílias de fraturas e da superfície do afloramento. As famílias de fraturas foram definidas de acordo com os ângulos de mergulho: fraturas com ângulo de mergulho alto ( $> 60^\circ$ ) e baixo ângulo de mergulho ( $< 60^\circ$ ).

Os dados estruturais foram plotados no estereograma para análise e comparação. O levantamento de estudos geológicos históricos realizados na área indicam que o fluxo d'água subterrâneo é condicionado pelo contexto estrutural. Todas as 181 medidas realizadas (bússola e VANT) estão apresentadas a seguir e utilizadas para as interpretações dos resultados geofísicos (Figura 92).

**Figura 92:** Diagrama de contorno com todas as 181 medidas coletadas no afloramento na área de estudo através de bússola e VANT.

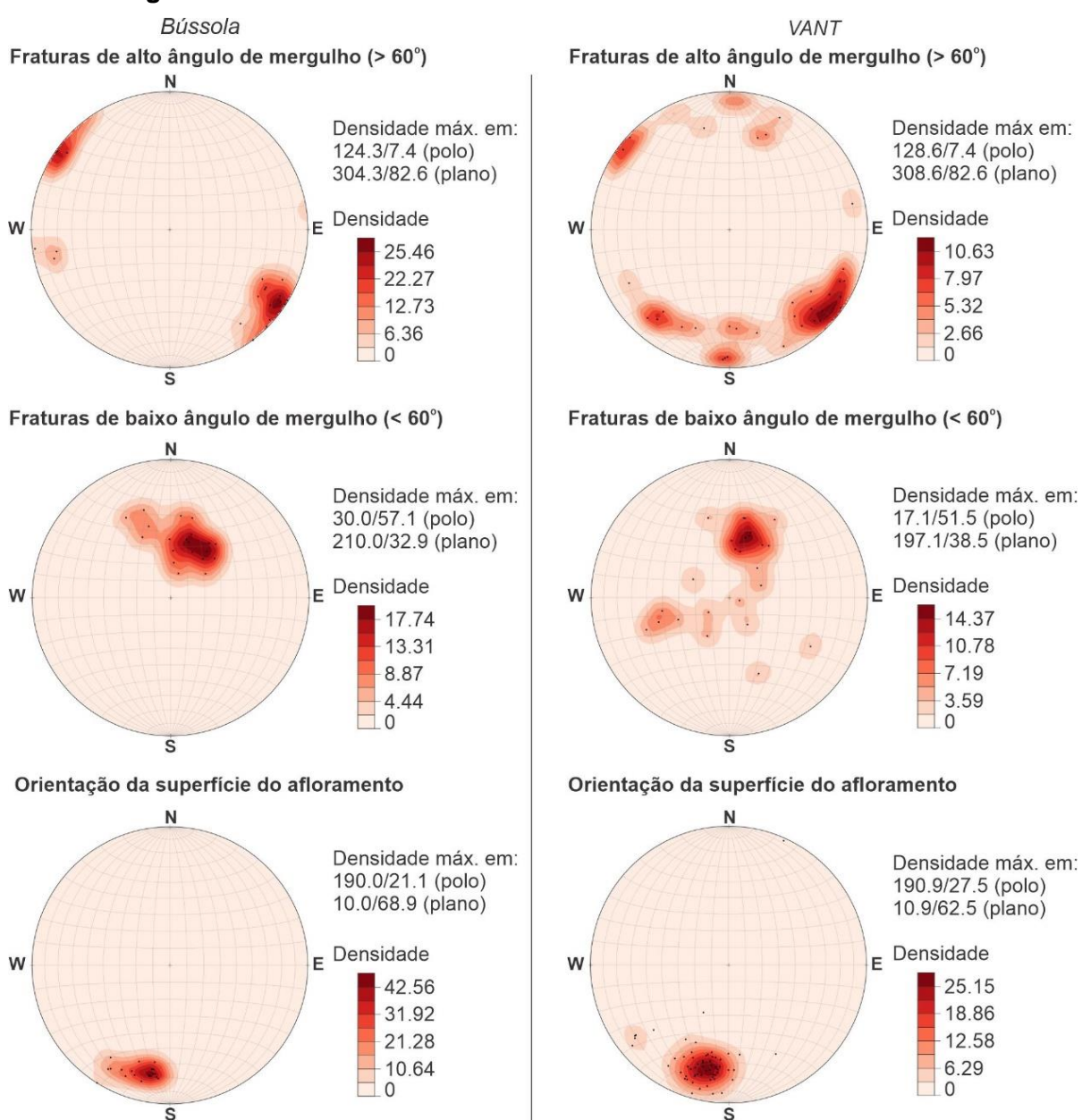


**Fonte:** dados da pesquisa.

Os dados de VANT mostraram maior variabilidade (Figura 93). No entanto, ao comparar o posicionamento da densidade máxima obtida entre as técnicas, os valores

são consistentes e garantem a confiabilidade dos dados medidos indiretamente. Além de comparar as medidas estruturais entre as duas técnicas de aquisições, a análise estrutural do presente estudo comparou as informações obtidas no levantamento do afloramento rochoso próximo a base do barramento com outros estudos estruturais realizados em escalas regional e local. Este último foi realizado mais precisamente nas paredes da cava da mineração e contou com quase 800 medidas de bússola realizadas (TARGA, 2021).

**Figura 93:** Resultados do levantamento estrutural com bússola e VANT.



Fonte: dados da pesquisa.

As fraturas de alto ângulo obtidas com o levantamento de VANT apresentaram densidade máxima de  $308^\circ$  para o sentido do mergulho. Essa medida é corroborada por um padrão regional de falhas que mostra uma direção de mergulho de  $290^\circ$  (CAMARERO et al., 2021) e direção NE-SW (ALMEIDA & PARADELLA, 1977; FRAENKEL et al., 1985; ALMEIDA, 1986), bem como pelas medidas locais de  $290^\circ$  e  $270^\circ$  obtidas nas paredes a céu aberto SE e NE da cava da MOU, respectivamente, a partir de um levantamento de bússola de Camarero et al. (2021).

As fraturas de baixo ângulo obtidas com levantamento de VANT apresentaram densidade máxima de  $197^\circ$  para o sentido do mergulho, corroborada com outro sistema de falhas regionais de direção NW-SE (ALMEIDA & PARADELLA, 1977; FRAENKEL et al., 1985; ALMEIDA, 1986) e medidas locais de  $200^\circ$  para direção de mergulho obtidas na parede NW a céu aberto da cava da MOU a partir de um levantamento de bússola por Camarero et al. (2021).

## **10.2 ANÁLISE ESTRUTURAL LOCAL E OS MÉTODOS GEOFÍSICOS**

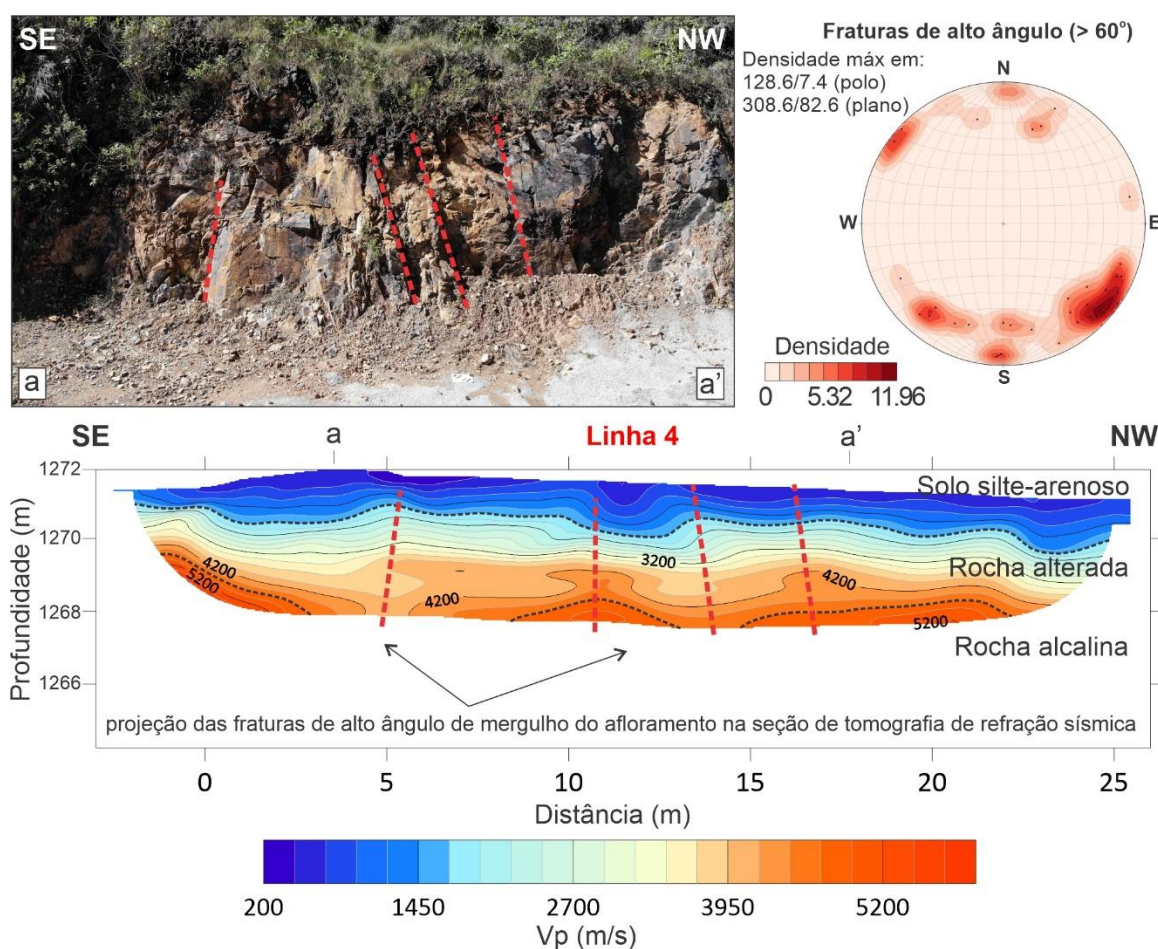
Após apresentados os resultados do levantamento estrutural e realizadas as discussões a respeito da disposição e orientação das principais famílias de fraturas do maciço rochoso da área de estudo, os resultados a seguir apresentam interpretações realizadas a partir dos diferentes métodos geofísicos aplicados no estudo confrontados com a análise estrutural. A discussão dos resultados foi separada por alvo de estudo, entretanto, a análise estrutural foi utilizada em ambos os alvos devido a proximidade dos empreendimentos mineiros e o afloramento utilizado para análise estrutural.

O contexto geológico estrutural do maciço rochoso da área foi fundamental para realizar interpretações de feições obtidas nos estratos sísmicos fornecidos pela técnica de tomografia de refração sísmica. Os resultados dos ensaios sísmicos realizados no afloramento de maciço rochoso fraturado (Linha 4) foram utilizados como orientador para as demais interpretações, uma vez que neste ponto os ensaios sísmicos, de acordo com as sondagens geológicas, foram praticamente executados sobre a rocha. O padrão das estruturas, especialmente as fraturas de alto grau, permitiram interpretar as anomalias obtidas na seção sísmica.

### 10.2.1 BARRAGEM DE REJEITO

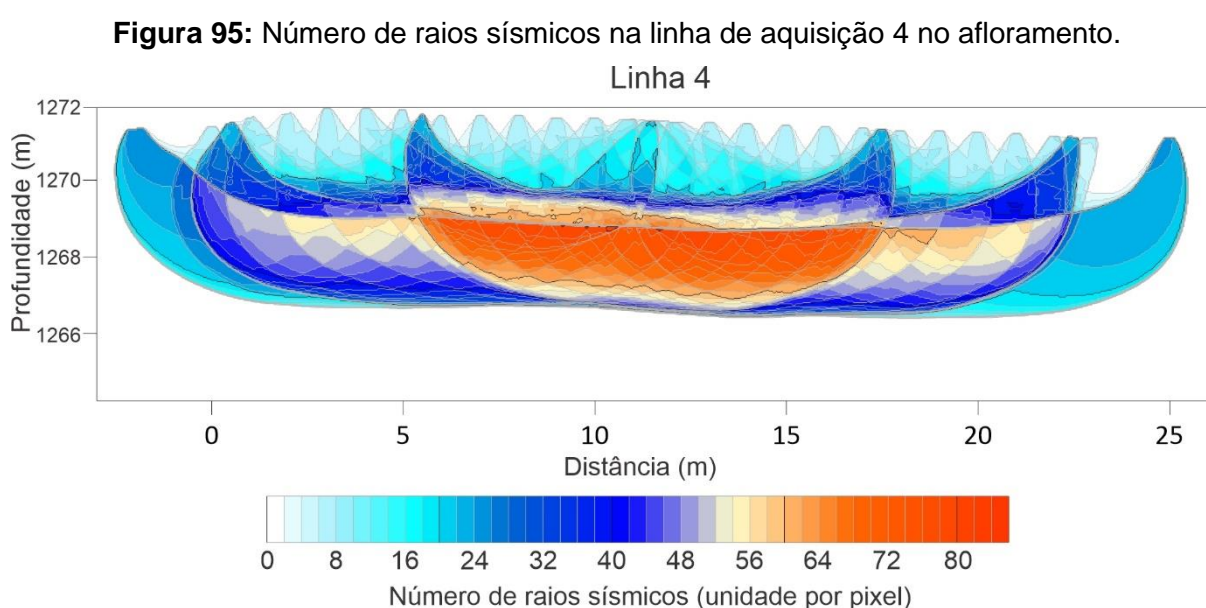
O resultado da SRT realizado no afloramento próximo a base do talude de jusante do barramento permitiu interpretar três camadas com velocidades de onda P ( $V_p$ ) (Figura 94). A camada mais superficial, com valores de  $V_p$  até 1.700 m/s, é condizente com o solo típico encontrado nas sondagens geológicas realizadas na área. Sob a camada de solo foram observados valores mais elevados de  $V_p$ . Esses valores variaram entre 2.700 m/s e 5.400 m/s. Ambos os valores de  $V_p$  são coerentes com os valores de maciços rochosos. Por se tratar do mesmo material, confirmado pelo mapeamento e sondagens geológicas, o grau de fraturamento da rocha é o principal parâmetro para a variação nos valores de  $V_p$  encontrados na SRT. A projeção dos fraturamentos de alto ângulo bem marcados no maciço rochoso (a-a') e a seção SRT sugerem que as anomalias verticalizadas da seção SRT foram observadas no posicionamento do padrão de fraturamento de alto ângulo do maciço.

**Figura 94:** Levantamento estrutural e SRT no afloramento de maciço rochoso.



Fonte: Guireli Netto et al. (2023).

A distribuição dos raios sísmicos na linha de aquisição próxima ao maciço rochoso (linha 4) apresentou uma boa área de cobertura (Figura 95). Nessa linha de aquisição, devido a ausência de elementos que pudessem causar anisotropias, como grandes blocos de rochas, foi observada a maior quantidade de raios sísmicos ao longo da linha de aquisição em relação aos outras linhas realizadas. Especialmente nas profundidades identificadas como a presença de rocha, alterada ou não, pelas sondagens geológicas realizadas na área, a quantidade de raios sísmicos foi alta, o que assegura as interpretações realizadas (Figura 95).

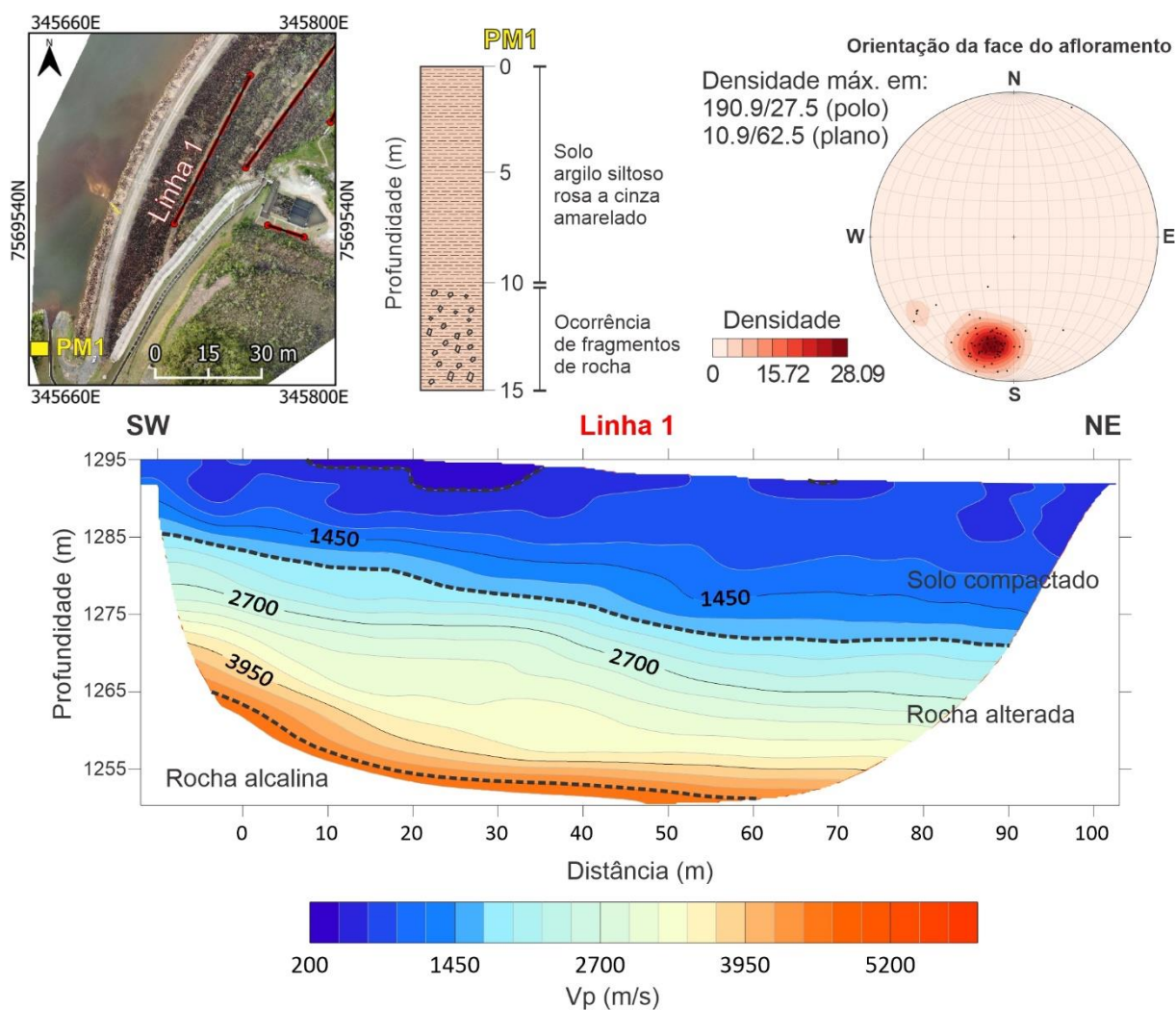


**Fonte:** Guireli Netto et al. (2023).

A linha 1, realizada na berma mais elevada topograficamente e mais distante do embasamento rochoso, apresentou resultados condizentes com a seção típica do barramento. Foram observados valores de  $V_p$  (até 1.700 m/s) associados com o solo compactado do corpo da barragem. Devido as questões fisiográficas, ocorreu um aumento da espessura dessa camada conforme houve um afastamento da região de contato da ombreira com o relevo natural (Figura 96).

A orientação dos estratos sísmicos foi condizente com a direção e ângulo de mergulho da superfície do afloramento. Essa interpretação, além de ser visível no resultado geofísico, foi assegurado pela descrição geológica de um poço localizado na ombreira direita do barramento. Na profundidade de 10 metros foram observados fragmentos de rocha na descrição deste poço. A presença deste material nessa profundidade ocorre devido ao ângulo de mergulho da rocha alcalina na área.

**Figura 96:** Resultados da SRT obtidos na linha 1 do corpo do barramento.



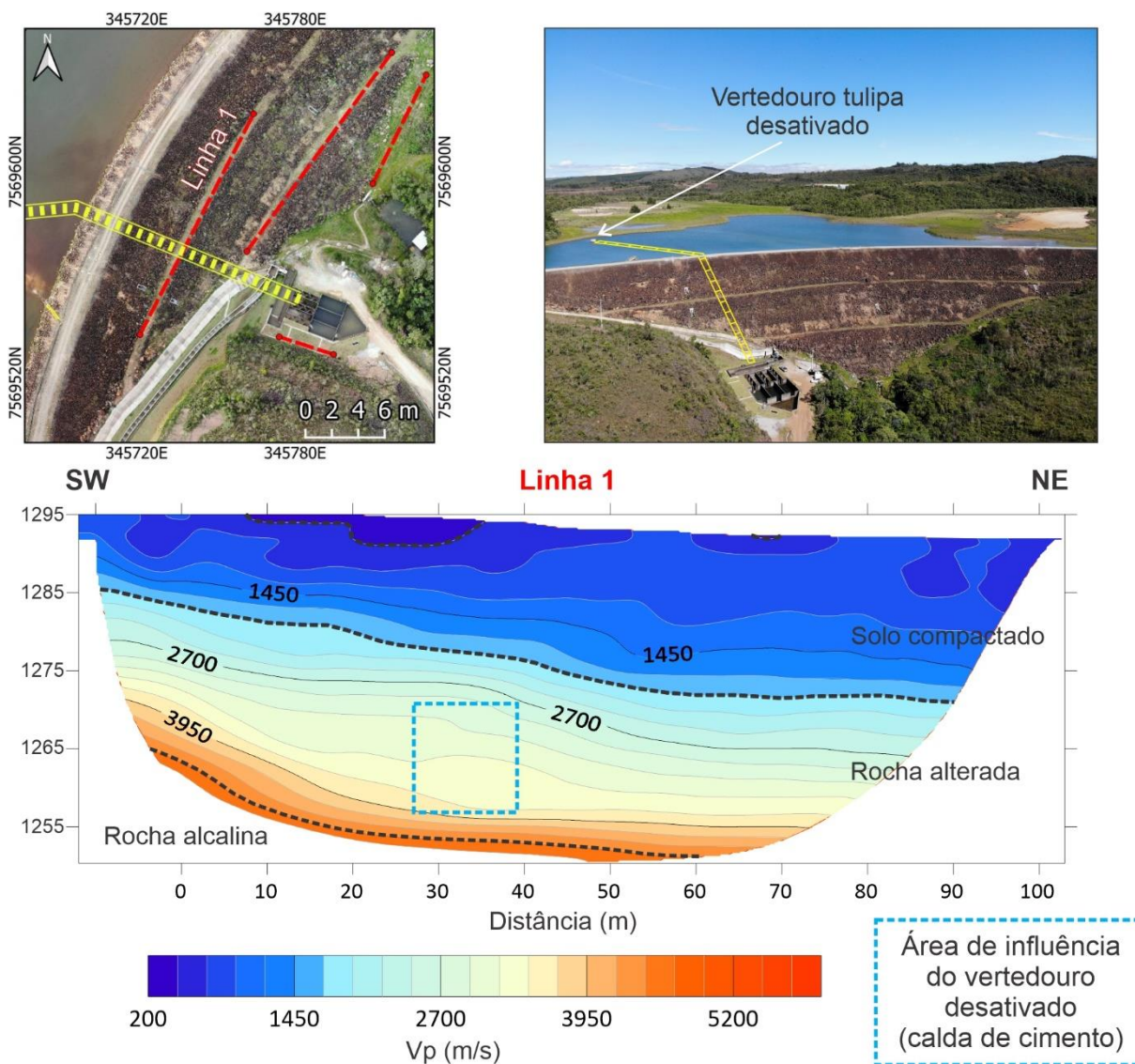
**Fonte:** Guireli Netto et al. (2023).

Foi identificado na linha 1 um comportamento anômalo entre as distâncias de 30 metros e 35 metros na seção SRT. Os estratos sísmicos, ao atingir essa localidade, alargaram e curvaram. Após a posição de 40 metros na seção SRT, os estratos voltaram ao comportamento horizontalizado (Figura 97). Esse tipo de comportamento no registro sísmico de refração é um indicativo de mudança da propriedade elástica do material. Parte das mudanças no comportamento elástico está relacionada com variações dos materiais geológicos. Como o estudo foi realizado no corpo de uma barragem, a presença de estruturas hidráulicas, como drenos ou vertedouros, preenchidos com materiais diferentes do corpo do barramento podem ser um indicativo do observado no registro sísmico.

Através do registro histórico das atividades operacionais e de manutenção realizadas no barramento, foi observado que justamente neste ponto o antigo

vertedouro, atualmente desativado, cruzava a seção horizontalmente e em profundidade (Figura 97). A estrutura hidráulica foi preenchida com calda de cimento, entretanto, as diferenças elásticas entre os materiais (cimento e rocha) foram suficientes para causar variações do comportamento da onda sísmica no meio físico e, portanto, foram registradas pelo método.

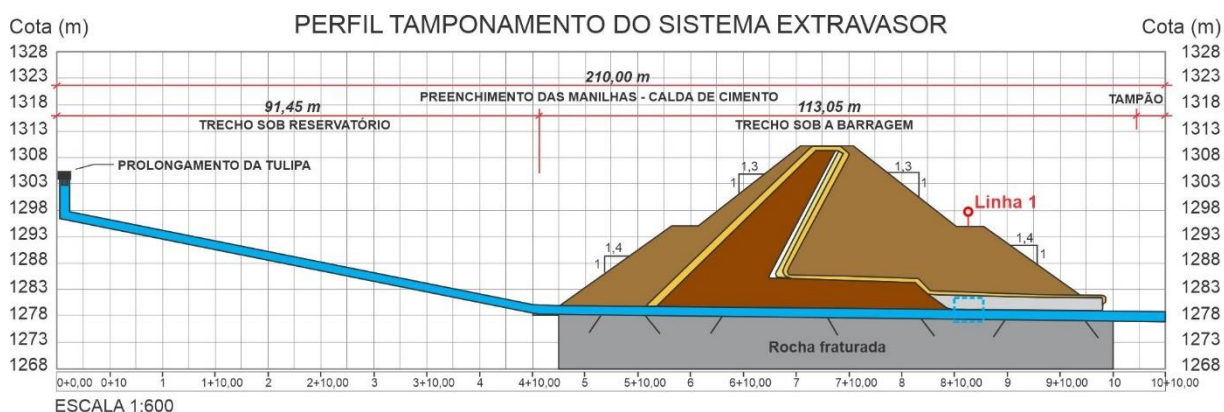
**Figura 97:** Posicionamento do vertedouro desativado em superfície e o resultado sísmico.



**Fonte:** modificado de Gureli Netto et al. (2023).

O perfil de tamponamento do sistema extravasor fornecido pela INB comprova a influência da estrutura hidráulica preenchida por calda de cimento na profundidade registrada pelo método sísmico (Figura 98).

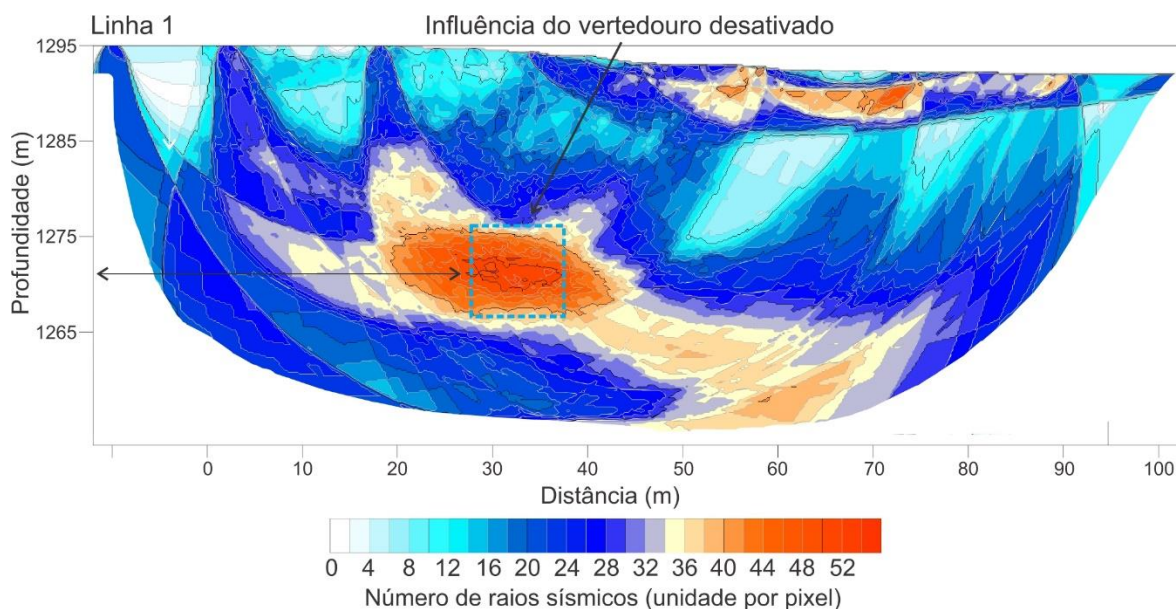
**Figura 98:** Perfil de tamponamento do antigo sistema extravasor da barragem de armazenamento de rejeito de urânio.



**Fonte:** dados fornecidos pela INB.

A distribuição dos raios sísmicos em profundidade mostrou uma boa quantidade de raios inclusive nas porções mais profundas, abaixo da localização do sistema de drenagem desativado constituído por calda de cimento (Figura 99). Entretanto, o comportamento dos raios sísmicos deixou evidente a influência da diferença de material e, portanto, diferentes componentes elásticos, neste ponto.

**Figura 99:** Número de raios sísmicos na linha de aquisição 1 no barramento.

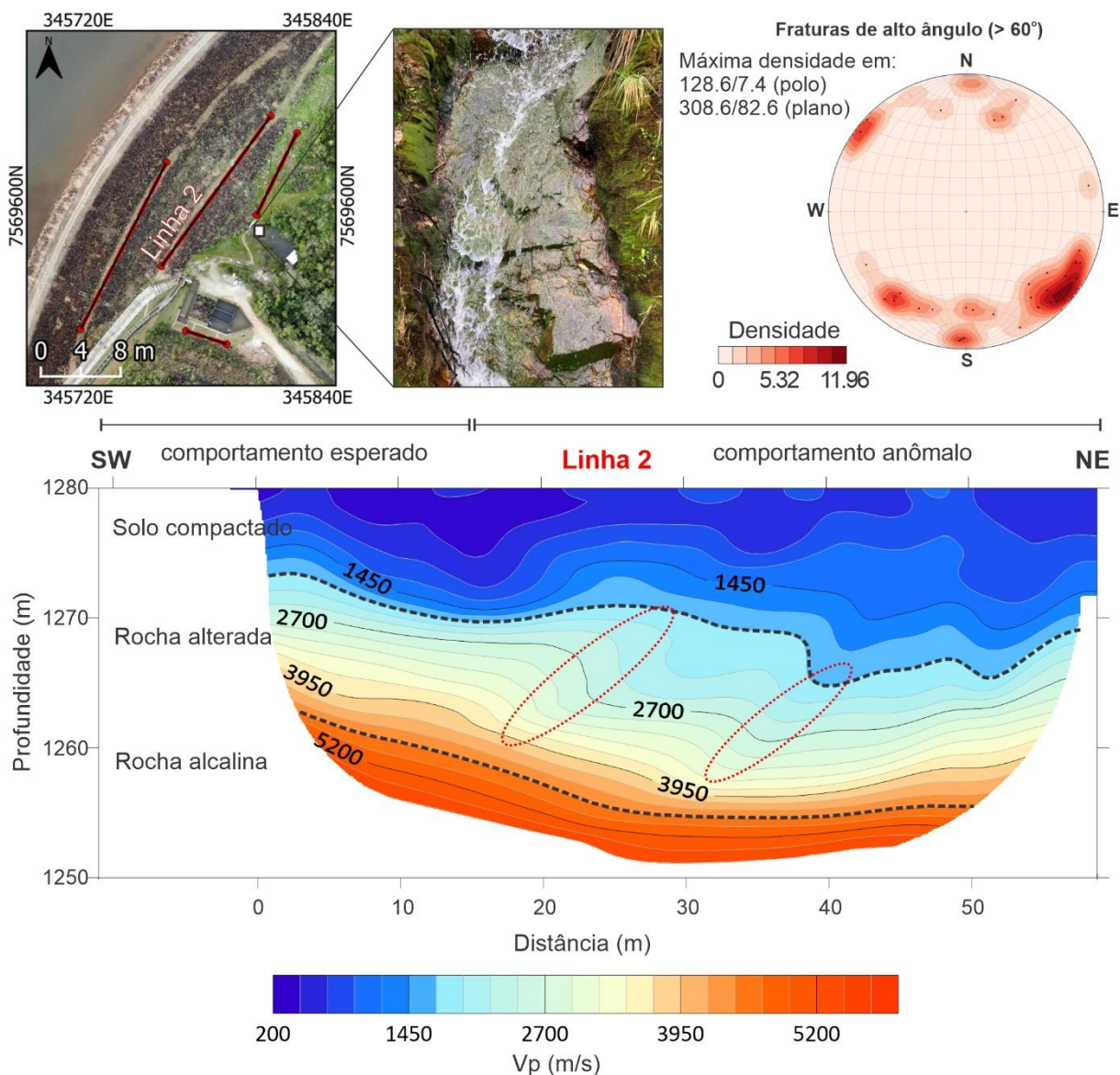


**Fonte:** dados da pesquisa.

A linha 2, realizada topograficamente na berma mais baixa (2ª berma) e próxima ao maciço rochoso, também apresentou resultados consistentes com a seção típica da barragem (Figura 100). Entre as distâncias de 0 m - 15 metros, a seção SRT

apresentou estratos sísmicos horizontalizados. Nesse intervalo, não foram observadas grandes variações nos valores de  $V_p$  da rocha intemperizada. Esse padrão nos dados sísmicos foi chamado de comportamento "normal".

**Figura 100:** Resultados da SRT obtidos na linha 2 do corpo do barramento.



Fonte: Guireli Netto et al. (2023).

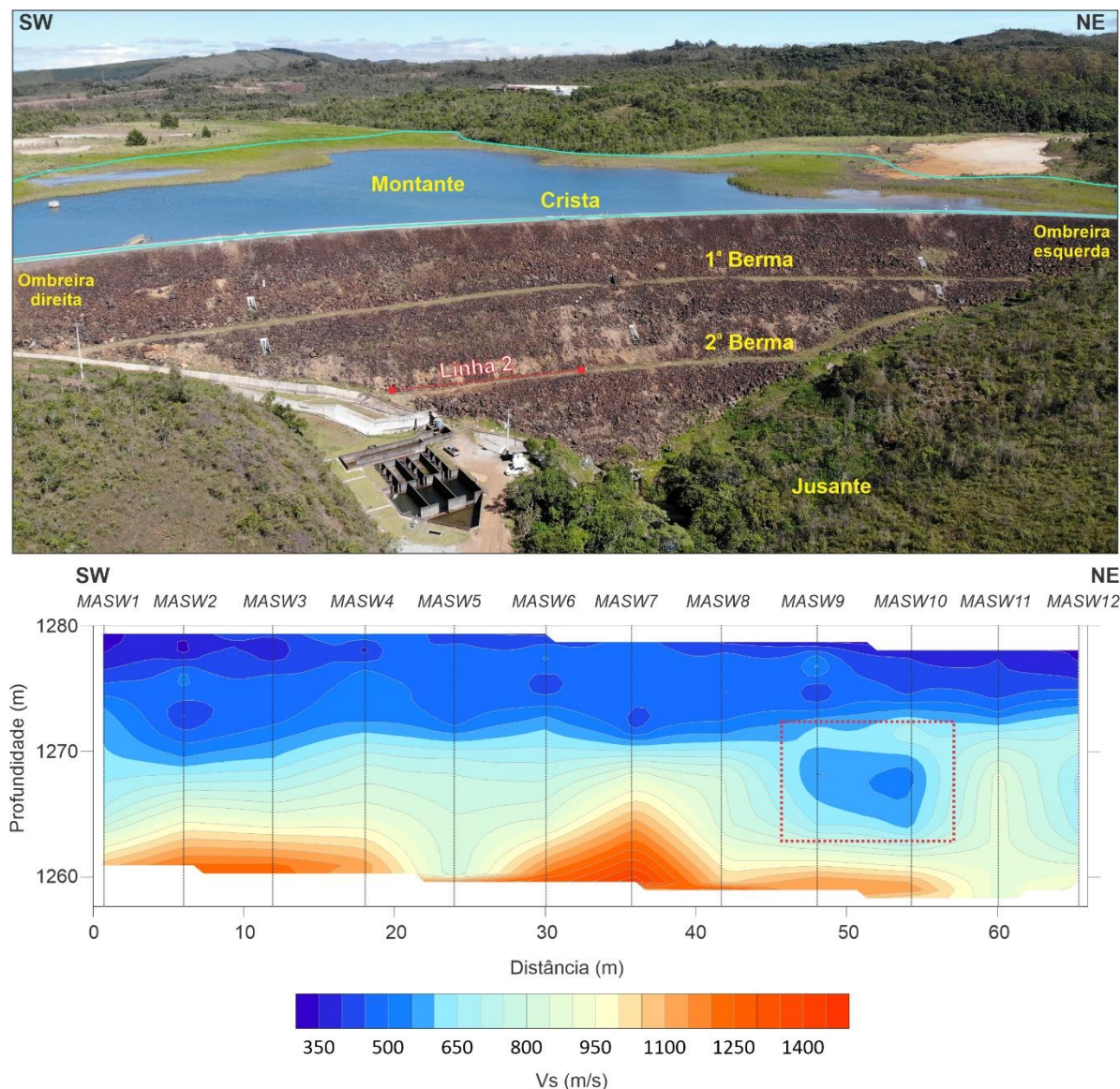
Após esse intervalo, especialmente entre as distâncias de 20 metros e 35 metros, o padrão dos estratos sísmicos mudou. Os valores de  $V_p$  nesta localidade são indicativos de rocha intemperizada. Nessa região, de acordo com o trecho típico da barragem, na profundidade de 9 metros foi instalado um filtro para liberação de água. Esta estrutura horizontal é composta por areia. O ponto de extravasamento foi observado em campo e no momento da aquisição sísmica o fluxo de água nesta

estrutura hidráulica foi constante. Diversos estudos sísmicos sobre o comportamento de ondas de compressão em solos saturados ou rochas fraturadas com preenchimento de água nas fraturas foram desenvolvidos nos últimos anos (FOTI et al., 2002; BERRYMAN, 2007). Alguns estudos apresentaram valores de  $V_p$  próximos a 1.500 m/s para solos saturados (GRELLE & GUADAGNO, 2009). A presença do filtro de areia saturada de 4 m de espessura pode ter sido um elemento condicionante na propagação da onda de compressão nessa profundidade e pode ser uma das hipóteses para o aumento da espessura dos estratos sísmicos com valores de  $V_p$  próximos a 1.450 m/s e 1.700 m/s nesta profundidade.

Os resultados das variações das velocidades da onda sísmica obtidas pelo MASW na região da 2ª berma também sugeriram a presença de heterogeneidades no solo compactado e na camada de rocha alterada. Isso reforça a hipótese da presença de zonas com diferentes densidades e rigidezes nesse ponto (Figura 101). Os resultados apresentaram uma anomalia na região nordeste (NE) da linha de aquisição, próxima a região de comportamento anômalo dos estratos sísmicos obtidos pela tomografia tomografia de refração sísmica. Nesse ponto foram observados valores menores de velocidade da onda sísmica ( $V_s$ ) no contato do corpo e fundação do barramento (Figura 101).

A presença de rocha alterada com alto grau de fraturamento pode reduzir as velocidades sísmicas detectadas, independentemente da compactação do solo acima, uma vez que as fraturas nas rochas criam zonas de fraqueza as quais diminuem a velocidade de propagação das ondas sísmicas. A presença de fraturas na rocha também podem servir como caminhos preferenciais para a infiltração de água, o que pode contribuir para uma diminuição adicional das velocidades sísmicas na região anômala.

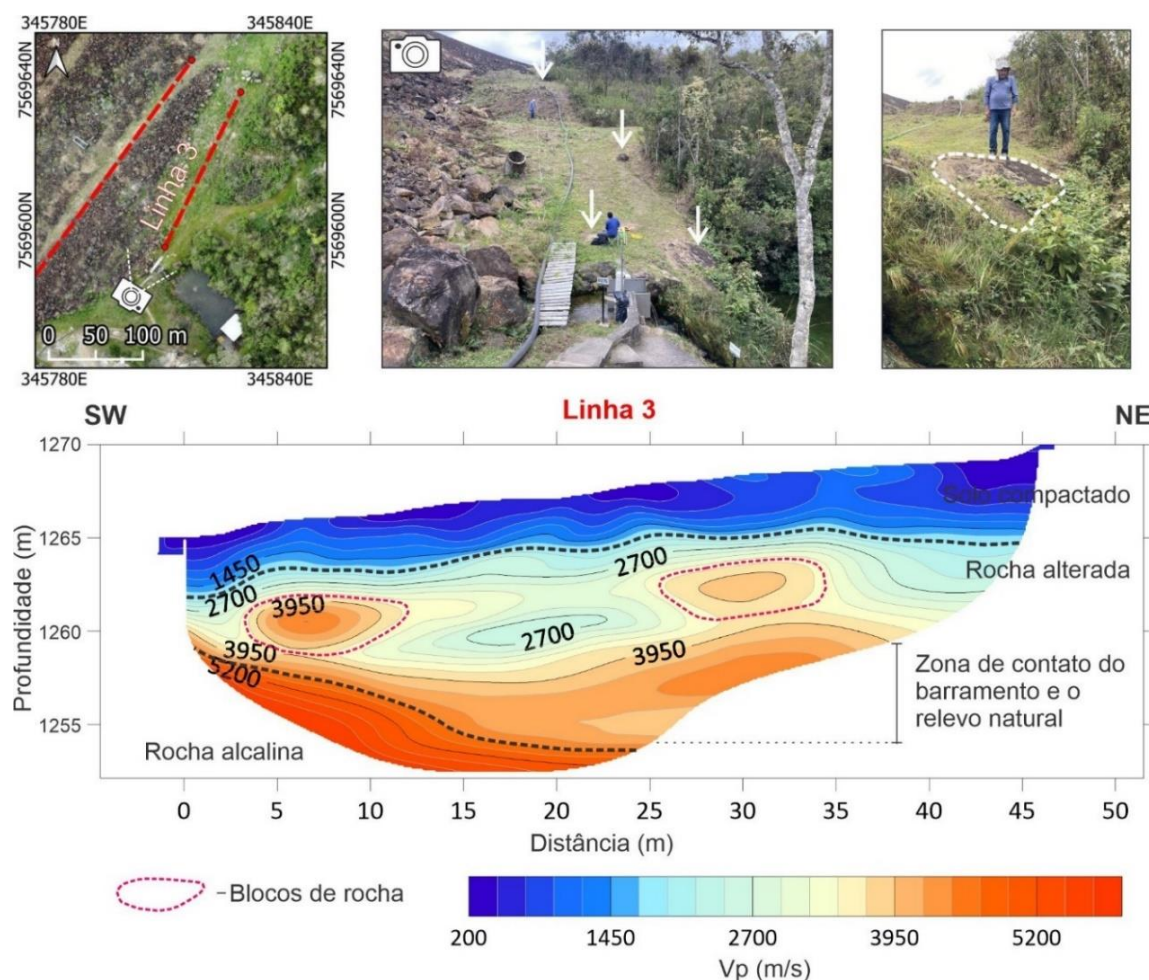
**Figura 101:** Posições dos MASW 1D interpolados para resultar em um MASW 2D na linha de aquisição da 2ª berma do talude de jusante do barramento.



**Fonte:** dados da pesquisa.

Na investigação realizada na região da base do talude de jusante, a seção SRT da linha 3 apresentou duas anomalias ovaladas próximas a profundidade de 5 metros com valores de  $V_p$  entre 3.250 m/s e 3.950 m/s, circulas em rosa na Figura 102. As anomalias foram associadas com a presença dos diversos matacões entre o contato do barramento e o relevo natural. Estudos recentes de geotecnia e geologia de engenharia associadas a investigações sísmicas de refração mostraram ser viável o uso da metodologia na determinação destes elementos geológicos, principalmente em linhas de aquisições com quantidade considerável de ondas sísmicas (SARI et al., 2020; BENJUMEA et al., 2021).

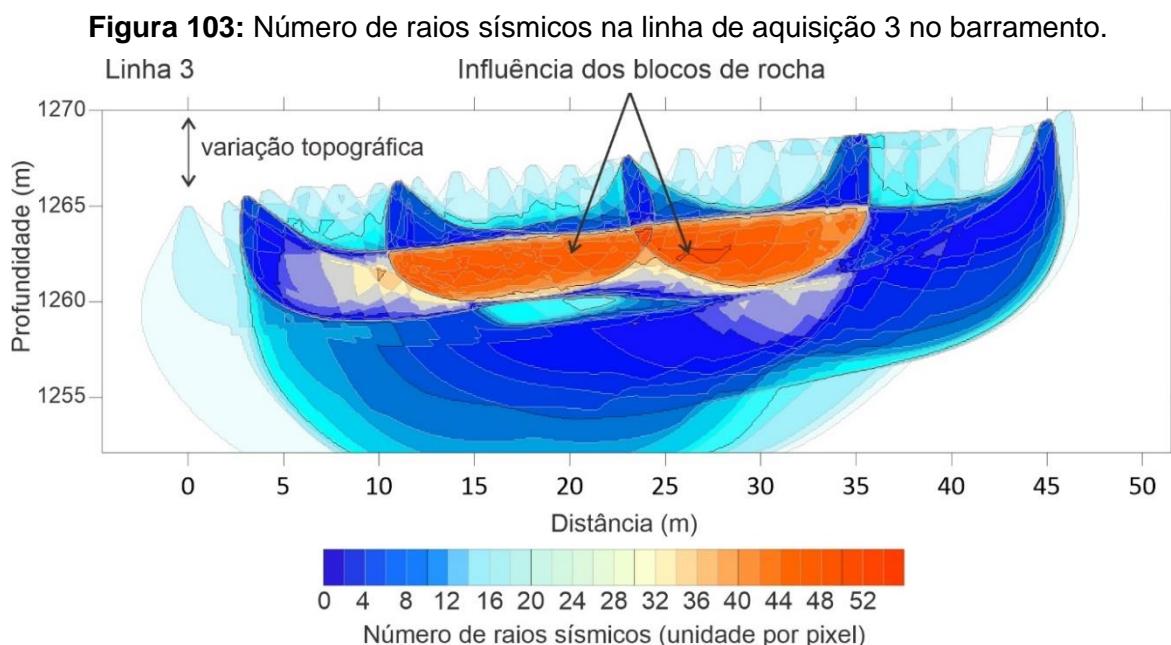
**Figura 102:** Resultados da SRT obtidos na linha 3 do corpo do barramento.



**Fonte:** Guireli Netto et al. (2023).

Uma possível justificativa para os resultados obtidos é o posicionamento da linha 3. A linha de aquisição localizada na base do talude de jusante foi realizada em uma área com fina camada de solo. Durante a visita técnica na área de estudo, foram observados afloramentos próximos a base do barramento, bem como a presença de blocos (matacões) os quais evidenciaram a presença de rocha neste ponto. Era desejável a presença rasa do maciço rochoso para avaliar a capacidade da técnica SRT em identificar alterações no comportamento dos estratos sísmicos que pudessem ser associadas com o padrão estrutural de maciço rochoso posicionado sob o barramento. Embora os blocos de rocha próximos a profundidade de 5 metros sejam um elemento geológico que interfere na propagação da onda sísmica compressional no meio físico, a linha de aquisição com geofones espaçados em 1 metro foi robusta. A seção com a disposição do número de raios sísmicos em profundidade mostrou uma

boa quantidade de raios inclusive nas porções mais profundas, abaixo da localidade dos blocos de rocha (Figura 103).



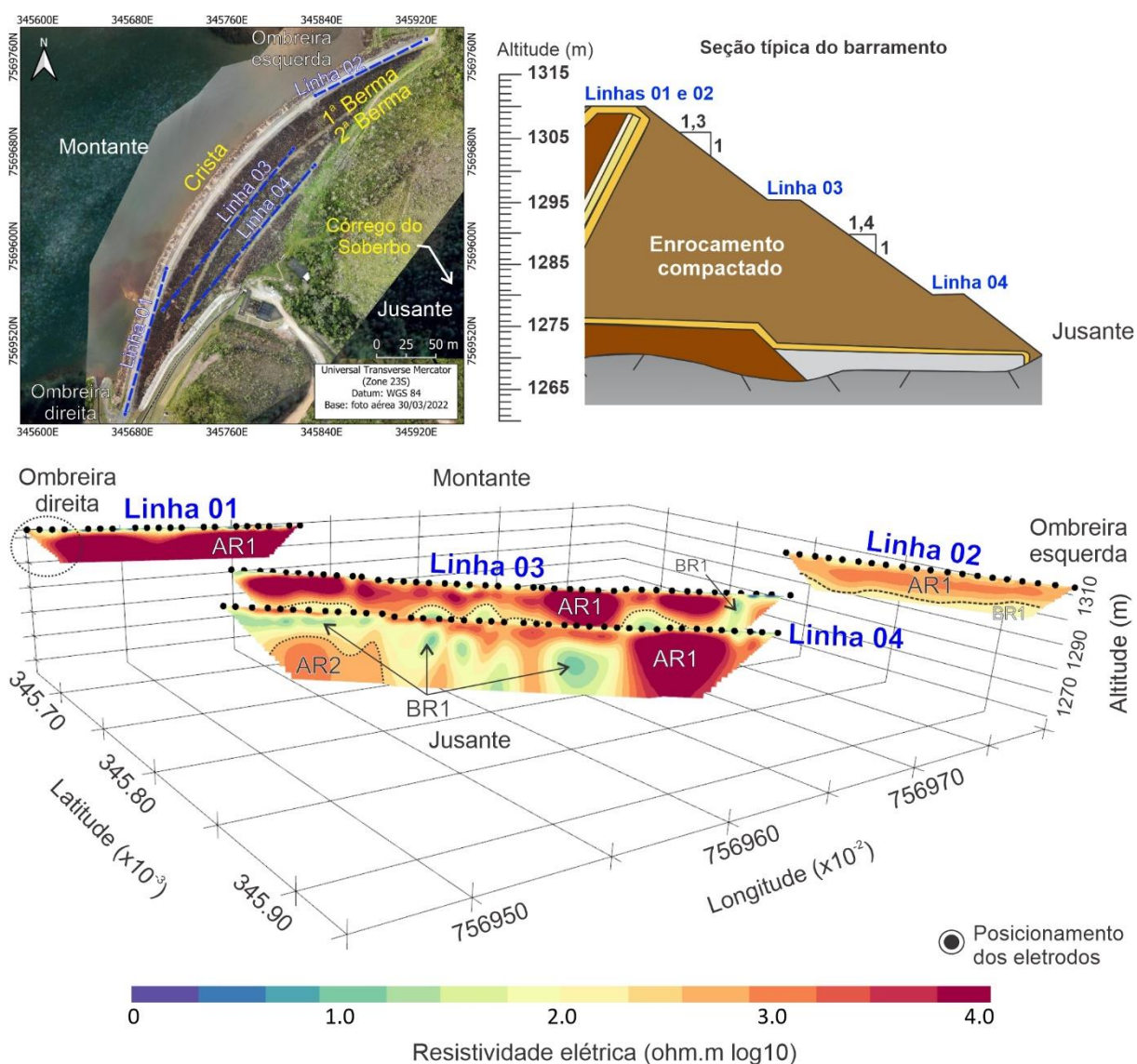
**Fonte:** dados da pesquisa.

Os resultados da ERT realizados na crista e nas bermas do corpo do barramento apresentaram a distribuição dos valores de resistividade elétrica ao longo das linhas de aquisições e em diferentes níveis de profundidade (Figura 104). Os resultados foram comparados com informações geotécnicas, como a seção típica do barramento, e geológicas, como sondagens realizadas na área e a análise estrutural. De maneira geral, foram observados altos valores de resistividade elétrica nas linhas realizadas na crista do barramento (AR1), enquanto que nas linhas realizadas nas bermas do barramento foram observados os altos valores de resistividade elétrica nas camadas mais superficiais e zonas anômalas de baixa resistividade. Este cenário pode ser um indicativo da presença de fraturamento no maciço rochoso da fundação do barramento preenchidos com água.

Na linha 01, localizada no setor da ombreira direita, foram observados valores eletricamente mais resistivos ao longo de toda a seção, possivelmente devido aos materiais do enrocamento, compostos por blocos de rochas. Foram observados também valores mais condutivos próximos ao contato entre o corpo do barramento e o relevo natural (circulado em preto na Figura 104). Em estudos geoeletricos de barramentos, esse tipo de comportamento é encontrado pois o contato entre o relevo

natural e o solo compactado do corpo do barramento é geotecnicamente considerado uma zona de fraqueza. Os aspectos fisiográficos dessa região e a dificuldade em misturar diferentes materiais torna a área um ponto de estudo importante em estudos de engenharia de barragem, uma vez que problemas de compactação podem resultar em caminhos facilitadores para a percolação da água precipitada e infiltrada no solo (FELL et al., 2005; CAMARERO et al., 2019; MOREIRA et al., 2022).

**Figura 104:** Disposição 3D das linhas ERT e a seção típica do barramento.



**Fonte:** dados da pesquisa.

Na linha 02, localizada no setor da ombreira esquerda, também foram observados valores eletricamente mais resistivos ao longo de toda a seção ERT. Entretanto, não foram identificados valores mais condutivos no contato da ombreira e

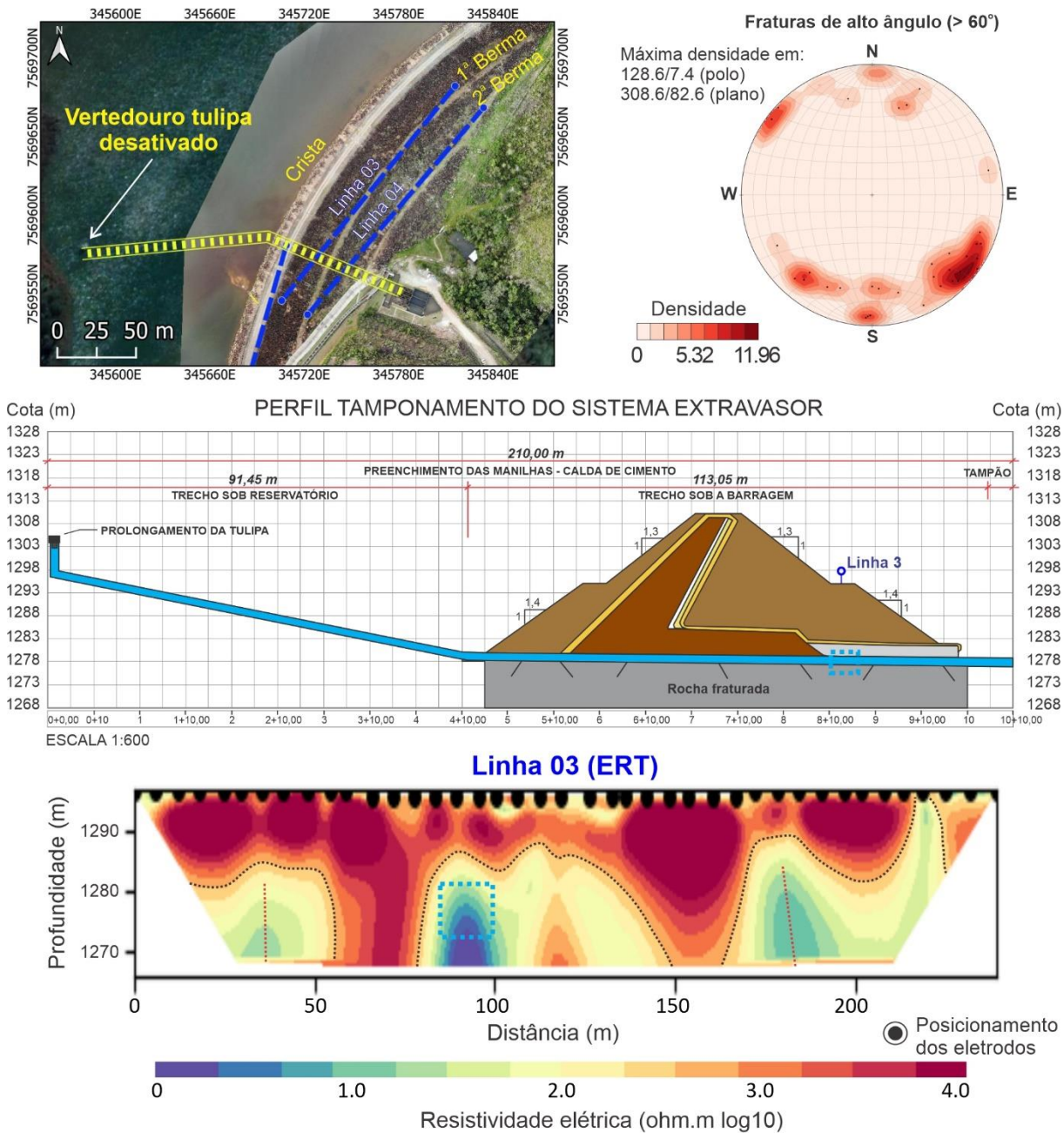
o relevo natural. Os valores mais resistivos (AR1) foram observados nas camadas mais superficiais com uma diminuição dos valores em profundidade a partir da cota de 1305 metros possivelmente associada com a mudança do material do corpo do barramento (Figura 104). As maiores variações dos valores de resistividade elétrica (BR1) foram observadas nas linhas 03 e 04, localizadas nas 1ª e 2ª bermas do barramento respectivamente. O entendimento dessas alterações foi realizado a partir da comparação dos dados entre as duas linhas, e a interpretação conjunta dos resultados sísmicos e análise estrutural.

Os valores de resistividade elétrica da linha 03 apresentaram um comportamento mais resistivo na camada mais rasa, entre as cotas de 1295 m e 1280 m, e mais condutivos em profundidades maiores (Figura 105). Entretanto, entre as distâncias laterais de 85 metros e 90 metros, foi observada uma anomalia elétrica condutiva de comportamento verticalizado em profundidade. Nessa localidade foi instalado, e posteriormente preenchido com calda de cimento, o antigo vertedouro do corpo do barramento. As diferenças de condutividades elétricas entre o material do barramento e o utilizado no preenchimento foi sensível ao método de eletroresistividade. Os resultados da linha 04 também apresentaram o mesmo comportamento no ponto de posicionamento do antigo vertedouro sob o barramento. Esse resultado reforçou a hipótese de sensibilidade do ERT para identificação da estrutura hidráulica desativada. A ausência de anomalias condutivas sob esse ponto podem indicar que a estrutura está devidamente vedada, uma vez que possíveis vazamentos, caso sensíveis ao método, acusariam anomalias condutivas, devido ao preenchimento dos poros do solo pela água (MICKUS, 2021).

A partir da cota de 1280 metros, de acordo com as sondagens geológicas da área de estudo ocorrem fragmentos de rocha na composição do solo. A presença de fragmentos de rocha próximos à rocha mãe é um indicativo da alteração do maciço rochoso nesta profundidade. As anomalias condutivas observadas apresentaram uma geometria ovalada e orientada de acordo com as fraturas de alto ângulo do maciço rochoso (linhas tracejadas em vermelho na Figura 105). As anomalias elétricas condutivas orientadas de acordo com o padrão de fraturamento de alto ângulo do maciço rochoso também foram observadas nos resultados da linha 04. Como a água preenche os espaços das fraturas, o meio físico constituído por rocha alterada apresenta resposta eletricamente mais condutiva (BINLEY & KEMNA, 2005). O resultado obtido pelo método geoeletrico reforçou as interpretações realizadas com o

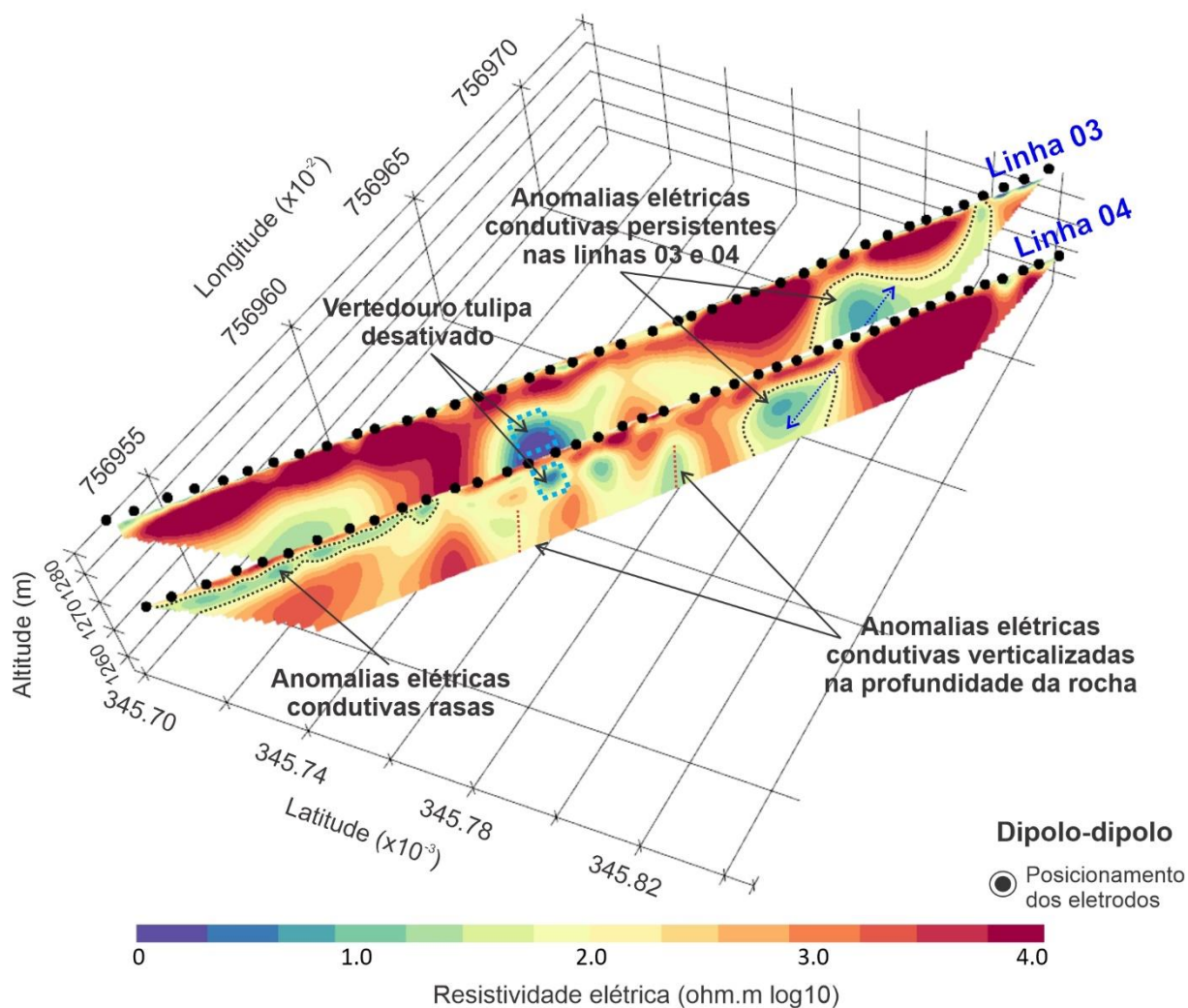
uso do método sísmico de refração e a análise estrutural do maciço rochoso da fundação do barramento.

**Figura 105:** Linha ERT 03 comparada com a seção típica do barramento e a o perfil de tamponamento do sistema extravasor.



Fonte: dados da pesquisa.

**Figura 106:** Resultado das linhas ERT 03 e 04.



**Fonte:** dados da pesquisa.

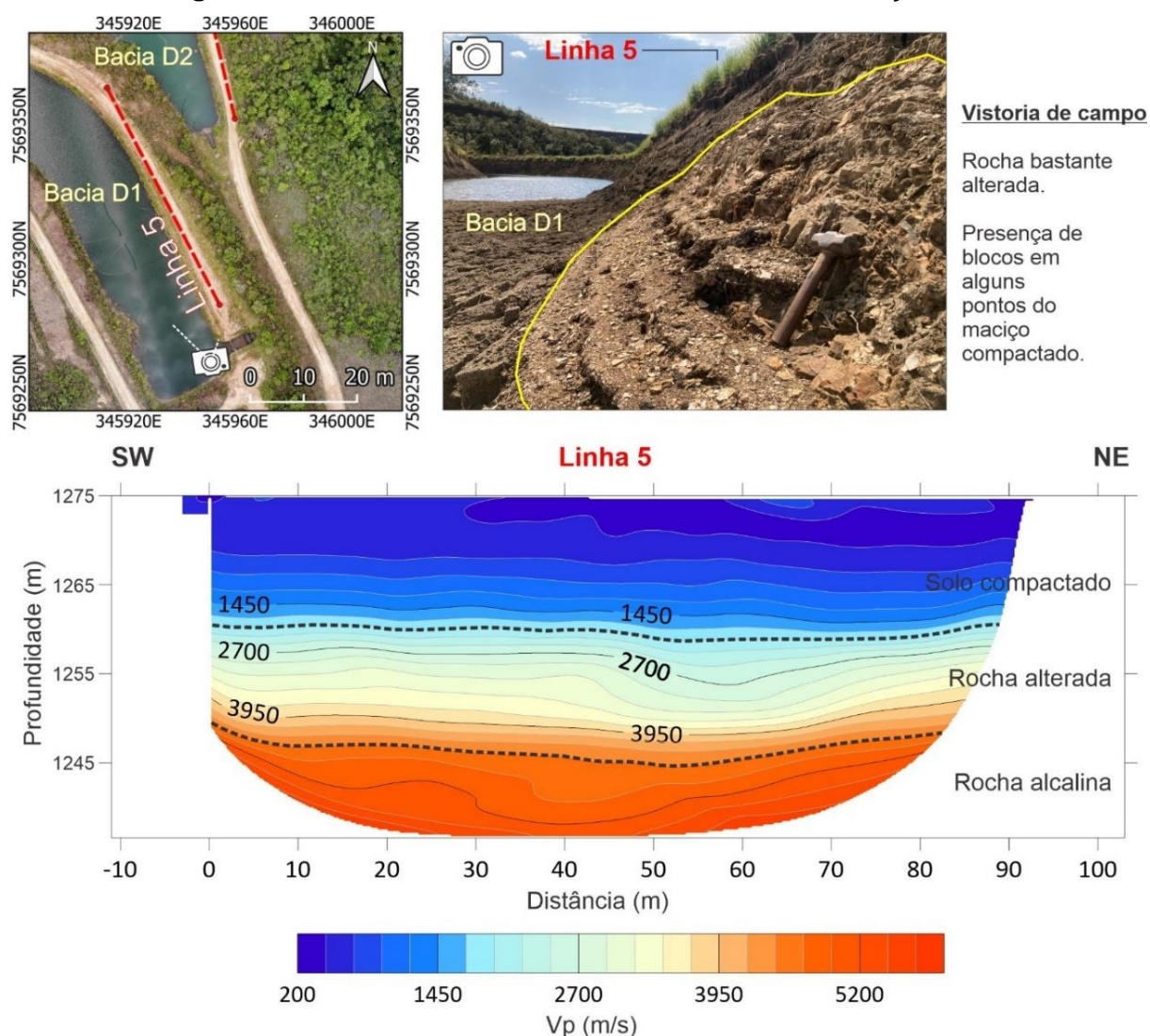
### 10.2.2 BACIAS DE DECANTAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

Os ensaios geofísicos realizados nas bacias de decantação de águas ácidas ocorreram no período de seca na região da UTM – Caldas. Estruturas importantes presentes na área das bacias foram identificadas e anotadas durante a visita técnica, como a presença e a continuidade em subsuperfície de estruturas hidráulicas responsáveis por conectar tanto o barramento a bacia D1 como interligar as bacias D1 e D2. Os resultados de todas as aquisições geofísicas realizadas na área das bacias D1 e D2 foram confrontados com as informações obtidas em afloramentos e no mapeamento estrutural realizados em campo.

A linha 5 de SRT, localizada na crista do material compactado responsável por separar as duas bacias de contenção de águas ácidas, apresentou variações nos

valores de  $V_p$  nos estratos sísmicos em profundidade (Figura 107). Na camada mais superficial foram observados valores de  $V_p$  até 1.700 m/s. Esse valor foi condizente com o solo compactado encontrado nas sondagens geológicas realizadas na área. Sob a camada de solo foram observados valores mais elevados de  $V_p$ . Os valores de  $V_p$  entre 2.700 m/s e 4.200 m/s, obtidos entre as cotas de 1260 metros e 1250 metros, foram interpretados como a presença da rocha alcalina bastante alterada. Os valores mais elevados de  $V_p$ , superiores a 4.200 m/s foram associados a presença da rocha alcalina fraturada.

**Figura 107:** Resultados da SRT obtidos na linha 5 no maciço da bacia D1.



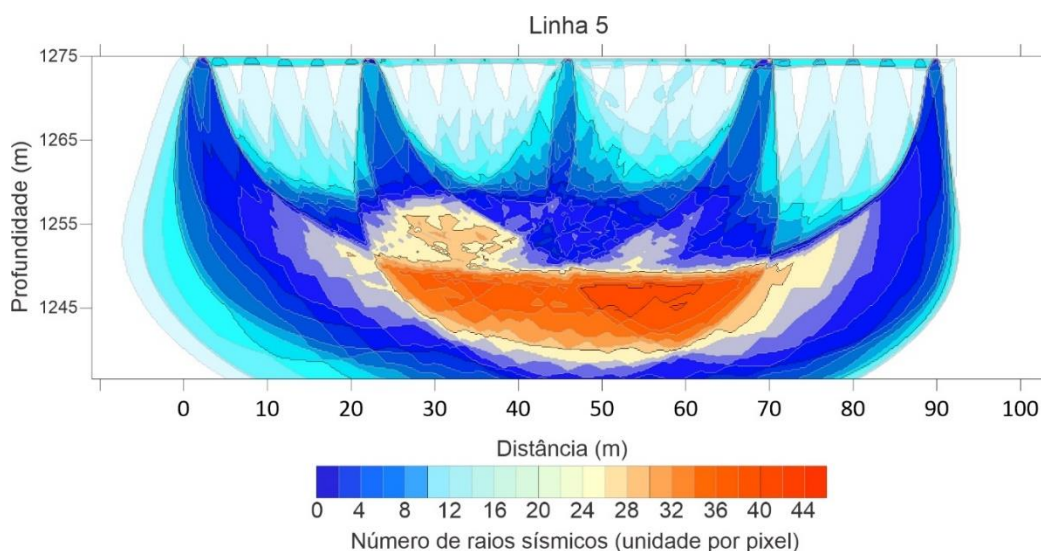
**Fonte:** dados da pesquisa.

A interpretação dos dados sísmicos de refração referentes a presença de rocha alterada foi comprovada com a vistoria em campo (Figura 107). Devido ao baixo nível

do reservatório, durante a aquisição de dados foi possível entrar no reservatório da bacia D1 na região próxima ao vertedouro para registro fotográfico do corpo do maciço de solo compactado responsável por represar as águas. Dessa maneira, foi possível observar a presença de rocha alterada em diferentes pontos do corpo do maciço de solo compactado tanto lateralmente como em profundidade.

A distribuição dos raios sísmicos na linha 5 foi uniforme (Figura 108). Foi observada uma boa distribuição dos raios sísmicos em profundidade e lateralmente. Diferentemente dos resultados observados em outras linhas SRT deste estudo (linhas 1 e 3, por exemplo), os quais apresentaram elementos geológicos ou estruturas hidráulicas ao longo da aquisição, como blocos de rocha ou sistema de drenagens internos. A maior concentração de raios sísmicos ocorreu a partir da cota de 1255 metros. Essa profundidade é condizente com a presença do maciço rochoso da fundação da bacia D1 composto pela rocha alcalina. A presença da rocha alcalina nesta profundidade foi observada durante a atividade de campo devido a variação topográfica da área e exposição do elemento geológico na base da bacia D2.

**Figura 108:** Número de raios sísmicos na linha de aquisição 5 de SRT da bacia D1.

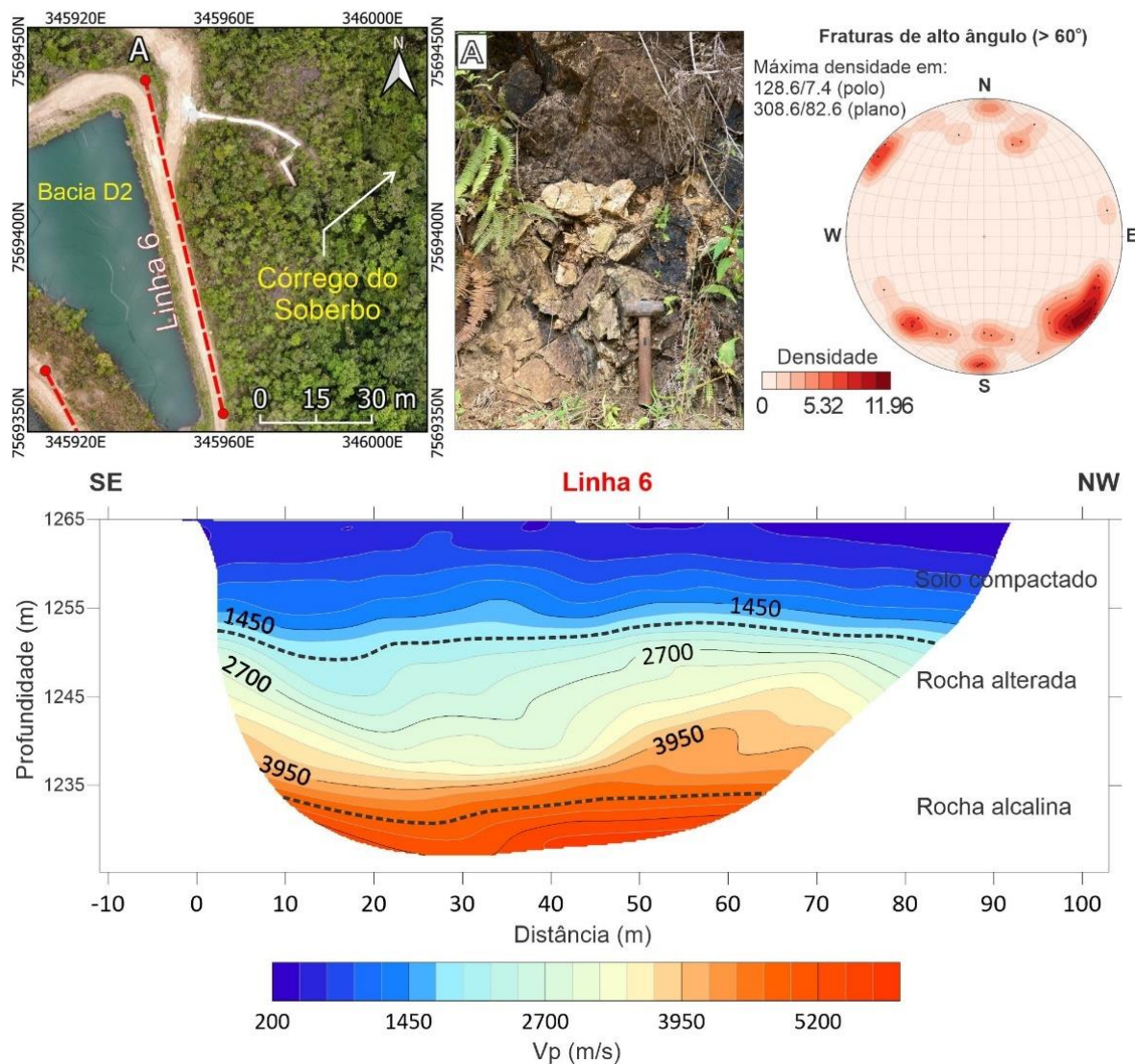


**Fonte:** dados da pesquisa.

O resultado da SRT da linha 6, realizada paralelamente ao corpo da bacia de contenção D2 e ao córrego do Soberbo, apresentou três camadas com velocidades de onda P ( $V_p$ ) bem marcadas (Figura 109). A camada mais superficial, com valores de  $V_p$  até 1.700 m/s, é condizente com o solo compactado utilizado na construção das bacias. Esse material foi encontrado durante as aquisições de campo, uma vez que o

nível do reservatório estava baixo, o que expôs o contato entre o material e a rocha alterada (saprolito).

**Figura 109:** Resultados da SRT obtidos na linha 6 no maciço da bacia D2.



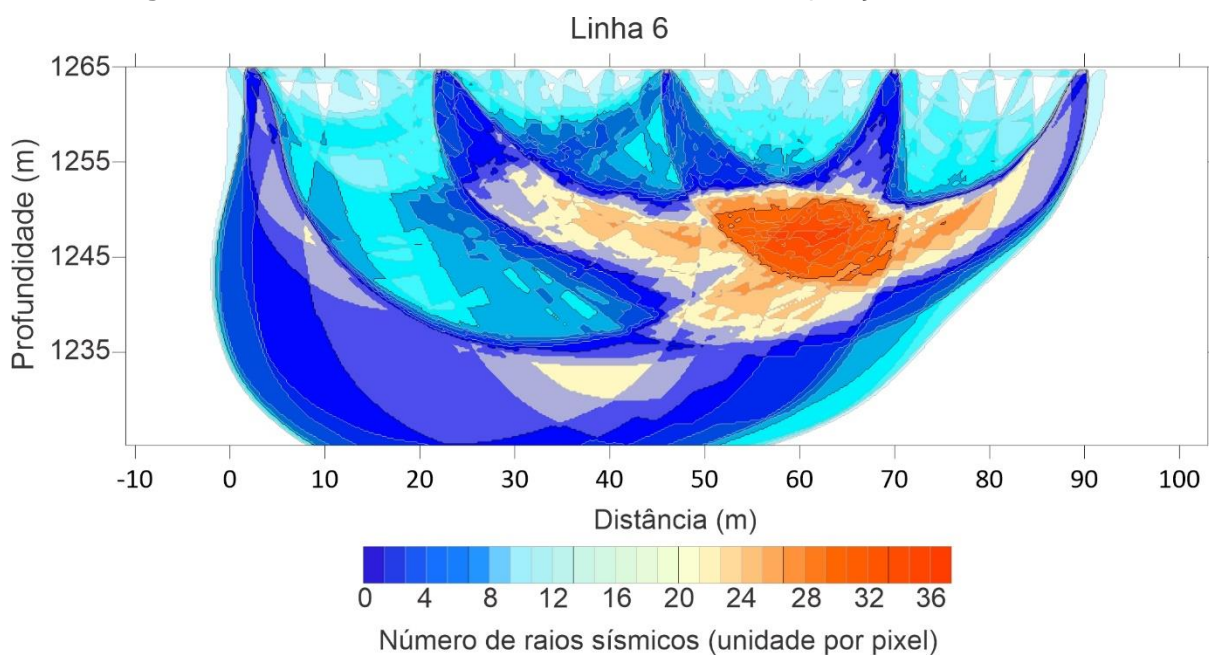
**Fonte:** dados da pesquisa.

Outro comportamento dos estratos sísmicos na crista do maciço de solo compactado da bacia D2 que mereceu destaque foi a camada interpretada como rocha alterada. Os valores de  $V_p$  (entre 1.700 m/s e 4.000 m/s) são condizentes com o material alterado. Em boa parte dessa camada, localizada entre as cotas de 1245 metros e 1240 metros, os estratos sísmicos não apresentaram comportamento horizontalizado. Esse comportamento, por exemplo, foi observado nas outras duas camadas da seção, camada mais superficial de solo compactado e na camada mais

profunda, com valores de  $V_p$  condizentes com as rochas alcalinas observadas em campo.

O comportamento anômalo dos estratos sísmicos referentes a rocha alterada (saprólito) foi intensificado e marcado na região próxima ao setor NW da seção SRT. Entre as distâncias de 50 metros e 70 metros, os estratos sísmicos apresentaram uma comportamento verticalizado. Foi identificado em campo padrão de fraturamento condizente com essa orientação e diferentes graus de fraturamento no maciço rochoso da fundação da bacia de decantação D2 (Figura 109, ponto A). A seção com a disposição do número de raios sísmicos em profundidade da linha 6 mostrou os maiores valores de quantidade de raios sísmicos condizentes com a região de comportamento anômalo dos estratos sísmicos (Figura 110).

**Figura 110:** Número de raios sísmicos na linha de aquisição 6 de SRT da bacia D2.

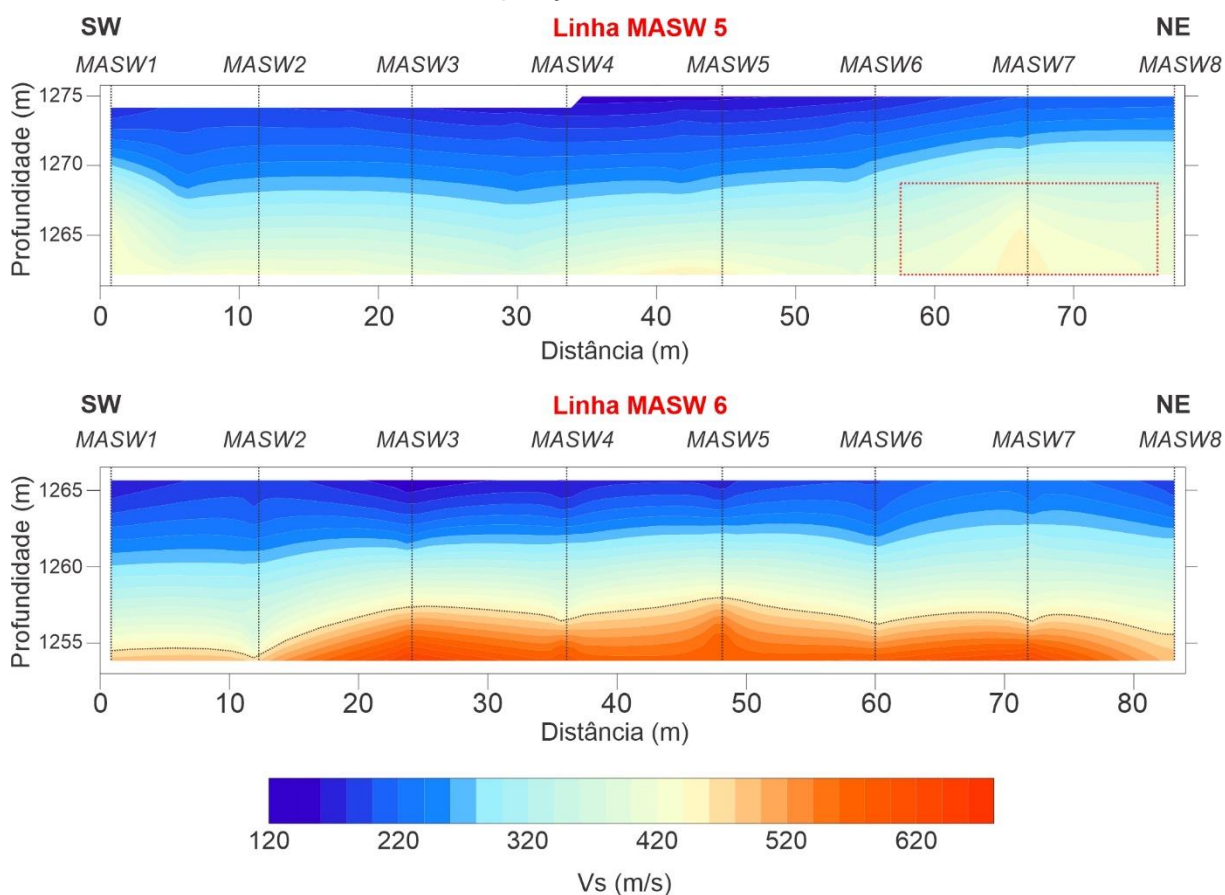


**Fonte:** dados da pesquisa.

O comportamento anômalo dos estratos sísmicos da tomografia de refração sísmica, interpretados como indicadores da presença de saprólito em diferentes zonas do corpo das bacias D1 e D2, foi coerente com os resultados das variações das velocidades da onda sísmica obtidas pelo MASW na área de estudo. Os valores de  $V_s$  das linhas MASW 5 e 6 realizadas na crista das bacias D1 e D2, respectivamente, apresentaram aumentos nas profundidades condizentes com os aumentos de  $V_p$  (Linha MASW 5 na Figura 111). Diferentemente do que foi observado nos resultados

do MASW 2, realizado na 2ª berma do barramento, onde os valores de Vs diminuíram em profundidade (Figura 101), no caso das bacias ocorre um aumento do valor de Vs em profundidade. O aumento dos valores de Vs era esperado em um resultado de MASW, uma vez que, em condições normais, os materiais tendem a serem mais rígidos e menos compressíveis com a profundidade devido ao aumento da pressão confinante e à compactação natural. Esse aumento da rigidez do material resulta em maiores velocidades das ondas de cisalhamento, já que a rigidez do material afeta diretamente a velocidade dessas ondas (Linha MASW 6 na Figura 111). A presença de saprolito, uma camada de rocha alterada por intemperismo químico que ainda preserva a estrutura original da rocha mãe, sugere que o material nessa profundidade possui uma rigidez e densidade superiores ao solo compactado do corpo da bacia.

**Figura 111:** Resultado dos MASW 1D interpolados para resultar em um MASW 2D nas linhas de aquisições das bacias D1 e D2.



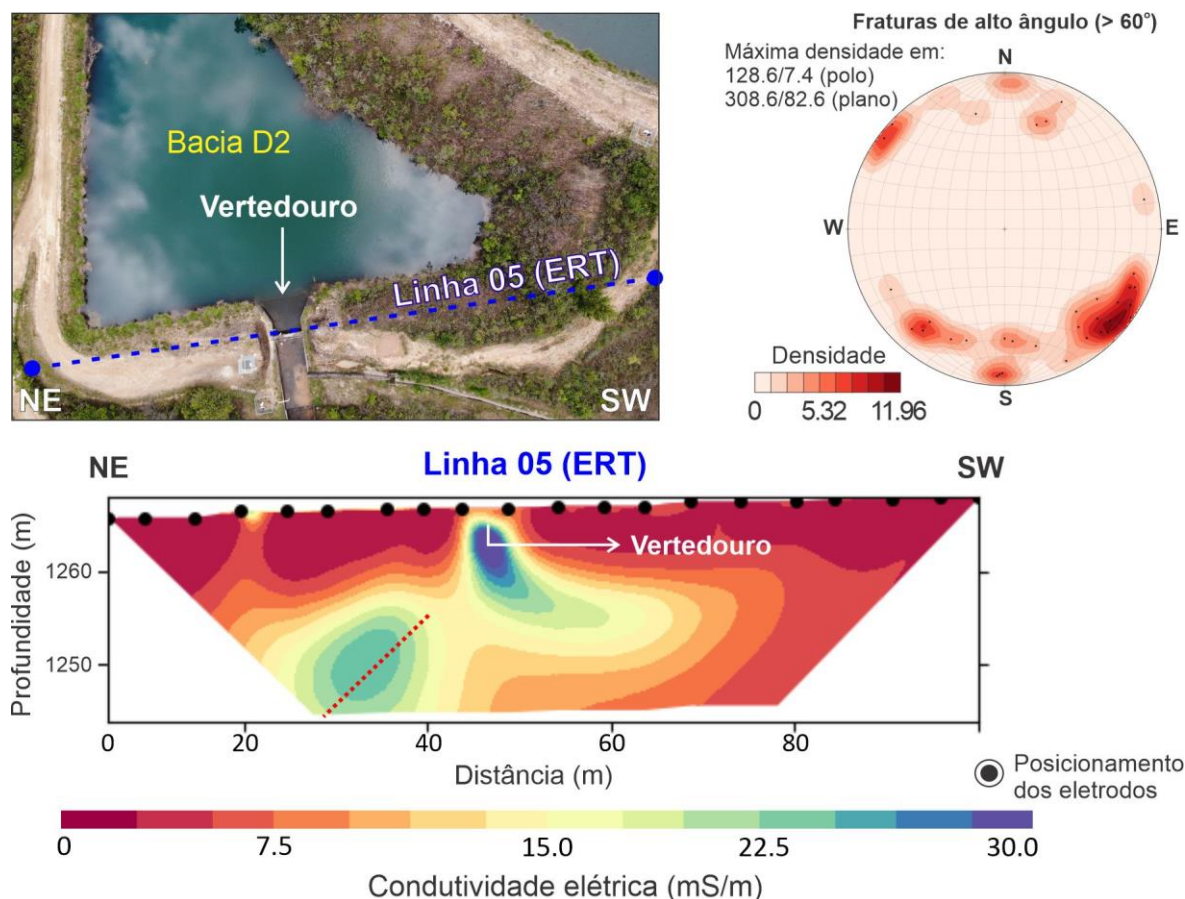
**Fonte:** dados da pesquisa.

Os resultados das seções de ERT obtidas pelo arranjo geométrico dipolo-dipolo foram dispostos em um modelo 3D. Foram observados altos valores de resistividade



pela extravasão da bacia D2 (Figura 113). Apesar do nível do reservatório não ser suficiente para extravasar pela estrutura, foram observadas anomalias condutivas verticalizadas de alto ângulo sob o material de concreto. Esse comportamento é sugestivo para a presença de caminhos preferenciais do fluxo d'água, principalmente no contato entre o concreto e o solo.

**Figura 113:** Resultados da ERT obtidos na linha 05 na bacia D2.

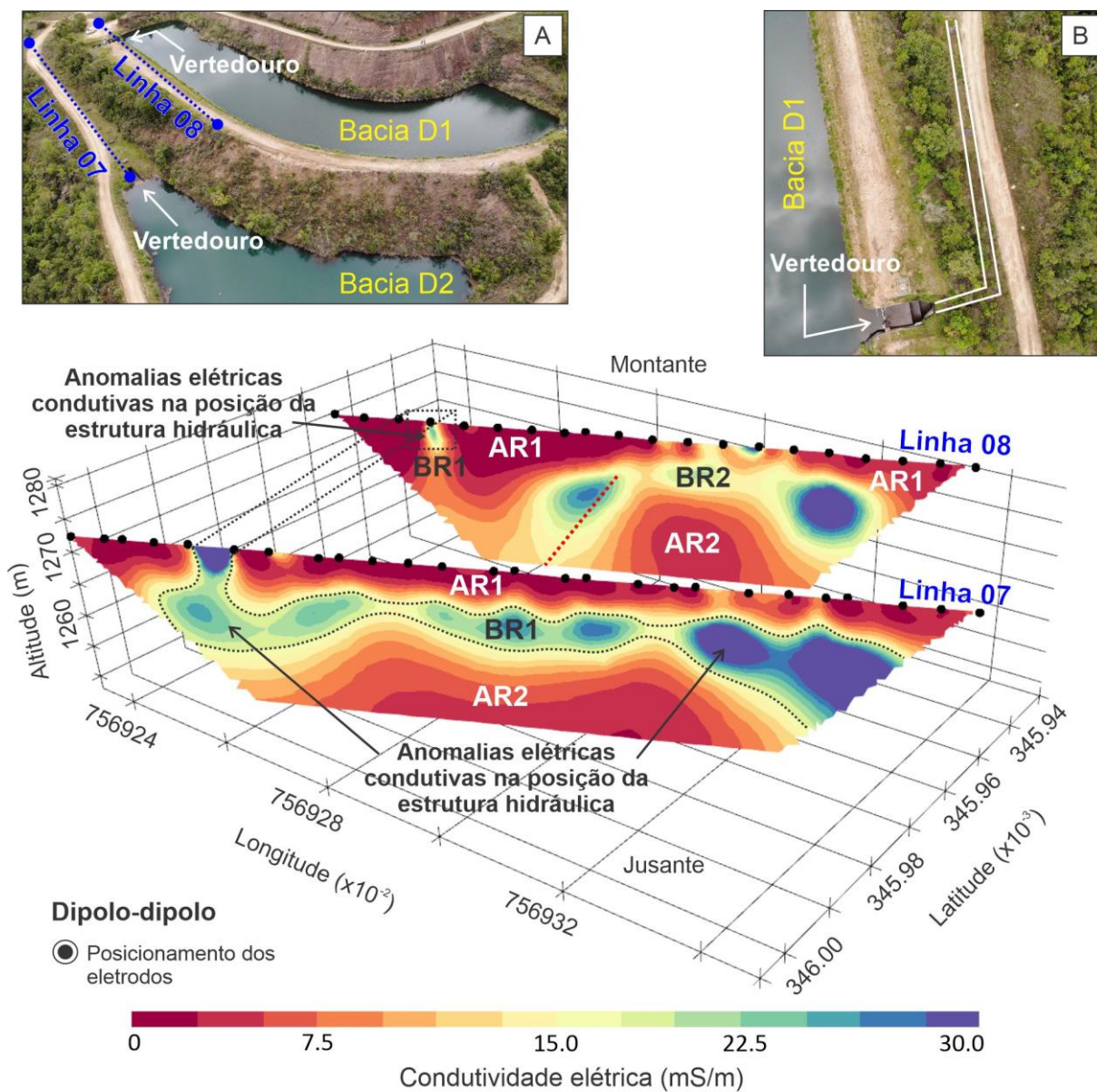


**Fonte:** dados da pesquisa.

As anomalias elétricas condutivas observadas na posição de entrada e saída do vertedouro responsável em conectar as bacias D1 e D2 foram interpretadas a partir dos resultados das linhas 07 e 08 (Figura 114A). Em ambas as linhas de ERT foram observadas anomalias condutivas na posição da estrutura hidráulica (Figura 114). O posicionamento da linha 07 sobre a estrutura hidráulica forneceu informações a respeito da continuidade lateral do vertedouro em profundidade (Figura 114B). As anomalias condutivas (BR1) ocorreram nas profundidades onde está instalada a tubulação que conecta as duas bacias. Não foram observadas anomalias condutivas

sob o ponto de instalação do vertedouro (AR2). A ausência de valores elétricos condutivos abaixo da estrutura hidráulica sugere que não ocorreram vazamentos na tubulação.

**Figura 114:** Resultado das linhas ERT 07 e 08: a) vista aérea lateral; b) vista aérea superior.



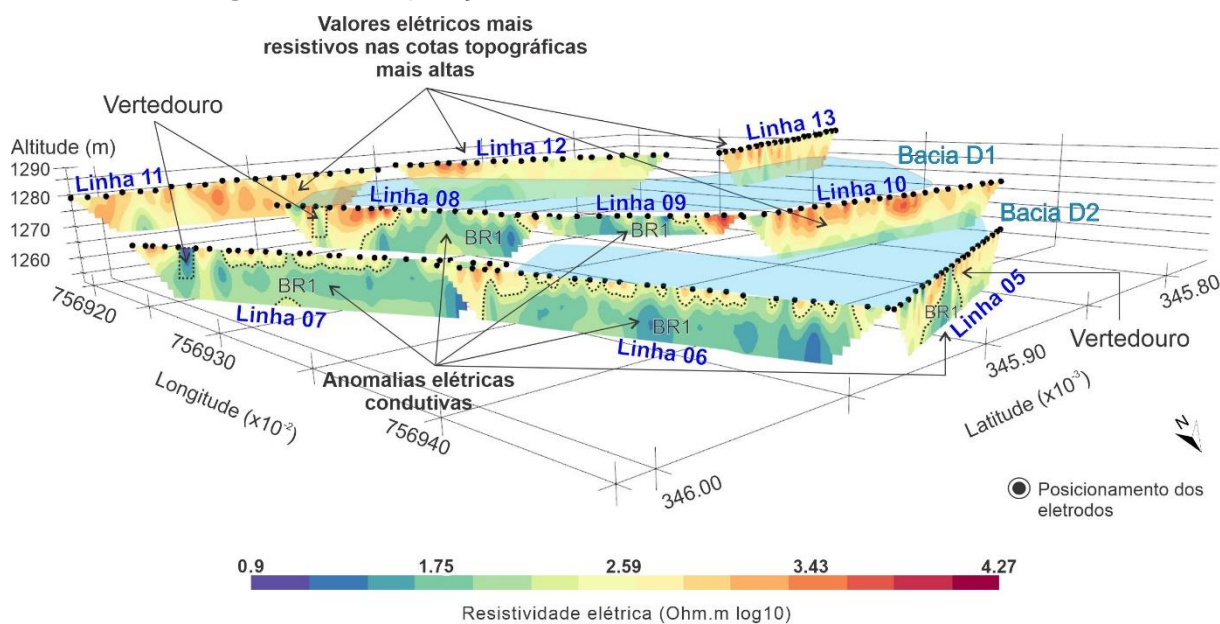
**Fonte:** dados da pesquisa.

A disposição 3D de todas as linhas ERT do arranjo dipolo-dipolo realizadas apresentou as zonas mais condutivas eletricamente na área das bacias de decantação de águas ácidas. Além das anomalias condutivas associadas com a presença dos vertedouros já discutidas, foram observadas outras anomalias condutivas na área de estudo. As linhas posicionadas em cotas topográficas mais

elevadas (linhas 11, 12 e 13) não apresentaram grandes variações nos valores de condutividade elétrica (Figura 115). A linha 10, posicionada próxima e em orientação parecida com a linha 13, não apresentou anomalias de alta condutividade elétrica. Valores eletricamente mais resistivos em ambas as linhas sugerem ausência de influência de fluxos de sentido NE-SW na região oeste das bacias.

As linhas 06, 08 e 09 apresentaram anomalias elétricas condutivas no arranjo dipolo-dipolo. As linhas posicionadas nas cotas topográficas mais altas (linhas 08 e 09) apresentaram anomalias elétricas com comportamento semelhante. Em ambas as linhas, as anomalias elétricas foram identificadas em um ponto mais raso da seção elétrica e desenvolveram em profundidade com orientação NW-SE. A linha 06, posicionada na cota topográfica mais baixa, apresentou anomalias elétricas condutivas com geometrias alongadas horizontalmente nas regiões mais rasas, e verticalmente na região central da linha (Figura 115).

**Figura 115:** Disposição 3D das linhas ERT nas bacias D1 e D2.

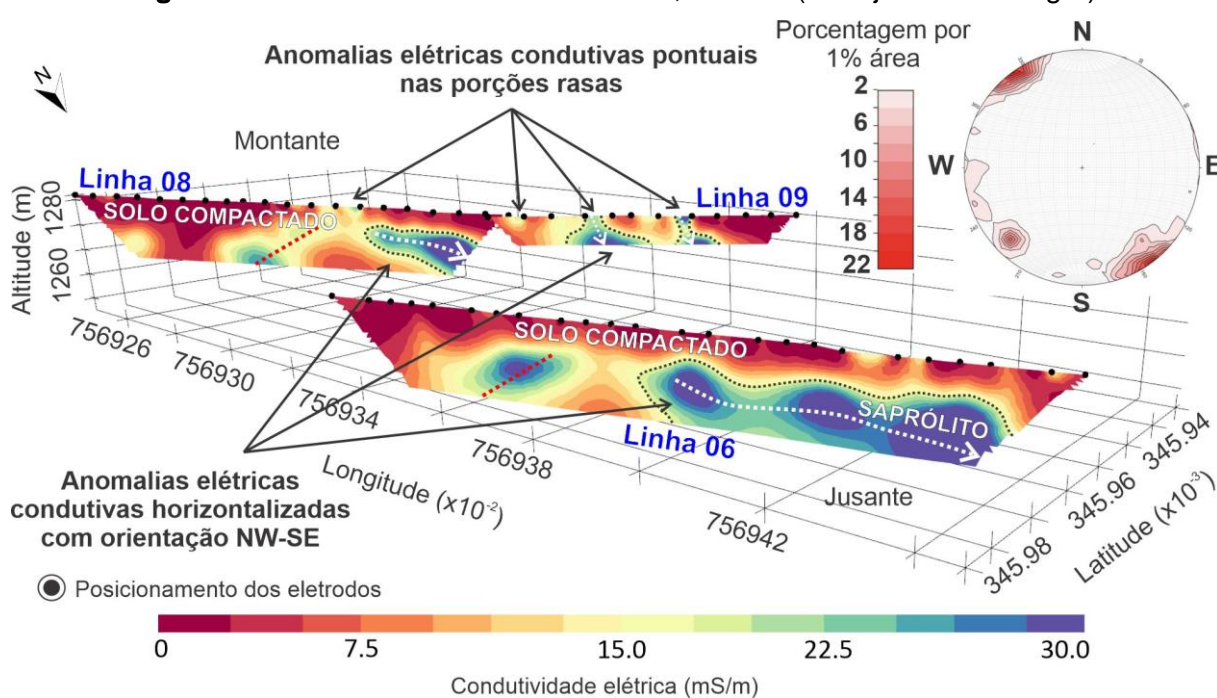


**Fonte:** dados da pesquisa.

Como previamente discutido no tópico de fundamentação teórica e comprovado no processamento dos dados geoeletricos do presente trabalho, o arranjo Schlumberger apresentou uma melhor sensibilidade vertical em relação ao arranjo dipolo-dipolo. Dessa maneira, a fim de confrontar o comportamento das anomalias geoeletricas condutivas dos diferentes arranjos utilizados, foram apresentados os resultados das linhas 06, 08 e 09 do arranjo Schlumberger (Figura 116). As anomalias

eléctricas condutivas de orientação sub-vertical nestas secções sugerem que o padrão de fraturamento das rochas das fundações das bacias determina o fluxo de água subterrânea nesta área. O levantamento estrutural mostrou uma predominância de medições com uma orientação NW para as orientações das fraturas. Esta orientação é consistente com as anomalias eléctricas condutivas verticais observadas no corpo das bacias de retenção identificadas como as linhas vermelhas segmentadas na Figura 116.

**Figura 116:** Resultado das linhas ERT 06, 08 e 09 (arranjo Schlumberger).



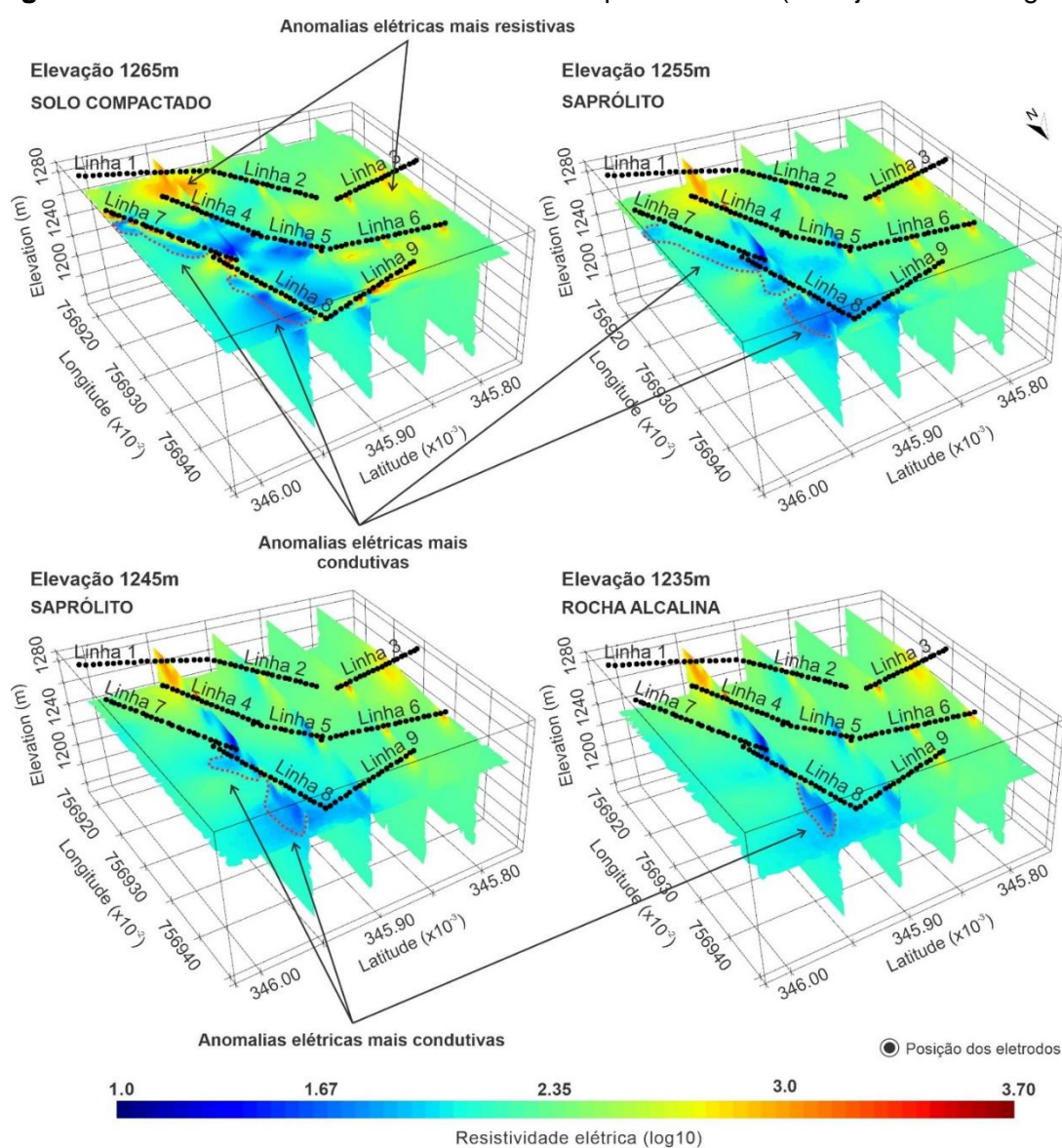
**Fonte:** dados da pesquisa.

Em ambos os arranjos geoelectricos foram observadas anomalias eléctricas pontuais nas porções rasas. Esse comportamento pode sugerir uma zona de infiltração da água no solo por capilaridade e percolação da água em direção às camadas mais profundidades por ação da gravidade. O levantamento de drone permitiu visualizar em detalhe as faces dos taludes do maciço onde estavam posicionadas as linhas 08 e 09. Não foram identificados pontos de surgência de água.

Em relação ao comportamento das anomalias eléctricas condutivas em maiores profundidades, foram observadas anomalias horizontalizadas em ambos os arranjos geoelectricos. Entretanto, o arranjo Schlumberger apresentou um padrão de anomalias semelhante nas linhas 08 e 09. Nessa cota topográfica, foram obtidas anomalias

elétricas na região oeste das linhas com desenvolvimento em profundidade e orientação NW-SE. O mesmo padrão foi observado na linha 06. A variação dos valores de resistividade elétrica neste ponto podem indicar um sentido preferencial do fluxo d'água no interior do corpo da bacia. A orientação obtida foi coerente com o levantamento estrutural realizado. A hipótese de fluxos em subsuperfície foi embasada pela presença de rocha bastante alterada na profundidade das anomalias geoeletricas, identificadas na vistoria técnica e nos resultados do método sísmico.

**Figura 117:** Anomalias elétricas condutivas em profundidade (arranjo Schlumberger).

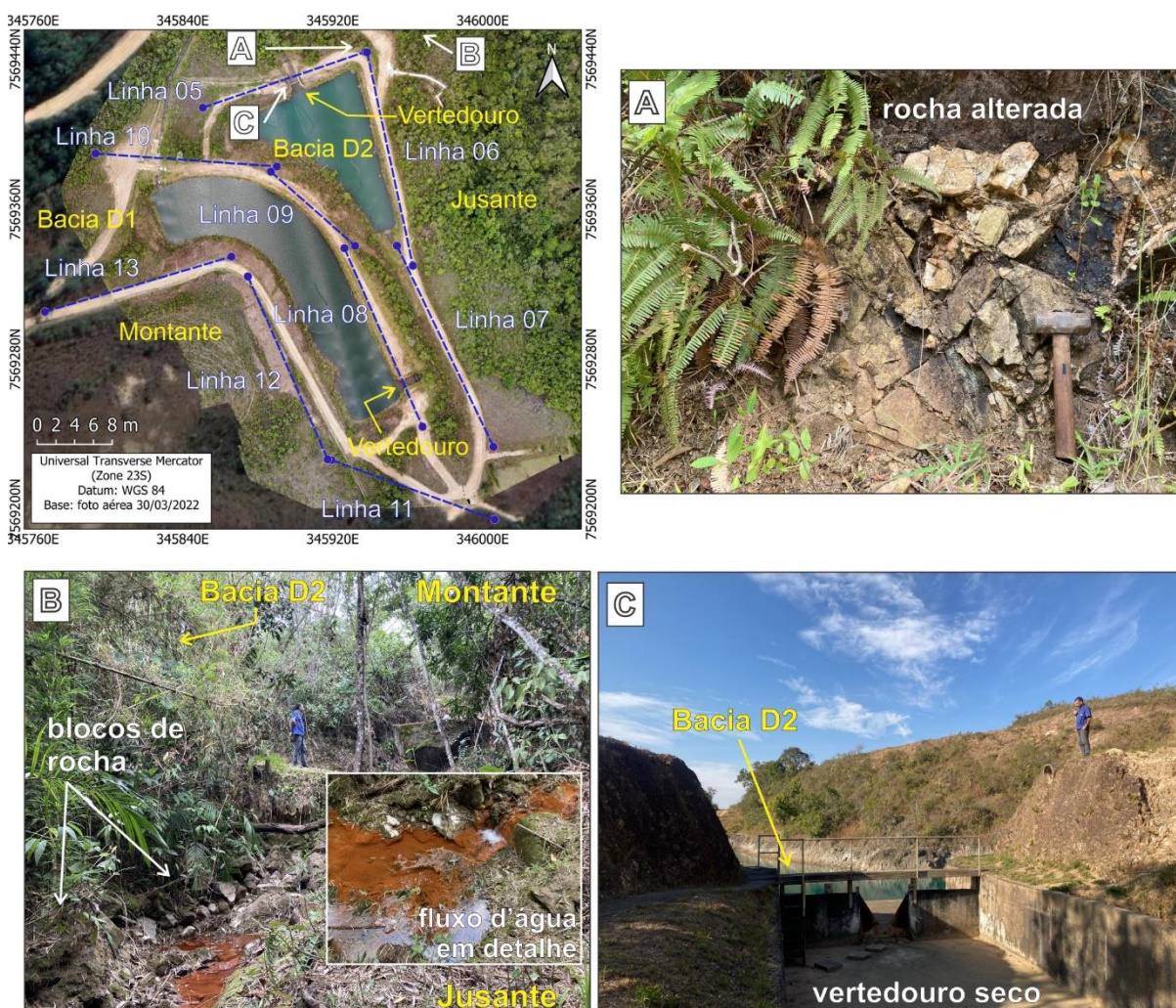


**Fonte:** dados da pesquisa.

Outro fator que reforçou a presença de zonas de percolações de água condicionadas pelo padrão de fraturamento na área de estudo, foi a identificação de um afloramento de rocha bastante alterada e fraturada próxima a fundação da bacia

D2 (Figura 118A). Foi identificado também um fluxo d'água constante à jusante da estrutura em cotas topográficas mais baixas (Figura 118B). Como os ensaios foram realizados no período com baixas precipitações pluviométricas e o vertedouro estava seco (Figura 118C), é sugestivo que o fluxo de água encontrado à jusante das bacias de decantação de água seja resultado da percolação da água do reservatório da bacia D2 através das fraturas presentes no maciço rochoso da fundação da bacia.

**Figura 118:** Disposição das bacias D1 e D2 e fluxo d'água à jusante das estruturas. **A)** Afloramento de rocha alterada localizado próximo a base da bacia D2. **B)** Fluxo d'água à jusante das bacias. **C)** Registro fotográfico do vertedouro seco durante a aquisição dos dados. Em escala: homem em pé de 1,77 metros.



Fonte: dados da pesquisa.

## 10. CONCLUSÕES

Os passivos ambientais oriundos da atividade de mineração são diversos. Em relação aos empreendimentos mineiros responsáveis pelo armazenamento de rejeitos, minérios esgotados, frações sólidas do tratamento de águas marginais e águas com elevados teores de metais, a vasta maioria dos estudos geofísicos até então foram aplicados com foco no corpo da estrutura, seja esta uma barragem, pilha de rejeitos ou uma bacia de decantação. O presente estudo foi desenvolvido a partir de uma análise estrutural detalhada de um maciço rochoso localizado entre as estruturas investigadas: uma barragem de armazenamento de rejeito de urânio e duas bacias de decantação de águas ácidas. A partir das medidas das orientações das principais famílias de fraturas do maciço rochoso através do uso de bússola e fotogrametria digital, foi compreendido o padrão estrutural da área. Os dados foram associados e confrontados com levantamentos estruturais regionais e locais realizados na área do Planalto de Poços de Caldas e da mineração Osamu Utsumi.

A primeira hipótese da tese, a qual questiona a capacidade das operações mineradoras alterarem a dinâmica do fluxo hidrogeológico no aquífero fraturado sob as fundações dos empreendimentos, pode ser respondida com base nos resultados do levantamento estrutural. Apesar de apresentarem maior variabilidade de dados, o posicionamento da densidade máxima das medidas estruturais realizadas de maneira indireta pelo veículo aéreo não tripulado foi coerente com as medidas realizadas com a bússola tanto nos levantamentos estruturais regionais como locais. Uma vez que a orientação e a densidade das fraturas não indicam uma possível alteração no padrão das famílias de fraturas na área das barragem e bacias de decantação de radioisótopos. Essas fraturas atuam como potenciais caminhos preferenciais para o escoamento de água e contribuíram para alterações na permeabilidade do maciço rochoso e, conseqüentemente, na dinâmica do fluxo hidrogeológico.

O resultado mostrou também a viabilidade no uso dessa metodologia indireta para o levantamento estrutural de maciços rochosos em ambientes de risco de exposição humana, como, por exemplo, a investigação de maciços rochosos de taludes de mineração com risco de queda de blocos ou barragens com alto risco de rompimento. O entendimento do padrão estrutural da área auxiliou a interpretação dos dados geofísicos obtidos a partir de métodos geofísicos elétricos e sísmicos. Os resultados sísmicos de refração obtidos no afloramento de maciço rochoso próximo a

base da barragem mostraram anomalias lineares compatíveis com o posicionamento da família de fraturas de alto ângulo. Neste mesmo ponto de investigação não foi possível observar variações nos estratos sísmicos que pudessem estar associadas à família das fraturas de baixo ângulo. No entanto, em uma das linhas realizadas na berma da barragem, o ângulo de mergulho do estrato sísmico foi consistente com a direção e o ângulo de mergulho do embasamento na região de estudo.

A segunda hipótese, a qual questiona a viabilidade do uso dos métodos geofísicos na análise hidrogeológica de aquíferos fraturados sob pressão de grandes cargas, foi confirmada pelos resultados dos levantamentos sísmicos e elétricos. Os métodos geofísicos foram eficazes na identificação de variações de velocidades de onda compressional associadas a diferentes graus de fraturamento, confirmado pelas sondagens geológicas. Além disso, a tomografia de resistividade elétrica identificou anomalias condutivas alinhadas com as fraturas no maciço rochoso, e corroboram a hipótese de que essas fraturas estão preenchidas por água. A combinação dessas técnicas demonstrou ser uma ferramenta eficiente na identificação de anomalias geofísicas, e demonstram o impacto das fraturas no comportamento hidrogeológico ao longo do tempo.

Adicionalmente, os resultados obtidos pela sísmica de refração e pela tomografia geoeletrica foram consistentes em indicar zonas de alterações no maciço rochoso que podem influenciar a integridade das estruturas de armazenamento. As anomalias condutivas e as variações nas velocidades sísmicas, principalmente na região da antiga estrutura hidráulica, demonstram a sensibilidade dos métodos geofísicos para identificar mudanças no maciço rochoso e nas estruturas associadas. Essas anomalias sugerem que o maciço rochoso apresenta zonas de fraqueza, onde a infiltração de água pode ser facilitada pelo fraturamento, impactando potencialmente a estabilidade a longo prazo.

Na barragem de armazenamento de rejeitos, os resultados geoeletricos apresentaram anomalias condutivas orientadas de acordo com o padrão de fraturamento de alto ângulo do maciço rochoso obtidos no levantamento estrutural. Esse resultado corroborou com as interpretações sísmicas de refração. O uso combinado dos métodos mostrou ser positivo na identificação dos graus de alteração do maciço rochoso. Os estratos sísmicos com valores de velocidades da onda compressional condizentes com rocha alterada foram coerentes com as anomalias geoeletricas condutivas verticalizadas. Essas anomalias sugerem a presença de

fraturas na rocha alcalina. Ambas as técnicas de Eletrorresistividade e Tomografia de refração sísmica apresentaram sensibilidade para identificação de anomalias geofísicas na posição do antigo vertedouro desativado. A estrutura hidráulica foi preenchida com calda de cimento em 2020. Por constituir um material com propriedades físicas diferentes do material do corpo do barramento e possuir dimensões consideráveis, os métodos geofísicos foram capazes de identificar a presença da estrutura. Não foram identificadas anomalias geofísicas sob o ponto de localização do vertedouro, o que pode ser um indicativo de vedação da estrutura.

Os resultados das variações das velocidades da onda sísmica obtidas pelo MASW na região da 2ª berma também sugeriram a presença de heterogeneidades no solo compactado e na camada de rocha alterada. Isso reforça a hipótese da presença de zonas com diferentes densidades e rigidezes nesse ponto. Os resultados apresentaram uma anomalia na região nordeste da linha de aquisição, próxima à região de comportamento anômalo dos estratos sísmicos obtidos pela tomografia de refração sísmica. Nesse ponto, foram observados valores menores de velocidade da onda sísmica ( $V_s$ ) no contato do corpo e fundação do barramento. A presença de rocha alterada com alto grau de fraturamento pode reduzir as velocidades sísmicas detectadas, independentemente da compactação do solo acima, uma vez que as fraturas nas rochas criam zonas de fraqueza que diminuem a velocidade de propagação das ondas sísmicas. A presença de fraturas na rocha também pode servir como caminhos preferenciais para a infiltração de água, o que pode contribuir para uma diminuição adicional das velocidades sísmicas na região anômala.

Antes da construção da barragem, certos elementos geológicos, como falhas, fraturas, canais de erosão ou cavidades, às vezes não podem ser completamente removidos da fundação em maciços rochosos. Blocos de rocha, por exemplo, são considerados materiais defeituosos no maciço rochoso e também devem ser removidos. No caso do presente estudo, a presença de blocos não é alarmante, no entanto, é sugestivo que a zona de contato entre o corpo da barragem e o relevo natural seja monitorada, uma vez que a presença desses materiais pode influenciar na compactação do material neste ponto e atuar como agente facilitador no desenvolvimento de caminhos preferenciais de escoamento de água nesse ponto.

Nas bacias de decantação de águas ácidas, não foram observadas alterações nos estratos sísmicos que pudessem estar associadas com o padrão de fraturamento da área. Entretanto, foram observados comportamentos anômalos nos valores de  $V_p$

ao longo da seção que corroboram com a presença de blocos de rocha no interior do maciço. O SRT mostrou ser uma interessante técnica sísmica para identificação das camadas dos diferentes materiais que compõem o corpo das bacias. A técnica mostrou capacidade em identificar, lateralmente e em profundidade. As variações dos valores das ondas sísmicas nas duas bacias apresentaram valores de  $V_p$  comumente associados a rocha alterada. Essa interpretação foi condizente com as zonas elétricas mais condutivas obtidas pela ERT.

Em relação aos resultados da ERT, o uso de diferentes arranjos geoeletricos foi importante para assegurar as interpretações realizadas, uma vez que os arranjos geoeletricos possuem diferentes sensibilidades em profundidade. No arranjo dipolo-dipolo foram observadas anomalias condutivas nos pontos de entrada e saída dos dois vertedouros das bacias. A linha posicionada próxima ao tubo que interliga os reservatórios das bacias apresentou sensibilidade para identificar a estrutura hidráulica em subsuperfície. Não foram identificadas anomalias condutivas sob a tubulação, o que sugere ausência de vazamentos nesta estrutura. Além da identificação do posicionamento da estrutura hidráulica, ambos os arranjos geoeletricos utilizados apresentaram anomalias elétricas condutivas no interior do corpo das bacias de decantação. A disposição dos dados de condutividade elétrica em profundidade apresentou anomalias com orientação NW-SE, condizentes com as fraturas de alto ângulo obtidas no levantamento estrutural. A presença de um fluxo d'água no interior do corpo das bacias, condicionados pelo padrão de fraturamento da área, foi respaldado pela identificação em campo da percolação de água à jusante, próxima a base da bacia D2.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEM. (2012). Terrameter LS—Instruction manual. ABEM Instrument AB: Sundbyberg. (Acesso em 05/01/2023).
- ABER, J.S., MARZOLFF, I. & RIES, J.B. (2010). Small-format aerial photography: principles, techniques and geoscience applications. Amsterdam, Elsevier, 268 p.
- ABDELOUAS, A. (2006). Uranium mill tailings: geochemistry, mineralogy, and environmental impact. *Elements*, v. 2, p. 335-341.
- ABRAHÃO, R. (2020). Soft Rocks in Dam Foundation and Dam Sites. In: Kanji, M., He, M., Ribeiro e Sousa, L. (eds) *Soft Rock Mechanics and Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29477-9\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29477-9_24)
- ABUZEID N. (1994). Investigation of channel seepage areas at the existing Kaffrein dam site Jordan using electrical-resistivity measurements. *Journal of Applied Geophysics* 32 163-175. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90018-3)
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. (2021). Informe Mineral, ANM. Jan/2021. 1º/2020. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral/publicacoes-nacionais/copy\\_of\\_informe\\_mineral\\_1\\_2019.pdf/view](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral/publicacoes-nacionais/copy_of_informe_mineral_1_2019.pdf/view)
- AKCIL, A. & KOLDAS, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14, p. 1139-1145.
- AL-HEETY, A., HASSOUNEH, M. & ABDULLAH, F.M. (2021). Application of MASW and ERT methods for geotechnical site characterization: A case study for roads construction and infrastructure assessment in Abu Dhabi, UAE. *Journal of Applied Geophysics*. [10.1016/j.jappgeo.2021.104408](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104408).
- ALBERTI, H.L.C. (2017). *Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio - Osamu Utsumi, planalto de Poços de Caldas (MG)*. 198 p. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/330982>
- ALMEIDA, F.F.M. (1986). Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozoico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16, p. 325-340.
- ALMEIDA F.R. & PARADELLA, W.R. (1977). *Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas*. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP.
- AK, M.A. (2006). AN ANALYTICAL RAYPATH APPROACH TO THE REFRACTION WAVEFRONT METHOD1. *Geophysical Prospecting*. 38. 971 - 982. [10.1111/j.1365-2478.1990.tb01885.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1990.tb01885.x).
- ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), 2017. Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial RBAC-E nº 94, de 02 de maio de 2017. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. Resolução nº 419. (Acesso em 05/01/2023).

- ARCHIE, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng.*, n. 146, p. 54–62.
- ARCILA, E.J.A. (2020). *Diagnóstico geofísico para identificação de zonas de fluxo em uma barragem de contenção de rejeitos de mineração de urânio*. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/192162>>.
- ARCILA, E.J.A., MOREIRA, C.A., CAMARERO, P.L. & CASAGRANDE, M.F.S. (2021). Identification of Flow Zones Inside and at the Base of a Uranium Mine Tailings Dam Using Geophysics. *Mine Water Environ* 40, 308–319. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00746-y>
- ASTHANA, B.N. & KHARE, D. (2022). *Recent Advances in Dam Engineering*. Recent Advances in Dam Engineering. Springer International Publishing, 366p.
- ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS – ASDSO. (2023). Dam Safety Incident Database Search. Association of State Dam Safety Officials website. Accessed in May, 2023. <https://damsafety.org/Incidents>
- ASSALI, P., GRUSSENMEYER, P., VILLEMIN, T., POLLET, N. & VIGUIER, F. (2016). Solid images for geostructural mapping and key block modeling of rock discontinuities. *Computers and Geosciences*, v. 89, p. 21-31, [10.1016/j.cageo.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.01.002)
- AUSTRALIA. (2007). Dept. of Industry, Tourism and Resources. Tailings management: Leading Practice Sustainable Development Program for the mining industry. Canberra: Dept. of Industry, Tourism and Resources, <http://www.industry.gov.au/assets/documents/itrinternet/TailingsManagementFinal20070307125953.pdf>
- AYRES, A. & THEILEN, F. (1999). Relationship between P- and S-wave velocities and geological properties of near-surface sediments of the continental slope of the Barents Sea Geophysical Prospecting, 47 (4), pp. 431-441.
- AZAM, S. & LI, Q. (2010) Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. *Geotechnical News*, 28, 50-54.
- AZCUE, J.M. (1999). *Environmental Impacts of Mining Activities*. Springer Berlin, Heidelberg. Ed.1. XX – 300p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59891-3>
- AZEVEDO, F.A. & CHASIM, A.A.M. (2003). *Metais: Gerenciamento da toxicidade*. São Paulo: Atheneu Editora/InterTox, 554p.
- BAGDASSAROV, N. (2021). Electric Resistivity. In *Fundamentals of Rock Physics* (pp. 292-360). Cambridge: Cambridge University Press. [10.1017/9781108380713.009](https://doi.org/10.1017/9781108380713.009)
- BEFUS, K.M. (2018). pyres: a Python wrapper for electrical resistivity modeling with R2. *J Geophys Eng* 15(2):338–346. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa93ad>
- BEN-MENACHEM, A. & SINGH, S. J. (1981). *Seismic Waves and Sources*, Ed. Ben-Menahem, A. & Singh, S. J. 151–256, Springer.
- BENJUMEA, B., GABÀS, A., MACAU, A., LEDO, J., BELLMUNT, F., FIGUERAS, S. & PIÑA, J. (2021). Undercover karst imaging using a Fuzzy c-means data clustering approach (Costa Brava, NE Spain). *Eng Geol.* 293. 106327. [10.1016/j.enggeo.2021.106327](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106327).

- BERRYMAN, J.G. (2007). Seismic waves in rocks with fluids and fractures, *Geophys J Int*, Volume 171, Issue 2, Pages 954–974, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03563.x>
- BERTULUCI, F.B. (2020). *Análise das condições de percolação em barragem de terra a partir do método geofísico da eletrorresistividade*. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/192979>>.
- BINLEY, A. & KEMNA, A. (2005). DC resistivity and induced polarization methods. *Hydrogeophys. Water Science and Technology Library*, 50 Rubin Y., Hubbard S.S. (Eds). Springer, Dordrecht [10.1007/1-4020-3102-5\\_5](https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_5).
- BIONDI, J. C. (1976). Cubagem e avaliação do depósito de urânio do Cercado (c -09). In: Relatório interno NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro, RJ.
- BLANCHY, G., SANEIYAN, S., BOYD, J., MCLACHLAN, P. & BINLEY, A. (2020). ResIPy, an intuitive open-source software for complex geoelectrical inversion/modeling. *Comput. Geosci.* 137. [10.1016/j.cageo.2020.104423](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104423).
- BO, M.W. & BARRETT, J. (2023). *Geotechnical Instrumentation and Applications*. 1st ed. Springer. 372p. ISBN: 3031342747.
- BOGOSLOVSKY, V.A. & OGILVY, A.A. (1970). Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dams. *Geophysical Prospecting*, 18, 758-773. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1970.tb02141.x>
- BOLT, B.A. (1976). *Nuclear Explosions and Earthquakes*, W.H. Freeman and Company.
- BONOTTO, D.M. (2004). *Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani*. São Paulo: Editora UNESP, 251 p.
- BOULANGE, J., HANASAKI, N., YAMAZAKI, D. ET AL. (2021). Role of dams in reducing global flood exposure under climate change. *Nat Commun* 12, 417. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20704-0>
- BOYD, J., BLANCHY, G., SANEIYAN, S., MCLACHLAN, P. & BINLEY, A. (2019). 3D geoelectrical problems with ResIPy, an open source graphical user interface for geoelectrical data processing. *Fast Times* 24. [10.13140/RG.2.2.35381.63205](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35381.63205)
- BOYLE, R.W. (1982). CHAPTER 1 - General Chemistry and Geochemistry of Thorium and Uranium, *Developments in Economic Geology*, Elsevier, Volume 16, Pages 1-38, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42070-1.50006-5>.
- BRAM, L. & KLEMETSrud, B. (2023). Calcium Carbonate in Waste Flooring for Neutralization of Acid Rock Drainage. *Mine Water Environ* 42, 70–77. <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00926-6>
- BRASIL. Presidência da República. Lei nº 4.118, de 17 de agosto de 1962. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 9941, 18 ago. 1962. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l4118compilada.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4118compilada.htm). Acesso em: 15 nov. 2021.
- BRASIL. Lei Federal nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para

quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei 9984, de 17 de julho de 2000. Disponível em: [www.leidireto.com.br/lei-12334.html](http://www.leidireto.com.br/lei-12334.html). Acessado em: março de 2021.

BROWN, E.T. (2017). Reducing risks in the investigation, design and construction of large concrete dams, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 9, Issue 2, Pages 197-209, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.002>.

BRUTSAERT, W. (2005). *Hydrology: An Introduction*. Cambridge: Cambridge University Press. [10.1017/CBO9780511808470](https://doi.org/10.1017/CBO9780511808470)

BUTCHIBABU, B., KHAN, P.K. & JHA, P.C. (2021). Geophysical investigations for stability and safety mitigation of regional crude-oil pipeline near abandoned coal mines, *J Geophys Eng*, 18, 1, Pages 145–162, <https://doi.org/10.1093/jge/gxab003>

CAMARERO, P.L. & MOREIRA, C.A. (2017). Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique. *REM, Int Eng J*. 2017Jan;70(1):47–52. <https://doi.org/10.1590/0370-44672016700099>

CAMARERO, P.L., MOREIRA, C.A. & PEREIRA, H.G. (2019). Analysis of the Physical Integrity of Earth Dams from Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Brazil. *Pure Appl. Geophys*. 176, 5363–5375. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02271-8>

CAMARERO, P.L., MOREIRA, C.A., TARGA, D.A., DUZ, B.G. & PEREIRA, H.G. (2021). Analysis of Acid Drainage Flow Zones in a Rocky Massif in a Uranium Mine from Structural and Geophysical Diagnoses. *Mine Water Environ* 41, 303–316 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00827-6>

CAPOVILLA, M.N.G.M. (2001). *Urânio nos hidrotermalitos potássicos (“rocha potássica”) da Mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG*. 2001. 227 p. Tese de doutorado em Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARVALHO, N.O (2008). *Hidrossedimentologia Prática*. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM/ Centrais Elétricas Brasileiras – ELETROBRÁS. 2. ed. Rio de Janeiro.

CASAGRANDE, M.F.S. (2019). *Investigação geofísica em pilha de estéril afetada por processo de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas-MG*. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/181489>.

CEDERGREN, H.R. (1980). Seepage study of Hidden Dam, Fresno River, California: prepared for Department of the Army, Sacramento District, Corps of Engineers.

CHAPMAN, C. (2004) *Fundamentals of Seismic Wave Propagation*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511616877>

CHEN, J., ZELT, C.A. & JAISWAL, P. (2017). Detecting a known near-surface target through application of frequency-dependent travelttime tomography and full-waveform inversion to P- and SH-wave seismic refraction data. *Geophys* 82: R1-R17. <https://doi.org/10.1190/geo2016-0085.1>

CHRISTOFOLETTI, A. (1973). unidade morfoestrutural do Planalto de Poços de Caldas. *Notícias Geomorfológicas*, Campinas, v.13, n.26, p.77-85.

CIPRIANI, M. (2002). *Mitigação dos Impactos Sociais e Ambientais Decorrentes do Fechamento Definitivo de Minas de Urânio*. 2002, 332 p. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Geociências, Campinas.

COCKETT, R., KANG, S., HEAGY, L.J., PIDLISECKY, A., & OLDENBURG, D.W. (2015). SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications. *Computers & Geosciences*. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.015>

CORWIN, R.F. (1990). Applications of the Self-Potential Method for Engineering and Environmental Investigations. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings: 107-121. <https://doi.org/10.4133/1.2921868>

COSTA, P.C.G., DELGADO, S.L. & CARMO, C.C. (2001). Projeto hidrogeoambiental das estâncias hidrominerais de Poços de Caldas, Companhia Mineradora de Minas Gerais - COMIG. Belo Horizonte, MG. 69p.

COULSON, M. (2012). *The History of Mining: The events, technology and people involved in the industry that forged the modern world*. Harriman House. 488p.

COURTNEY, R. & PIETRZYKOWSKI, M. (2018). Chapter 2- Soil Quality Indices for Evaluation of Acid Mine Spoil. *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*. Elsevier. p. 33-48. [10.1016/B978-0-12-812986-9.00002-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00002-6).

DAILY, W., RAMIREZ, A., BINLEY, A. & LEBRECQUE, D. (2004). "Electrical resistance tomography," *The Leading Edge* 23: 438-442. <https://doi.org/10.1190/1.1729225>

DAL MORO, G. (2015). Chapter 1 - Introducing Surface Waves, *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications*, Elsevier, Pages 1-22, ISBN 9780128007709, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800770-9.00001-7>.

DERBY, O.A. (1887). On nepheline rocks in Brasil, with special reference to the association of phonolite and foyaite, *Quart. Journal Geol. Soc.* 43:457-473.

DEVOS, K.J., PEHME, P. & GREENHOUSE, J.P. (1997). Ground geophysical surveys for mine wastes. In: *Proceedings of Exploration '97, Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. 4., 1997. Anais... Toronto: Prospectors and Developers Association of Canada, 1997, p. 917-916.

DIMECH, A., CHOUTEAU, M., AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., MARTIN, V. & PLANTE, B. (2019). Three-Dimensional Time-Lapse Geoelectrical Monitoring of Water Infiltration in an Experimental Mine Waste Rock Pile. *Vadose Zone Journal*, 18: 1-19 180098. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.05.0098>

DIMECH, A., CHENG, L., CHOUTEAU, M. ET AL. (2022). A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years: Perspectives for Mining Waste Monitoring. *Surv Geophys* 43, 1699–1759. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>

DIMECH, A., ISABELLE, A., SYLVAIN, K. ET AL. (2023). A multiscale accuracy assessment of moisture content predictions using time-lapse electrical resistivity

tomography in mine tailings. *Sci Rep* 13, 20922. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48100-w>

DOMENICO, P.A. & SCHWARTZ, F.W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. xxii 824 pp. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons. *Geological Magazine*, 128(6), 681-682. [doi:10.1017/S0016756800019890](https://doi.org/10.1017/S0016756800019890)

DOYORO, Y.G., CHANG, P.Y., PUNTU, J.M., LIN, D.-J., HUU, T.V., RAHMALIA, D.A. & SHIE, M.-S. (2022). A review of open software resources in python for electrical resistivity modelling. *Geosci. Lett.* 9, 3. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00214-1>

DUARTE, C.R. & BONOTTO, D.M. (2002). Calibração em energia e concentração de espectrômetro gama para análise de U, Th e K. *Geociências*, 19, 313 – 319.

DUNBAR, J.A., ALLEN, P.M. & HIGLEY, P.D. (1999). Multifrequency acoustic profiling for water reservoir sedimentation studies. *Journal of Sedimentary Research*; 69 (2): 518–527. <https://doi.org/10.2110/jsr.69.518>

DUTTA, N.P. (1984) Seismic Refraction Method to Study the Foundation Rock of a Dam. *Geophysical Prospecting*, 32, 1103-1110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1984.tb00757.x>

EIDEMÜLLER, D. (2021). Uranium Mining. In: *Nuclear Power Explained*. Springer Praxis Books. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72670-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72670-6_8)

EIKMEIER, C.N., PRADO, R.L. & TAIOLI, FABIO. (2016). Combined use of active and passive surface waves for shallow subsurface investigation in noisy urban area of São Paulo city, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*. 34. 13-24. [10.22564/RBGF.V34I1.779](https://doi.org/10.22564/RBGF.V34I1.779)

EIKMEIER, C.N. (2018). Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. [10.11606/D.14.2018.tde-09042018-164758](https://doi.org/10.11606/D.14.2018.tde-09042018-164758).

ELLIS, R.G & OLDENBURG, D.W. (1994). Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, v. 116, p. 5–11.

ELLERT, R. (1959). Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. São Paulo: Boletim Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo - USP, v.237, n. 18, p. 5-63.

EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A - NUCLEBRÁS – Projeto básico - Captação de água. Arranjo geral Barragem das Antas. 1979.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. (1991). a. 40 CFR Parts 141, 142—National primary drinking water regulations; radionuclides, Proposed rule. *Federal Register* 56(138):33050-33127.

ERCIKDI, B., CIHANGIR, F., KESIMAL, A. & DEVECI, H. (2017). Practical Importance of Tailings for Cemented Paste Backfill. In: Yilmaz, E., Fall, M. (eds) *Paste Tailings Management*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8_2)

ERKAN, K. (2008). A comparative overview of geophysical methods. Report N°. 488 geodetic science and surveying. The Ohio State University Columbus, Ohio 43210.

- EVERETT, M.E. (2013). Seismic reflection and refraction. In Near-Surface Applied Geophysics (pp. 125-181). Cambridge: Cambridge University Press. [10.1017/CBO9781139088435.007](https://doi.org/10.1017/CBO9781139088435.007)
- EZE, S.U., OGAGARUE, D.O., NNOROM, S.L., OSUNG, W.E. & IBITOYE, T.A. (2021). Integrated geophysical and geochemical methods for environmental assessment of subsurface hydrocarbon contamination. *Environ Monit Assess* 193, 45. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09219-3>
- FAGUNDES, J.R.T. (2005). *Balanço hídrico do bota – fora BF4 da mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida*. 121 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.
- FANCHI, J.R. (2010). 5 - Geophysics, Integrated Reservoir Asset Management, Gulf Professional Publishing, Pages 71-88, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382088-4.00005-0>.
- FARIA JUNIOR, A. (2009). Aprimoramento do controle de qualidade do minério no planejamento de lavra de curto prazo: estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.3.2009.tde-11082010-164812. Recuperado em 2022-10-24, de [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)
- FEITOSA & FILHO. (2000). Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações. CPRM. 2 edição. 391 p.
- FELL, R., MACGREGOR, P., STAPLEDON, D. & BELL, G. (2005). Geotechnical Engineering of Dams. CRC Press, p. 930.
- FERNANDES, A. (2008). Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico*. 29. 49-72. [10.5935/0100-929X.20080005](https://doi.org/10.5935/0100-929X.20080005).
- FERNANDES, A. J., ROULEAU, A., & DO AMARAL VARGAS JR., E. (2023). Structural Geology Applied to Fractured Aquifer Characterization. *Structural Geology Applied to Fractured Aquifer Characterization. The Groundwater Project*. <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-009-9>
- FERNANDES, F.R.C., MATOS, G.M.M., CASTILHOS, Z.C. & LUZ, A.B. (2007). Tendências Tecnológicas Brasil 2015 – Geociências e Tecnologia Mineral. CETEM/CPRM, 16 capítulos, 380 p.
- FIGUEIREDO, V.C. (2018). Estudo da adição de lama de minério de ferro no processo de pelletização. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- FILHO, C.A.C. (2014). *Avaliação da qualidade das águas superficiais no entorno das instalações minero-industriais de urânio de Caldas*. 2014, 341 p. Tese de doutorado – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte.
- FOTI, S. (2005). Surface Wave Testing for Geotechnical Characterization. In: Lai, C.G., Wilmański, K. (eds) *Surface Waves in Geomechanics: Direct and Inverse Modelling for Soils and Rocks*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol 481. Springer, Vienna. [https://doi.org/10.1007/3-211-38065-5\\_2](https://doi.org/10.1007/3-211-38065-5_2)

FOTI, S., HOLLENDER, F., GAROFALO, F. ET AL. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. Bull Earthquake Eng 16, 2367–2420. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>

FRAENKEL, M.O., SANTOS, R.C., LOUREIRO, F.E.V.L. & MUNIZ, W.S. (1985). Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C., Coelho, C.E.S. (coords.), Principais Depósitos Minerais do Brasil, DNPM/CVRD, Brasília, v. I, p. 89-103.

FRANKLIN, M.R. (2007). *Modelagem numérica do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos aplicados à previsão da drenagem ácida em uma pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas – MG*. 2007, 337 p. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

FRAYHA, R. (1962). Urânio e Tório no Planalto de Poços de Caldas. Departamento Nacional de Produção Mineral.

FUMAL, T.E. (1978). Correlations between seismic wave velocities and physical properties of near-surface geologic materials in the Southern San Francisco Bay Region, California, U.S. Geological Survey Open-File Report 78- 1067, <http://pubs.usgs.gov/of/1978/1067/>.

FURMAN, A., FERRÉ, T.P.A. & WARRICK, A.W. (2003). A Sensitivity Analysis of Electrical Resistivity Tomography Array Types Using Analytical Element Modeling. Vadose Zone Journal. 2. 416-423. [10.2113/2.3.416](https://doi.org/10.2113/2.3.416).

GALLAS, J. D. F. (2000). Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

GANDOLFO, O. C. B. (2007). Um estudo do imageamento geométrico na investigação rasa. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências.

GARCÍA-LEÓN, M. (2022). Radioactivity: History and Phenomenology. In: Detecting Environmental Radioactivity. Graduate Texts in Physics. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09970-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09970-0_1)

GASTMAIER MARQUES, A.C., MOREIRA, C.A., STANFOCA CASAGRANDE, M.F., & ALDANA ARCILA, E.J. (2022). Gamma-ray spectrometry applied in the identification of potential acid mine drainage generation zones in waste rock pile with uranium ore and associated sulfides (Caldas, Brazil). Geofísica Internacional, 61(3), 251–266. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2022.61.3.2207>

GEDGE, M. & HILL, M. (2012). Acoustofluidics 17: Theory and Applications of Surface Acoustic Wave Devices for Particle Manipulation. Lab on A Chip, 12, 2998. <https://doi.org/10.1039/c2lc40565b>

GERAÇÃO controlada com destinação segura disposição total a seco - Barragens e seus sistemas de gestão e tendências para o tratamento, disposição e reaproveitamento de rejeitos e resíduos. Inthemine, v. 14, n.81, p. 19 -26, 2019. (Especial rejeitos).

GEOFFREY S.S. & NDLOVU, S. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2. [10.1016/j.jece.2014.07.021](https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.021).

GOLDER ASSOCIATES. (2012). Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – INB UTM Caldas. Technical Report, Belo Horizonte.

GRANJA BRUÑA, J.L., TURU, V., CARRASCO, R.M., MUÑOZ-MARTÍN, A., ROS, X., FERNÁNDEZ-LOZANO, J., SOTERES, R.L., KARAMPAGLIDIS, T., LÓPEZ-SÁEZ, J.A. & DE PEDRAZA, J. (2021). Geophysical characterization of the El Cervunal kame complex (Sierra de Gredos, Iberian Central System): Insight of infill geometry and reconstruction of former glacial formations. *Journal of Applied Geophysics*. 195. 104478. [10.1016/j.jappgeo.2021.104478](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104478).

GRELLE, G. & GUADAGNO, F. (2009). Seismic refraction methodology for groundwater level determination: “Water seismic index”. *J Appl Geophys*. 68. 301-320. [10.1016/j.jappgeo.2009.02.001](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.001).

GUEDES, V., MACIEL, S. & ROCHA, M. (2021). Refrapy: A Python program for seismic refraction data analysis. *Computers & Geosciences*. 159. 105020. [10.1016/j.cageo.2021.105020](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.105020).

GUEDES, V., BORGES, W.R., DA CUNHA, L.S., & MACIEL, S.T. (2022). Characterization of an earth dam in Brazil from seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves. *Journal of Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104893>

GUIRELI NETTO, L., MALAGUTTI FILHO, W., & GANDOLFO, O.C.B. (2020a). Detection of seepage paths in small earth dams using the self-potential method (SP). *REM, Int Eng J*, 73, 303-310. <https://doi.org/10.1590/0370-44672018730168>

GUIRELI NETTO, L., GANDOLFO, O.C.B., MALAGUTTI FILHO, W., DOURADO, J.C., MOREIRA, C.A. & CAMARERO, P.L. (2020b). A utilização de métodos geofísicos na investigação de uma pequena barragem de terra. *Boletim SBGf*, n.112, jan., fev., mar. Disponível em: <https://www.flipsnack.com/sbgf2019/boletim-112-sbgf.html>

GUIRELI NETTO, L., SINGHA, K., MOREIRA, C.A., GANDOLFO, O.C.B. & ALBARELLI, D.S.N.A. (2023). Investigation of fractured rock beneath a uranium-tailing storage dam through UAV digital photogrammetry and seismic refraction tomography. *Front. Earth Sci*. 11:1281076. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1281076>

GUPTA, A. & YAN, D.S. (2006). *Mineral Processing Design and Operation*, Elsevier Science Publishers. p 693. [10.1016/B978-0-444-51636-7.50036-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51636-7.50036-X)

HAMLIN, J.E. & LLOYD, C.B. (2021). Geophysical investigation and monitoring of dam infrastructure. *Dams and Reservoirs*. 31:2, 57-66, <https://doi.org/10.1680/jdare.21.00014>

HANDY, R. L. (2007). *Geotechnical Engineering: Soil and Foundation Principles and Practice*. 5th ed. New York: McGraw-Hill.

HARDIN, B.O. & DRNEVICH, V.P. (1972). Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects, *J. Soil Mech. and Foundations Div.*, SM 6:603–624.

HARTWIG, M.E. & MOREIRA, C.A. (2021). Integration of multisources data for quarry slope stability assessment in the Itaoca district (Southeastern Brazil). *Anais Da Academia Brasileira De Ciências*, 93(1), <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190322>

- HEIDER, M. (2009). Urânio, DNPM, Brasília, p. 71-77, Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/2-3-uranio>. Acesso em: 01/11/2021.
- HERRINGTON, R. (2021). Mining our green future. *Nature Reviews Materials*. 6, 456–458. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00325-9>
- HOLMES, D.C., PITTY, A.E. & NOY, D.J. (1992). Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 45, p. 215-247.
- HORE-LACY, I. (2016). Uranium for Nuclear Power: Resources, Mining and Transformation to Fuel. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03309-6>
- IKARD, S., RITTGERS, J. & MOONEY, M. (2014). Geophysical Investigation of Seepage Beneath an Earthen Dam. *Groundwater*. 53. [10.1111/gwat.12185](https://doi.org/10.1111/gwat.12185).
- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL S.A - INB. (2012). Projeto Executivo da Barragem de Rejeitos da Mina Osamu Utsumi, UTM-Caldas, 9p.
- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL S.A - INB. (2021). Sítio contendo informações sobre a disposição de rejeitos da mineração Osamu Utsumi. Disponível em: [http:// www.inb.gov.br/](http://www.inb.gov.br/). Acesso em: out.2021.
- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL S.A - INB. (2022). Plano de ação de emergência – PAE, Barragem de rejeitos, Unidade de descomissionamento de Caldas. Disponível em: <https://www.inb.gov.br/Media-Center/Barragem-Caldas>. Acesso em mar.2023.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. (1976). Estudo geológico-geotécnico preliminares para abertura de Cava da Mina do Cercado (Poços de Caldas, MG). São Paulo, IPT, v.4 (Relatório nº 9.571).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. (1981). Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. v.1, São Paulo.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. 2018. Geological classification of uranium deposits and description of selected examples. Viena, 430p. Disponível em [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1842\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1842_web.pdf). Acesso em 06/01/2021
- ISLAM, K. & MURAKAMI, S. (2021). Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Glob. Environ. Chang*, 70, 102361. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>
- JACOBS, J.A., LEHR, J.H. & TESTA, S.M. (2014). Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation. John Wiley & Sons. 520p.
- JAEGER, C. (1979). Dam foundations and tunnelling. In *Rock Mechanics and Engineering* (pp. 359-378). Cambridge: Cambridge University Press. [doi:10.1017/CBO9780511735349.016](https://doi.org/10.1017/CBO9780511735349.016)
- JAIN, R. (2015). Environmental Impact of Mining and Mineral Processing: Management, Monitoring, and Auditing Strategies. Butterworth-Heinemann; 1st Edition. p. 322.

JANSEN, R.B. (1983). Dams and Public Safety, A Water Resources Technical Publication, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver.

JENSEN, J.R. (2009). Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP, Parêntese, 604p.

JOHNSON, D.B. & HALLBERG, K.B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of the total environment*, v. 338, n. 1-2, p. 3-14.

JUNAID, M., ABDULLAH, R.A., SA'ARI, R., REHMAN, H., SHAH, K.S., ULLAH, R., ALEL, M.N.A., ZAINAL, I.Z. & ZAINUDDIN, N.E. (2022). Quantification of Rock Mass Condition Based on Fracture Frequency Using Unmanned Aerial Vehicle Survey for Slope Stability Assessment. *J Indian Soc Remote Sens* 50, 2041–2054. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01578-9>

KANJI, M.A. & FIGUEIRA, P.C.S. (1990). Quantificacao tentativa do uso de instrumentacao em barragens. In *Singeo'90: Anais*. Rio de Janeiro: Abms/Abge.

KARASTATHIS, V.K., KARMIS, P., DRAKATOS, G., & STAVRAKAKIS, G.N. (2002). Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams. Application at the Marathon Dam. *Journal of Applied Geophysics*, 50, 247-260.

KARATO, S.-I. & WANG, D. (2013). Electrical Conductivity of Minerals and Rocks. In *Physics and Chemistry of the Deep Earth*, S.-I. Karato (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781118529492.ch5>

KARGARAN, F. & GHALAMZAN, F. (2018). Application of seismic refraction and tomography methods to the assessment of the Sivaki dam site. *International Journal of Engineering and Technology*. 7. [10.14419/ijet.v7i3.12572](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.12572).

KAUFMAN, A.A. & ANDERSON, B.I. (2010). Principles of Electric Methods in Surface and Borehole Geophysics. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, Elsevier, Volume 44, ISBN 9780444529947, [https://doi.org/10.1016/S0076-6895\(10\)44014-7](https://doi.org/10.1016/S0076-6895(10)44014-7).

KEATON, J.R. (2018). Hooke's Law. In: Bobrowsky, P.T., Marker, B. (eds) *Encyclopedia of Engineering Geology*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9\\_157](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_157).

KHANDELWAL, M. (2012). Correlating P-wave Velocity with the Physico-Mechanical Properties of Different Rocks. *Pure and Applied Geophysics*. 170. [10.1007/s00024-012-0556-7](https://doi.org/10.1007/s00024-012-0556-7).

KHOBRADE, K. (2020). Impact of Mining Activity on environment: An Overview; *International Journal of Scientific and Research Publications*. 10(05) (2250-3153). <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.10.05.2020.p10191>

KNÖDEL, K., LANGE, G. & VOIGT, H-J. (2007). *Environmental Geology: Handbook of field methods and case studies*. Springer, 1357p.

KOPPE, J.C. (2021). Lessons Learned from the Two Major Tailings Dam Accidents in Brazil. *Mine Water Environ* 40, 166–173. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00722-6>

KREBES, D. (2019). *Seismic Wave Theory*. Cambridge University Press.

KUCHENBECKER, M. (2018). Recursos Minerais de Minas Gerais On-Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, meio ambiente e

mineração de Minas Gerais. Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE).

LAI, C.G. & CARRERA, J.G.F. (2012). Stable inversion of measured VP and VS to estimate porosity in fluid-saturated soils. *Géotechnique*. 62. 359-364. 10.1680/geot.9. P.133.

LANKSTON, R.W. (1990). "3. High-Resolution Refraction Seismic Data Acquisition and Interpretation," *Investigations in Geophysics*: 45-74. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802785.ch3>

LAUF, R.J. (2008). *Introduction to Radioactive Minerals*. Schiffer Pub. 144p.

LAWRENCE S.D. (2015). *Physical Hydrology: Third Edition*. Waveland Press, 643p.

LEONARDI, F.A., LADEIRA, F.S.B. & DOS SANTOS, M. (2011). Paleosuperfícies e perfis bauxíticos no Planalto de Poços de Caldas, São Paulo/Minas Gerais, Brasil. *Geociências*, v. 30, n. 2, p. 147-160, Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/73046>>.

LESMESS, D.P. & FRIEDMAN, S.P. (2005). Relationships between the Electrical and Hydrogeological Properties of Rocks and Soils. In: Rubin, Y., Hubbard, S.S. (eds) *Hydrogeophysics*. Water Science and Technology Library, vol 50. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5\\_4](https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_4)

LI, Q., ZHANG, J., GAO, J., HUANG, Z., ZHOU, H., DUAN, H. & ZHANG, Z. (2022). Preparation of a novel non-burning polyaluminum chloride residue (PACR) compound filler and its phosphate removal mechanisms. *Environ Sci Pollut Res* 29, 1532–1545 <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15724-2>

LILLESAND, T., KIEFER, R.W. & CHIPMAN, J. (2015). *Concepts and foundations of remote sensing*. Remote Sensing and Image Interpretation: New York, USA, Willey, 736p.

LIU, E. & MARTINEZ, A. (2012). 2 - Fundamentals of seismic anisotropy, *Seismic Fracture Characterization*, EAGE, 2012, Pages 29-57, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9789073834408500073>).

LLOPIS, J.L., SHARP, M.K., BUTLER, D.K. & YULE, D.E. (1995). "Applied geophysical techniques to evaluate earth dams and foundations", *Proc. SPIE 2457, Nondestructive Evaluation of Aging Structures and Dams*. <https://doi.org/10.1117/12.209402>

LOKE, M.H. (2000). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. [S.I.]: Standford: Standford University Press.

LOKE, M.H., ACWORTH, I. & DAHLIN, T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, v. 34, p. 182–187, ISSN 18347533.

LOTTERMOSER, B.G. (2010). *Mine wastes (third edition): characterization, treatment and environmental impacts*, pp 1–400, Springer.

LOWRIE, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. 2. Ed.[s.1.]. Cambridge University Press.

MAGNO JÚNIOR, L.B. (1985). Osamu Utsumi Mine, Geologic Presentation. In: Relatório interno NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro, RJ.

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

MARJORIBANKS, R. (2010). Geological Methods in Mineral Exploration and Mining. 2. Ed. pp 1- 238, Springer.

MASINDI, V., FOTEINIS, S., RENFORTH, P., NDIRITU, J., MAREE, J.P., TEKERE, M. & CHATZISYMEON, E. (2022). Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review. Ecological Engineering. [10.1016/j.ecoleng.2022.106740](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106740).

MATHER, B. & DELHAYE, R. (2019). PyCurious: a Python module for computing the Curie depth from the magnetic anomaly, J. Open Sourc. Softw. 4. 1544, [10.21105/joss.01544](https://doi.org/10.21105/joss.01544)

MAVKO, G. & JIZBA, D. (1994). The relation between seismic P- and S-wave velocity dispersion in saturated rocks. Geophysics. 59: 87-92. <https://doi.org/10.1190/1.1443537>

MENESES, P.R. & ALMEIDA, T. (2012). Introdução ao processamento digital de imagens. Brasília, Universidade de Brasília, CNPq, 276p.

MENTE, A. & MONTALVERNE, A.F. (1982). Mapa hidrogeológico do Brasil na escala 1:2.500.000. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 4., 1981, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABRH, 1981. V.1, p. 597-610.

MIAO, Y., ZHANG, H., HE, H.-J., SHI, Y. (2022). In-situ properties of Poisson's ratio based on KiK-net seismic observations, Engineering Geology, 296, 106463, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106463>.

MICKUS, K. (2021). Chapter 5 - Geophysical methods. Editor(s): Abdel-Mohsen O. Mohamed, Evan K. Paleologos, Fares M. Howari. Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering, Butterworth-Heinemann.

MILLER, G. F., & PURSEY, H. (1955). On the Partition of Energy between Elastic Waves in a Semi-Infinite Solid. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 233(1192), 55–69. <http://www.jstor.org/stable/99853>

MILSOM, J. & ERIKSEN, A. (2013). Field Geophysics: the geological field guide series. 4. ed. Environmental & Engineering Geoscience; 19 (2): 205–206. doi: <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.19.2.205>

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. (2016). Geologia, Mineração e Transformação Mineral, MME, Brasília. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacaomineral/pagina-inicial>

MINSLEY, B.J., BURTON, B.L., IKARD, S. & POWERS, M.H. (2011). Geophysical investigations at Hidden Dam, Raymond, California: summary of fieldwork and data analysis. Open File Report 2010-2013. United States Geological Survey.

- MIZUNO, M. & HIROSE, T. (2017). WATER STORAGE, TRANSPORT, AND DISTRIBUTION – Instrumentation and Monitoring of Dams and Reservoirs - Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Unesco-Eolss, sample chapters. Available at: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E2-12-02-06.pdf>
- MOGES, M.M., ABAY, D., & ENGIDAYEHU, H. (2018). Investigating reservoir sedimentation and its implications to watershed sediment yield: The case of two small dams in data-scarce upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 23(3), 217–229. <https://doi.org/10.1111/lre.12234>.
- MORAES, F.T. & JIMÉNEZ-RUEDA, J.R. (2008). Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (1), p. 196-208.
- MOREIRA, C.A., DOS SANTOS, E.G., ILHA, L.M. & PAES, R.A.S. (2019). Recognition of Sulfides Zones in Marble Mine Through Comparative Analysis of Electrical Tomography Arrangements. *Pure Appl. Geophys.* 176, 4907–4920. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02243-y>
- MOREIRA, C.A., HELENE, L.P.I., HARTWIG, M.E., LOURENÇO, R., do NASCIMENTO, M.M.P. & TARGA, D.A. (2021). Geophysical and Structural Survey in the Diagnosis of Leaks at a Fuel Station in a Uranium Mine in Decommissioning Phase (Poços de Caldas, Brazil). *Pure Appl. Geophys.* 178, 3489–3504. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02828-6>
- MOREIRA, C.A., GUIRELI NETTO, L., CAMARERO, P.L., BERTULUCI, F.B., HARTWIG, M.E. & DOMINGOS, R. (2022). Application of electrical resistivity tomography (ERT) in uranium mining earth dam. *J Geophys Eng*, Volume 19, Issue 6, 1265–1279, <https://doi.org/10.1093/jge/gxac082>
- MUSSETT, A.E. & KHAN, M.A. (2000). *Looking Into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics*. New York: Cambridge University Press, 470p.
- NAZARCHUK, Z., SKALSKYI, V. & SERHIYENKO, O. (2017). Propagation of Elastic Waves in Solids. In: *Acoustic Emission. Foundations of Engineering Mechanics*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49350-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49350-3_2)
- NAZARIAN, S., STOKOE II, K.H., HUDSON, W.R. (1983). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. *Transp. Res. Rec.* 930, 38–45.
- NEA. (2018). *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*, OECD Publishing, Paris.
- NESBIT, P.R., DURKIN, P.R., HUGENHOLTZ, C.H., HUBBARD, S.M. & KUCHARCZYK, M. (2018). 3-D stratigraphic mapping using a digital outcrop model derived from UAV images and structure-from-motion photogrammetry. *Geosphere*; 14 (6): 2469–2486. <https://doi.org/10.1130/GES01688.1>
- NEUMAN, S.P. (2005). Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks. *Hydrogeology Journal*, v. 13, p 124-147. [10.1007/s10040-004-0397-2](https://doi.org/10.1007/s10040-004-0397-2)
- NONOGAKI, S., MASUMOTO, S., NEMOTO, T. ET AL. (2021). Voxel modeling of geotechnical characteristics in an urban area by natural neighbor interpolation using a large number of borehole logs. *Earth Sci Inform* 14, 871–882). <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00600-x>

NOWAK, M.M., DZIOB, K., & BOGAWSKI, P. (2018). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in environmental biology: A Review. *European Journal of Ecology*, 4(2), 56–74. <https://doi.org/10.2478/eje-2018-0012>

NÓBREGA, F. A. (2007). Análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina – Estudo de caso da pilha de estéril BF-4, Mina Osamu Utsumi, INB Caldas, Minas Gerais. 2007. 86 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG.

NOBREGA, F.A., LIMA, H.M. & LEITE, A.L. (2008). Análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina: estudo de caso da pilha de estéril BF-4, Mina Osamu Utsumi, INB Caldas, Minas Gerais. *Rev. Esc. Minas, Ouro Preto*, 61:197-202.

NORDSTROM, D.K., MCNUTT, R.H., PUIGDOMENECH, I., SMELLIE, J.A.T. & WOLF, M. (1992). Ground water chemistry and geochemical modeling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and the Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 45, 249-287.

NYSTRÖM, E., KAASALAINEN, H. & ALAKANGAS, L. (2019). Prevention of sulfide oxidation in waste rock by the addition of lime kiln dust. *Environ Sci Pollut Res* 26, 25945–25957 <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05846-z>

OGA, S., CAMARGO, M.M.A & BATISTUZZO, J.A.O. (2014). *Fundamentos de Toxicologia*. 4ª edição. São Paulo: Atheneu Editora, 685p.

OLAYINKA, A.I. & YARAMANCI, U. (2000). Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, v. 45, p. 63–81, ISSN 09269851.

OLIVEIRA, A. G. (1974). Mineralização de urânio e molibdênio no planalto de Poços de Caldas, MG. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*. Porto Alegre. 17:185-190.

OLIVEIRA, L., BRAGA, M.A., PROSDOCIMI, G.A., DE SOUZA CUNHA, A., SANTANA, L., & DA GAMA, F. (2023). Improving tailings dam risk management by 3D characterization from resistivity tomography technique: Case study in São Paulo – Brazil. *Journal of Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104924>

ORELLANA, E. (1972). *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo.

OWEN, J.R., KEMP, D., LÈBRE, É., SVOBODOVA, K. & MURILLO, G.P. (2020). Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 42, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101361>

PALMER, D. (1981). An Introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *GEOPHYSICS*, 46(11): 1508. <https://doi.org/10.1190/1.1441157>

PARASNIS, D. S. (1962). *Principio de geofisica aplicada*. Trad. E. Orellana (Original - 1962). Madrid: Ed. Paraninfo, 1970. 208p p.

PARASNIS, D.S. (1967). Three-dimensional electric mise-a-la-masse survey of an irregular lead-zinc-copper deposit in central Sweden. *Geophysical Prospecting*, 15, 407– 437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1967.tb01796.x>

- PARK C., PARK C.B. & MILLER, R.D. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*. 64:800–808. - <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444590>
- PARK, C., MILLER, R.D., XIA, J. & IVANOV, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1): 60. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>
- PARK, C. (2013). MASW for geotechnical site investigation. *The Leading Edge*; 32 (6): 656–662. doi: <https://doi.org/10.1190/tle32060656.1>
- PARKHOMENKO, E.I. (1967). Electrical Resistivity of Rocks. In: Keller, G.V. (eds) *Electrical Properties of Rocks*. Monographs in Geoscience. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8609-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8609-8_3)
- PATERSON, N. (1995). Application of Geophysical Methods to the Detection and Monitoring of Acid Mine Drainage. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1995. [10.4133/1.2922136](https://doi.org/10.4133/1.2922136)
- PIRES, F. R. M. (2013). *Urânio no Brasil: geologia, jazidas e ocorrências*. Primeira Edição. Eletrobrás. Rio de Janeiro.
- POETER, E.P., FAN, Y., CHERRY, J.A., WOOD, W.W., & MACKAY, D.M. (2020). *Groundwater in Our Water Cycle*. The groundwater project, Guelph, Ontario, Canada, <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-1-3>
- RABEL, W. (2009). Seismic methods. In: Kirsch, R. (eds) *Groundwater Geophysics*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7_2)
- RAJENDRAN, S. & MURTY, CH. V.G.K. (2023). *Mineral Processing, Beneficiation Operations and Process Optimization Through Modeling*, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823149-4.00016-8>.
- REYNOLDS, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York, NY: Wiley-Blackwell.
- RICHART, F.E., HALL, J.R., & WOODS, R.D. (1970), *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 414p.
- RIZZINI, C. T. (1979). *Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos sociológicos e florísticos*. 1ª ed. São Paulo: HUCITEC, Editora da Universidade de São Paulo, 2º v., 374 p.
- ROHDEWALD, S. (2011). Interpretation of First-Arrival Travel Times with Wavepath Eikonal Travelttime Inversion and Wavefront Refraction Method. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP. 31-38. [10.4133/1.3614086](https://doi.org/10.4133/1.3614086).
- ROTTA, L.H.S., ALCÂNTARA, E., PARK, E., NEGRI, R.G., LIN, Y.N., BERNARDO, N. & SOUZA FILHO, C.R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 90:102119. [10.1016/j.jag.2020.102119](https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119)
- RÜCKER, C., GÜNTHER, T., WAGNER, F.M. (2017). pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics, *Computers and Geosciences*, 109, 106-123, [10.1016/j.cageo.2017.07.011](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.011).

- SALEM, H. (2000). Poisson's Ratio and the Porosity of Surface Soils and Shallow Sediments, Determined from Seismic Compressional and Shear Wave Velocities. *Geotechnique*. 50. 461-463. [10.1680/geot.2000.50.4.461](https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.4.461).
- SALVINI, R., MASTROROCCO, G., SEDDAIU, M., ROSSI, R. & VANNESCHI, C. (2017). The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling, *Geomatics, Nat Hazards Risk*, 8:1, 34-52, [10.1080/19475705.2016.1199053](https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1199053)
- SAMPAIO, J.A., ALVES, S.C.F. & ALMEIDA, P.F.B. (2008). Capítulo 30 - Nefelina Sienito. *Rochas e Minerais Industriais – CETEM*, 2a Edição.
- SANTOS, L.F. (2020). Utilização de dados 3D de alta resolução para detecção de mudanças em movimentos de massa em Perus, São Paulo (SP). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. [10.11606/D.44.2020.tde-25082020-090103](https://doi.org/10.11606/D.44.2020.tde-25082020-090103).
- SARI, M., SEREN, A. & ALEMDAG, S. (2020). Determination of geological structures by geophysical and geotechnical techniques in Kirklartepe Dam Site (Turkey). *Journal of Applied Geophysics*. 182. 104174. [10.1016/j.jappgeo.2020.104174](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104174).
- SASTRY, R.G. & CHAHAR, S. (2019). Geoelectric versus MASW for geotechnical studies. *J Earth Syst Sci* 128, 34. <https://doi.org/10.1007/s12040-018-1061-x>
- SATO, H., & FEHLER, M.C. (2009). Heterogeneity in the Lithosphere. In *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*, Springer, Berlin, Heidelberg, 7-40. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89623-4>
- SCHMIERMUND, R. & DROZD, M. (1997). Acid mine drainage and other mining-influenced waters (MIW). *Mining Environmental Handbook: Effects of Mining on the Environment and American Environmental Controls on Mining*: World Scientific. 599–617.
- SCHORSCHER, H.D. & SHEA, M.E. (1992). The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 45, p. 25-51.
- SCHUCK, A. & LANGE, G. (2007). *Seismic Methods*. In: *Environmental Geology*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3_11)
- SCHUSTER, G.T. & QUINTUS-BOSZ, A. (1993). "Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory," *GEOPHYSICS* 58: 1314-1323. <https://doi.org/10.1190/1.1443514>
- SCHUSTER, R.L. (2006). *Interaction of dams and landslides—Case studies and mitigation*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1723, 107 p.
- SECRETARIA DE ESTADO DA SAÚDE DE MINAS GERAIS – SESMG. (2009). *Projeto Planalto de Poços de Caldas. Pesquisa câncer e radiação natural*: Minas Gerais. Belo Horizonte.
- SEISIMAGER 2D MANUAL. Versão 3.3 de outubro de 2009. Disponível em:< [http://epsc.wustl.edu/~epsc454/manuals/SeisImager2D\\_Manual\\_v3.3.pdf](http://epsc.wustl.edu/~epsc454/manuals/SeisImager2D_Manual_v3.3.pdf)>. Acesso em: 05 de agosto de 2023.
- SENGUPTA, M. (2021). *Environmental Impacts of Mining Monitoring, Restoration, and Control*, Second Edition. CRC Press. p. 374.

SHARMA, P. (1997). Frontmatter. In *Environmental and Engineering Geophysics* (pp. I-Viii). Cambridge: Cambridge University Press.

SHEA, M.E. (1991). Isotopic geochemical characterization of selected nepheline syenites and phonolites from the Poços de Caldas alkaline complex, Minas Gerais, Brazil. Poços de Caldas Report nº 4. In: NAGRA, SKB, UK DOE. Poços de Caldas Project.

SOUSA, D.J.S.C. de. (2013). Aterros Estruturais de Barragens. Uma contribuição para o seu dimensionamento hidráulico. 225 p. Dissertação (Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SOUZA, L.A.P. (2006). *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo. [10.11606/T.21.2006.tde-30102006-171206](https://doi.org/10.11606/T.21.2006.tde-30102006-171206).

SOUZA, L.A.P. & GANDOLFO, O.C.B. (2012). Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. 2. 9-27.

STEAD, D., DONATI, D., WOLTER, A. & STURZENEGGER, M. (2019). Application of Remote Sensing to the investigation of rock slopes: Experience gained and Lessons learned: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v.8, no.7, p. 296, [10.3390/ijgi8070296](https://doi.org/10.3390/ijgi8070296).

STEEPLES, D.W. (2005). Shallow Seismic Methods. In: Rubin, Y., Hubbard, S.S. (eds) *Hydrogeophysics*. Water Science and Technology Library, vol 50. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5\\_8](https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_8)

STOKOE, K.H. & SANTAMARINA, J. (2000). Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering. *GeoEng 2000*. 1490-1536.

STROBBIA C. (2002). *Surface Wave Methods: Acquisition, Processing and Inversion*. PhD Diss. Politecnico di Torino. Italy

STUMM, W. & MORGAN, J. J. (1989). *Aquatic chemistry*: New York: Interscience, 1RRITCEY, G. M. *Tailings management: problems and solutions in the mining industry*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers; New York: Elsevier Science Pub. Co. [distributor for U.S. and Canada], 970 p.

SZALAI, S., NOVÁK, A. & SZARKA, L. (2011). Which geoelectric array sees the deepest in a noisy environment? Depth of detectability values of multielectrode systems for various two-dimensional models, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 36, Issue 16, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.01.008>

TARGA, D.A. (2018). Diagnóstico hidrogeológico-geotécnico por meio de análise estrutural na Mina Osamu Utsumi (Poços de Caldas - MG). 68 f. Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/203228>.

TARGA, D.A., MOREIRA, C.A. & CASAGRANDE, M.F.S. (2021). Hydrogeological Analysis of Sulfide Tailings at a Uranium Mine Using Geophysical and Hydrochemical Methods. *Mine Water Environ* 40, 671–689. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00791-1>

TATHAM R., & MCCORMICK, M. (1991). Multicomponent seismology in petroleum exploration: Society of Exploration Geophysicists.

TEDESCHI, M.F., VIEIRA, P.L.N.C.R., NOVO, T.A. & PEDROSA-SOARES, A.C. (2015). Folhas Caldas (SF.23-V-D-IV) e Poços de Caldas (SF.23-V-C-VI), Escala 1:100.000 (mapas, relatórios, SIG). In: Antônio Carlos Pedrosa Soares; Eliane Voll; André Luiz Profeta. (Org.). Projeto Fronteiras de Minas Gerais. 1ed. Belo Horizonte, MG: CODEMIG, p. 1-1551.

TEDESCHI, L.R. 2005. Hidrogeoquímica e hidrologia do reservatório na cava da mina Osamu Utsumi do Complexo Mineiro – Industrial do Planalto de Poços de Caldas, Caldas, MG. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.

TELFORD, W.M., GELDART, L.P. & SHERIFF, R.E. (1990). Applied Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>

TERZAGHI, K. & PECK, R. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

TOLBERT, J. (1966). The uraniferous zirconium deposits of the Poços de Caldas plateau, Brazil. U.S. Geological Survey Bulletin, 1185, 28p.

ULBRICH, H.H.G.J. (1984). *A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienito do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG*. São Paulo - SP. 446p. Dissertação (Livre Docência) – Universidade de São Paulo - USP.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2023). National Primary Drinking Water Regulations. Retirado de <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulation-table>. Acessado em 08 de Julho de 2024.

UYANIK, O. (2019). Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. Journal of Applied Geophysics. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103832>

VIANA, C.D. (2021). Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. [10.11606/T.44.2021.tde-18012022-122057](https://doi.org/10.11606/T.44.2021.tde-18012022-122057).

VOČADLO, L. (2023). Earth Seismology. Global Geophysics. Disponível em: <https://www.ucl.ac.uk/EarthSci/people/lidunka/GEOL2014/Geophysics4%20-%20Seismic%20waves/SEISMOLOGY%20.htm>

WABER, N.; SCHORSCHER, H.D. & PETERS, T. (1992). Hydrothermal and supergene uranium mineralization at the Osamu Utsumi mine, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. Journal of Geochemical Exploration. 45, p.53-112.

WANG, S., ZHANG, Z., WANG, C., ZHU, C. & REN, Y. (2019). Multistep rocky slope stability analysis based on unmanned aerial vehicle photogrammetry. Environ Earth Sci 78, 260. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8145-z>

WARD, S.H. (1990). Geotechnical and environmental geophysics: volume II, Environmental and Groundwater, Society of Exploration Geophysics.

WATSON, I. & BURNETT, A. (1995). *Hidrology – An environmental approach, theory and application of groundwater and surface water for engineers and geologists*. Boca Raton: CRC Press.

WEI, P. (2022). *Theory of Elastic Waves*. Springer Singapore. 361 pp. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-5662-1>

WIGHTMAN, W. E., JALINOOS, F., SIRLES, P., & HANNA, K. (2003). "Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems." Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, Publication No. FHWA-IF-04-021, September 2003.

WILDEMAN, T.R. & SCHMIERMUND, R. (2004). "Mining-Influenced Waters: Their Chemistry and Methods of Treatment", National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and The 25th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force.

WOESSNER, W.W. & POETER, E.P. (2020). *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.

WRENN, M. E. & SINGH, N. (1987). Gastrointestinal absorption of uranium by man from drinking water. Progress Report. to USEPA. Univ. of Utah.

WU, H., CHEN, J., XU, J., ZENG, G., SANG, L., LIU, Q., YIN, Z., DAI, J., YIN, D., LIANG, J., & YE, S. (2019). Effects of dam construction on biodiversity: A review. *J Clean Prod.* 221. [10.1016/j.jclepro.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.001).

XIAOQIANG, G., KANGLE, Z., TESSARI, A. & GUANGYUN, G. (2021). Effect of saturation on the characteristics of P-wave and S-wave propagation in nearly saturated soils using bender elements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 145. 106742. [10.1016/j.soildyn.2021.106742](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106742).

XUHUA, R., JIAQING, S., NENGHUI, B. & HONGYUN, R. (2008). Stability analysis of concrete gravity dam on complicated foundation with multiple slide planes. *Water Sci Eng.* 1. [10.3882/j.issn.1674-2370.2008.03.007](https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2008.03.007).

YEMEL'YANOV, V.S. & YEVSTYUKHIN, A.I. (1969). CHAPTER I – INTRODUCTION. *The Metallurgy of Nuclear Fuel*. Pergamon, Pages 3-17, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-012073-7.50005-3>.

ZELT, C.A., HAINES, S., POWERS, M.H., SHEEHAN, J., ROHDEWALD, S., LINK, C., HAYASHI, K., ZHAO, D., ZHOU, H-W., BURTON, B.L., PETERSEN, U.K., BONAL, N.D. & DOLL, W.E. (2013). Blind Test of Methods for Obtaining 2-D Near-Surface Seismic Velocity Models from First-Arrival Traveltimes. *J Environ Eng Geophys*, 18, no. 3. 183-194. <http://dx.doi.org/10.2113/JEEG18.3.183>.

ZHANG, L., PENG, M.C. & DONGSHENG X.Y. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment - 4.3 Common Causes of Concrete Dam Failures*. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011HHO92/dam-failure-mechanisms/common-causes-concrete>

ZISMAN, W.A. (1933). A comparison of laboratory and seismologically determined elastic constants of rocks. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00287>

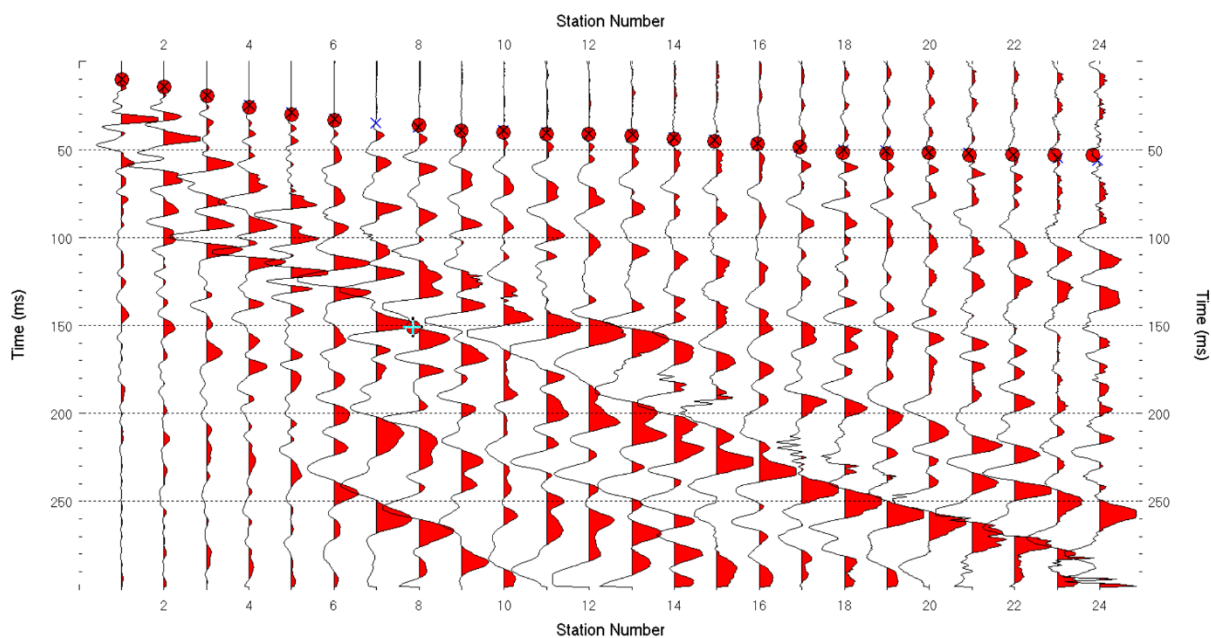
Anexo I: Parâmetros físico-químicos da água subterrânea da área da cava da mina analisados no estudo pioneiro de NORDSTROM et al. (1992).

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F5</b>	<b>SW1</b>
Data	07/07/1988	20/03/1989	16/09/1988	13/04/1989	12/02/1988
T (°C)	22	21	22	24	21
Eh (mV)	338	191	338	462	627
Oxigênio dissolvido	-	< 0,008 <	< 0,008 <	< 0,008 <	< 0,008 <
Alcalinidade	2,0	10	2,65	23,5	< 0,60
Ca	0,47	2,65	111	7,88	127
Mg	0,07	0,07	4,0	0,46	9,25
Sr	0,043	0,009	2,1	0,20	3,19
Ba	0,125	0,13	0,051	0,12	0,025
Na	0,20	0,20	1,28	0,63	2,0
Fe (II)	1,30	1,67	88,7	6,13	50,5
Al	<0,05	0,319	4,42	0,183	98
Mn	0,19	0,318	19	0,13	46
Zn	0,083	0,211	3,27	2,17	12,8
Br	0,04	<0,05	<0,01	<0,05	<0,05
SiO <sub>2</sub>	35	29	36	34	72

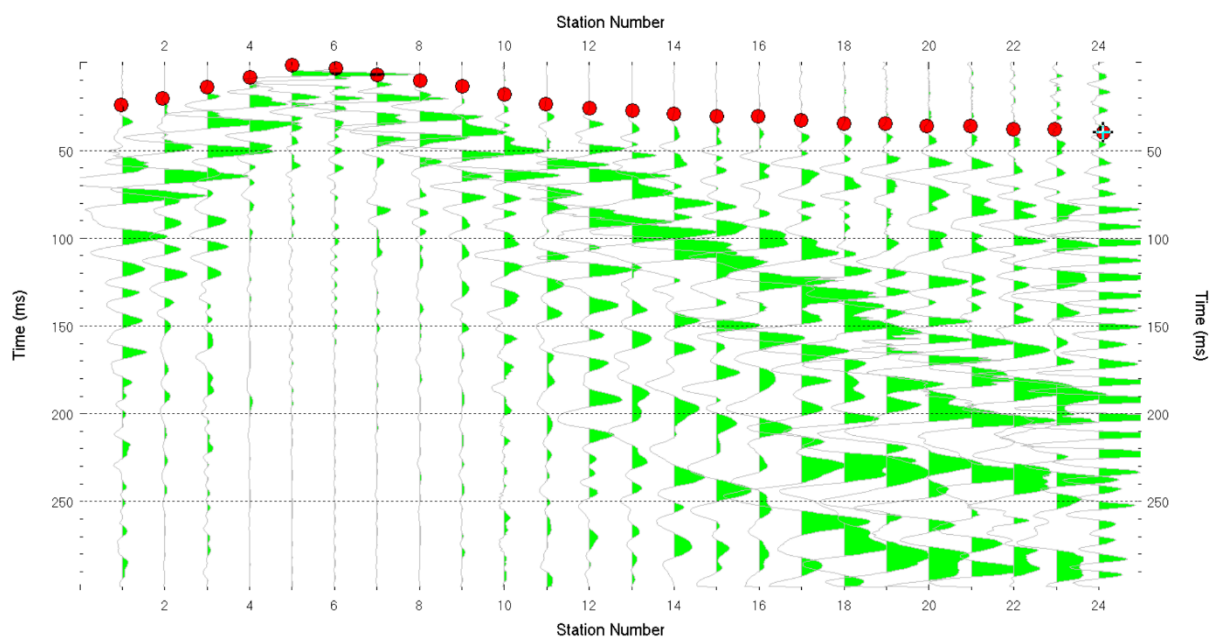
\*valores em mg/L

Anexo II: Sismogramas gerados durante o processamento de tomografia de refração sísmica coletados na área da barragem de armazenamento de rejeito de urânio.

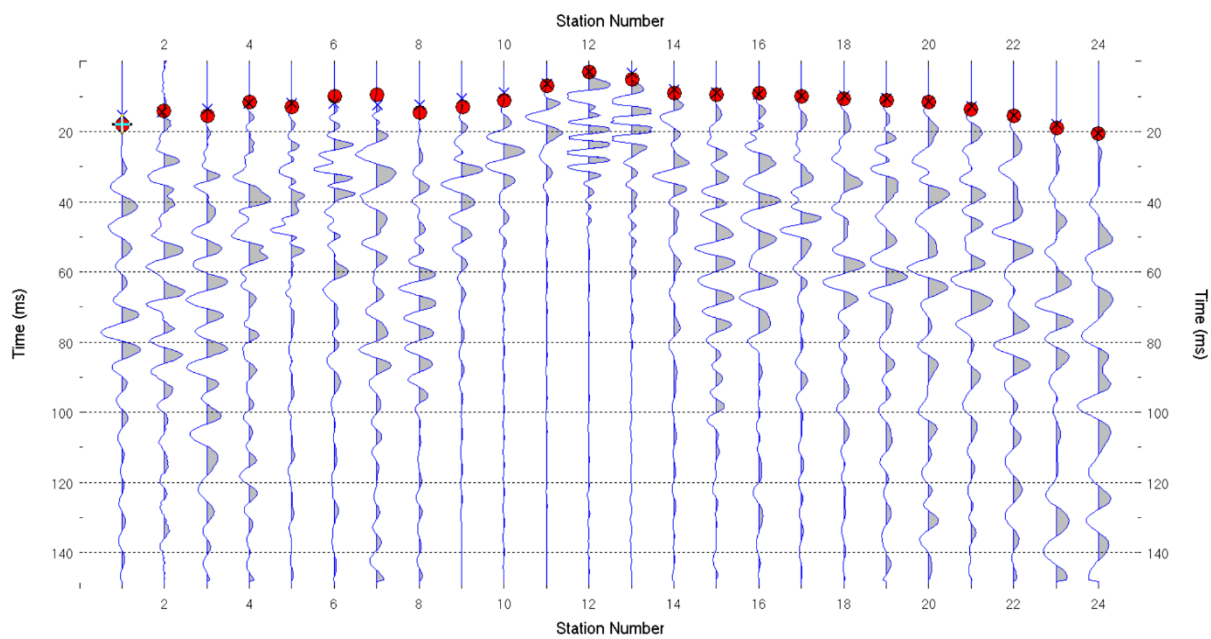
Linha 1: localizada na 1ª berma.



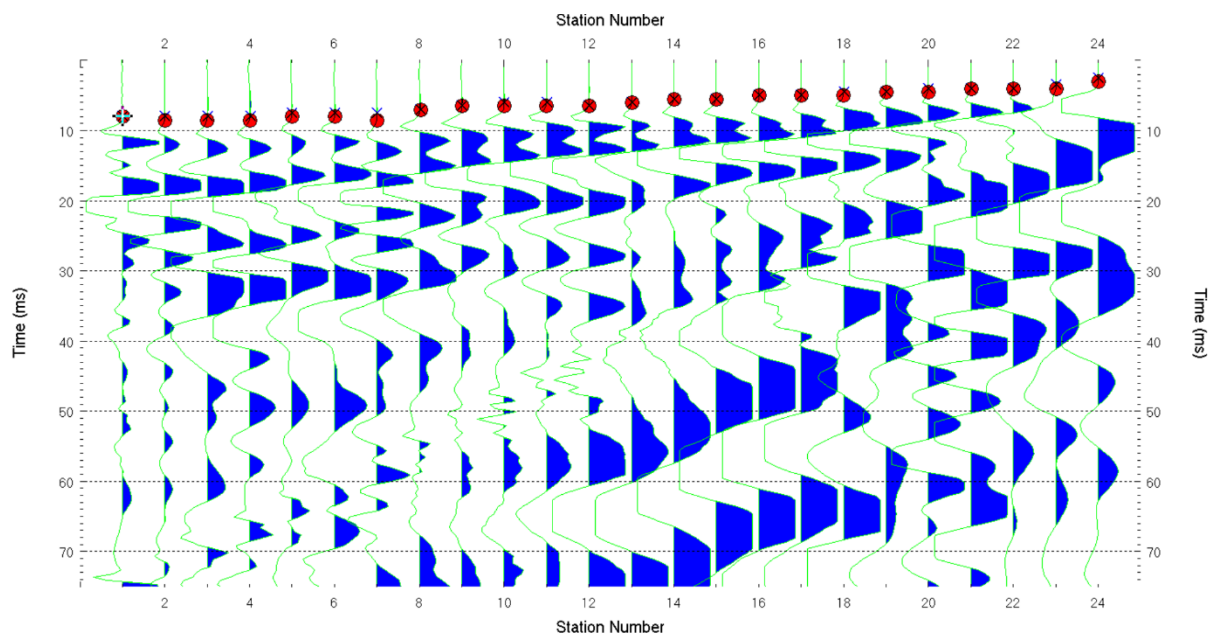
Linha 2: localizada na 2ª berma.



Linha 3: localizada na base do talude de jusante.

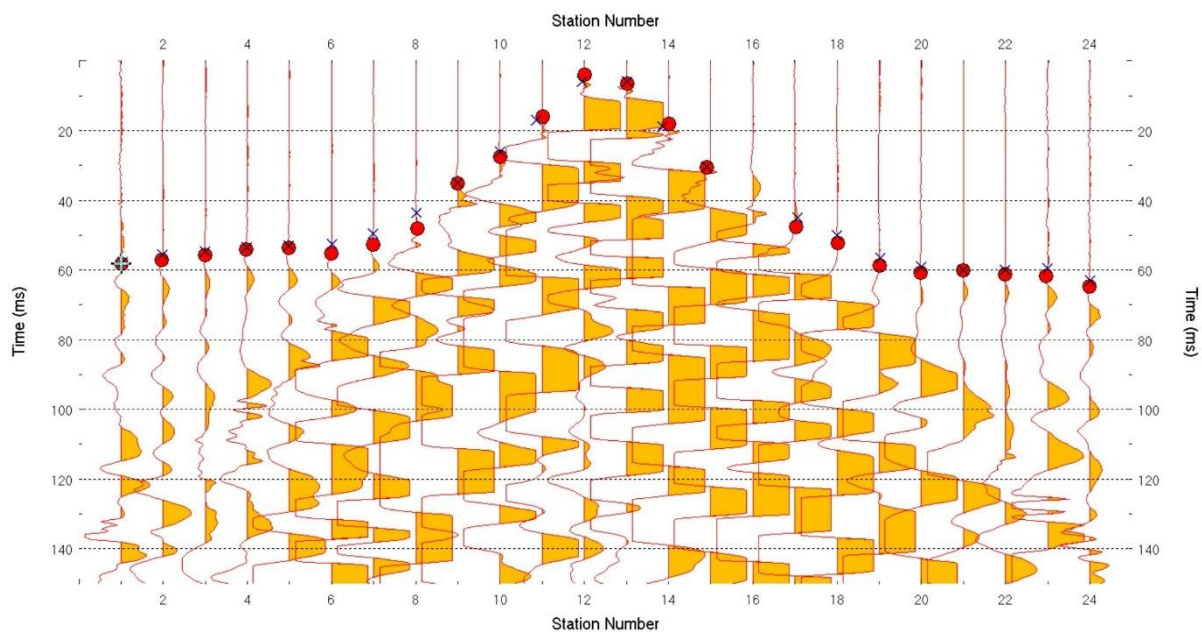


Linha 4: localizada no afloramento próximo a base do talude de jusante.

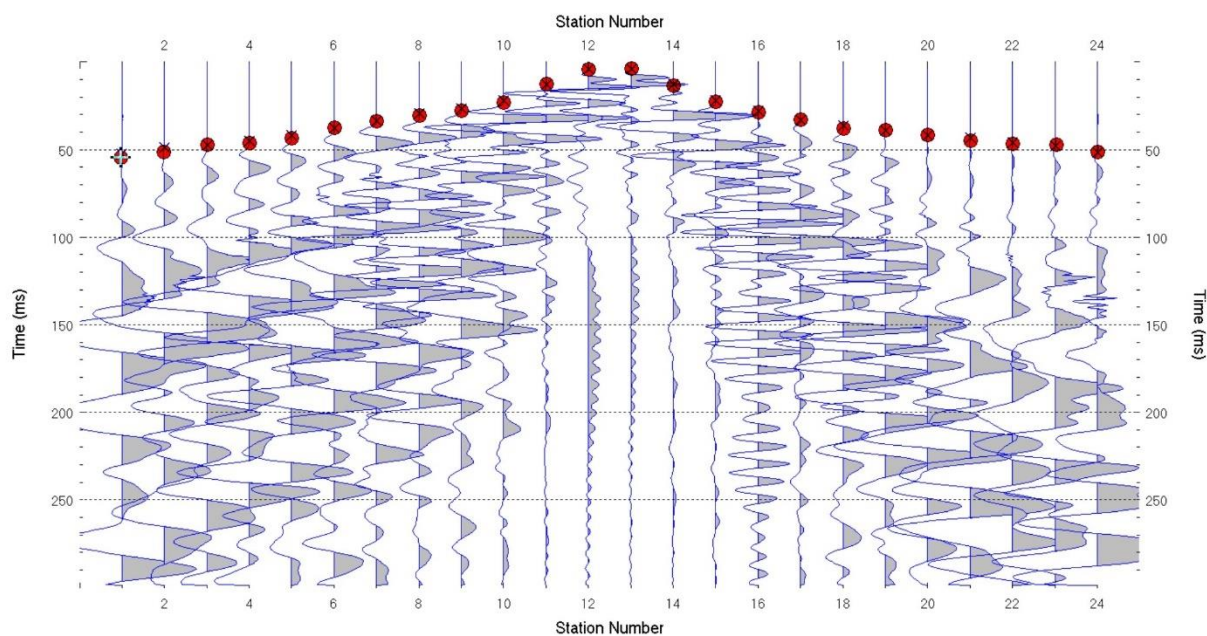


Anexo III: Sismogramas gerados durante o processamento de tomografia de refração sísmica coletados na área das bacias de armazenamento de radioisótopos.

Linha 5: localizada na crista da bacia D1.

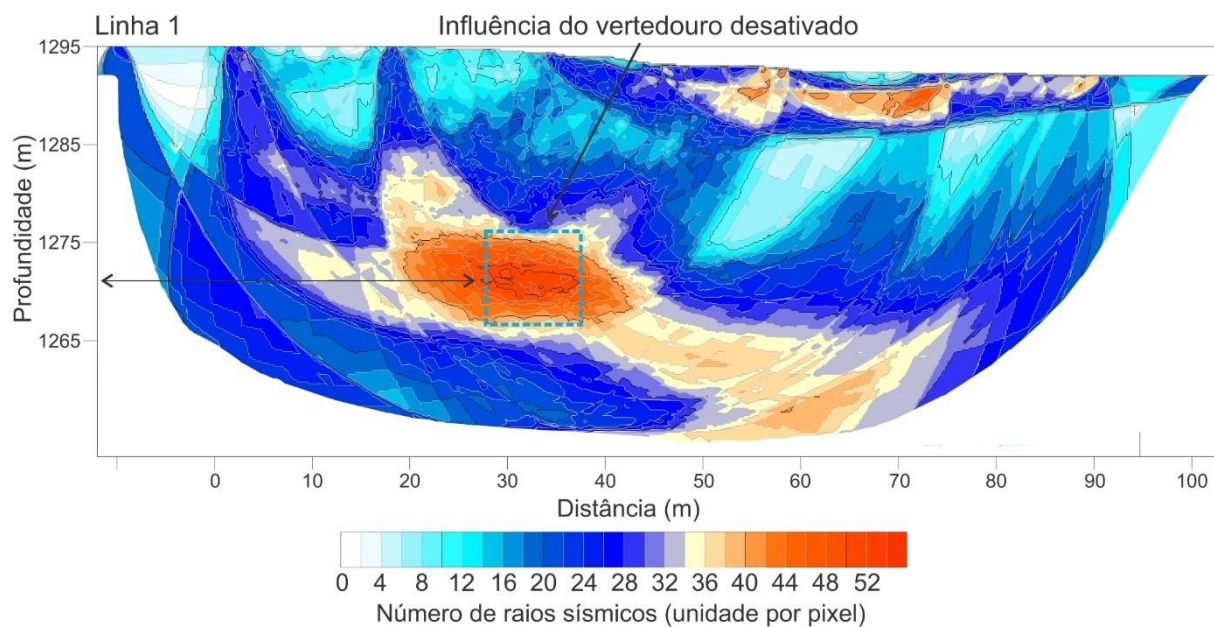


Linha 6: localizada na crista da bacia D2.

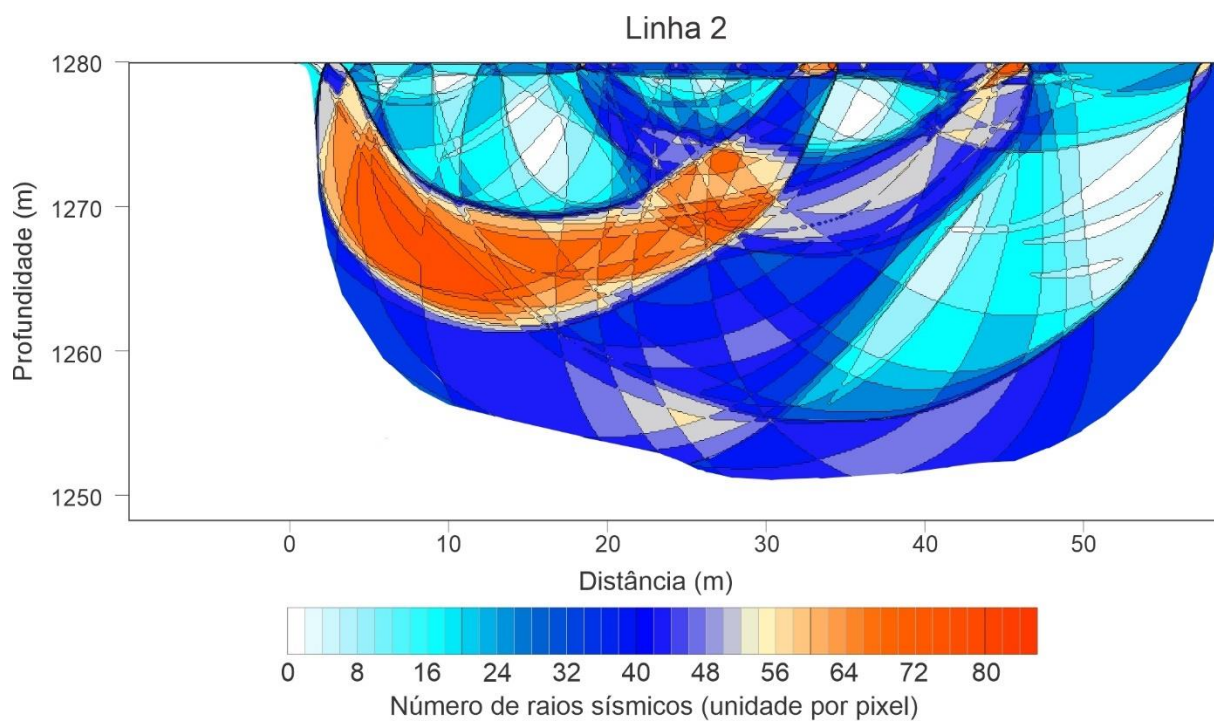


Anexo IV: Seções com o número de raios sísmicos obtidos nas linhas de aquisições de tomografia de refração sísmica coletados na área da barragem de armazenamento de rejeito de urânio.

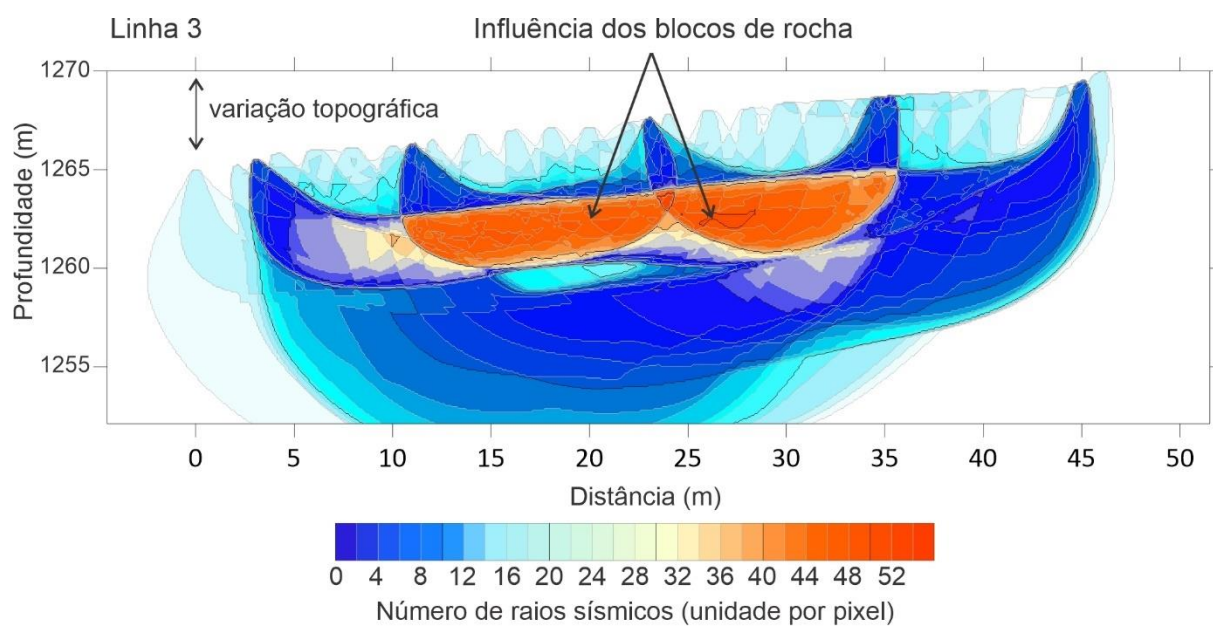
Linha 1: localizada na 1ª berma.



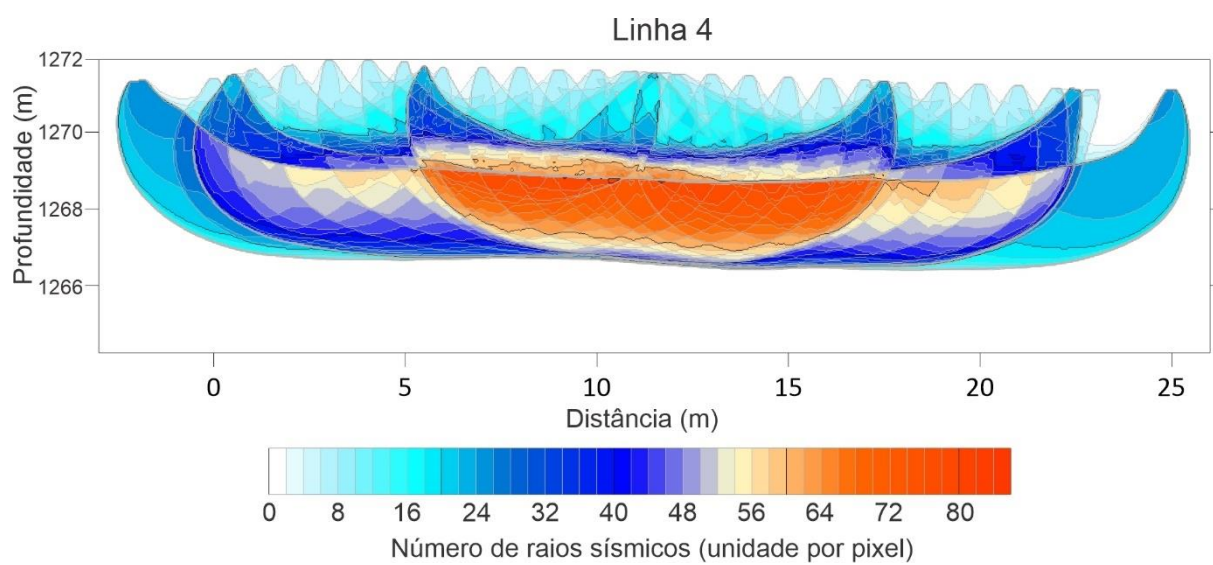
Linha 2: localizada na 2ª berma.



Linha 3: localizada na base do talude de jusante.

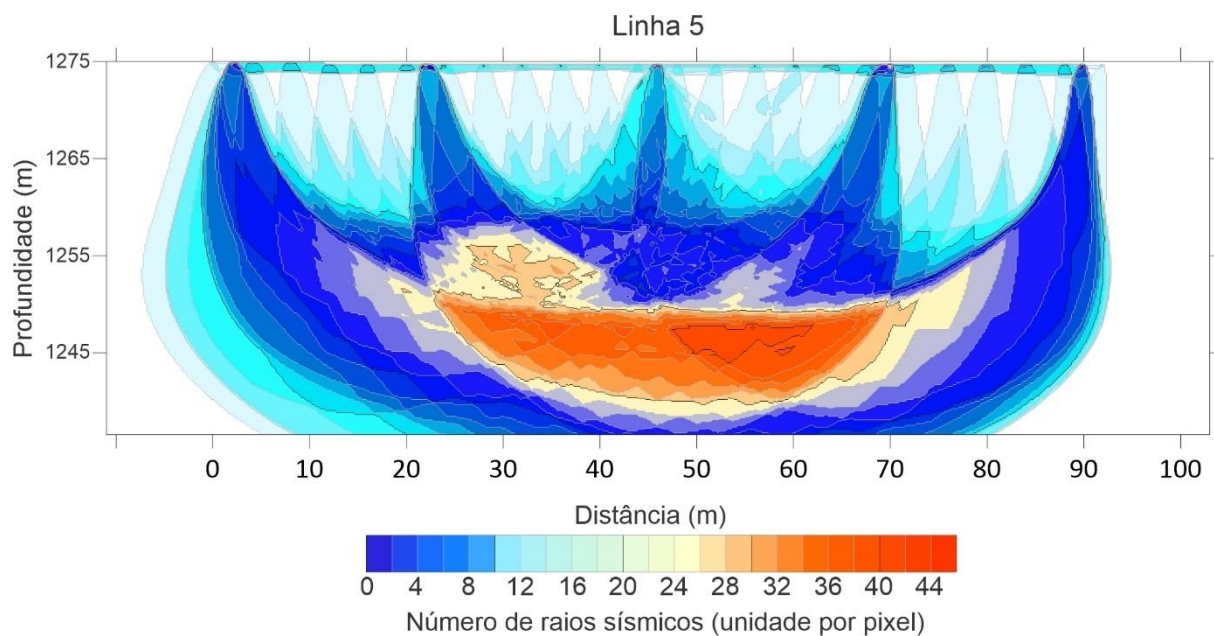


Linha 4: localizada no afloramento próximo a base do talude de jusante.

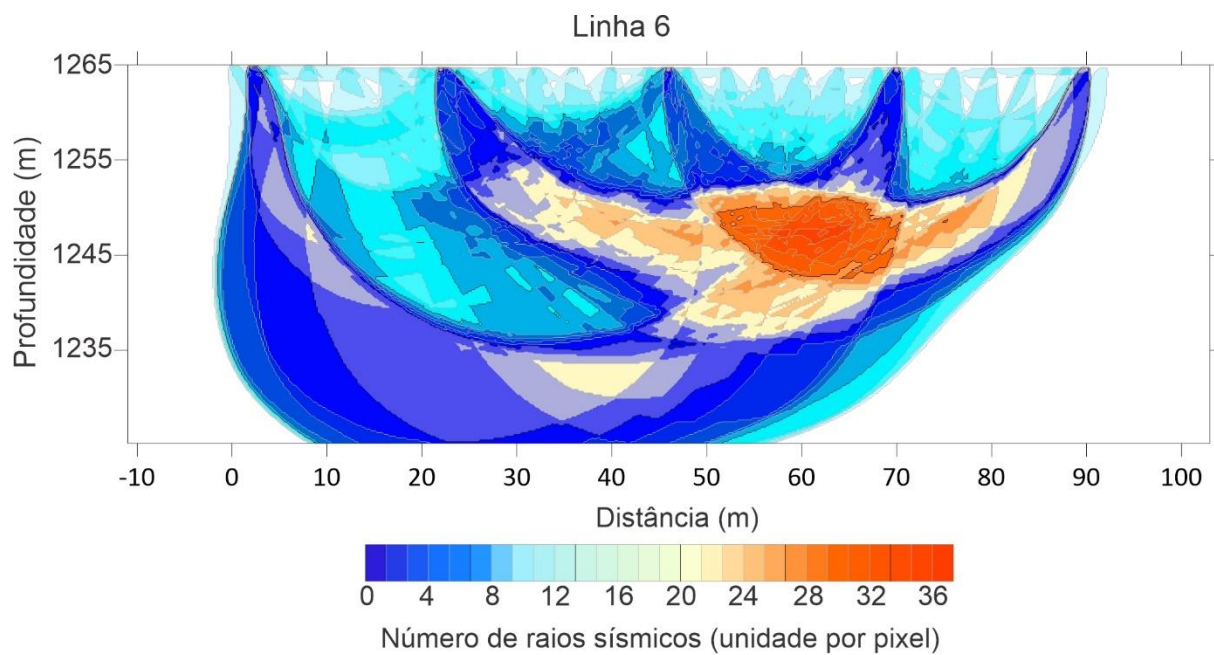


Anexo V: Seções com o número de raios sísmicos obtidos nas linhas de aquisições de tomografia de refração sísmica coletados na área das bacias de armazenamento de radioisótopos.

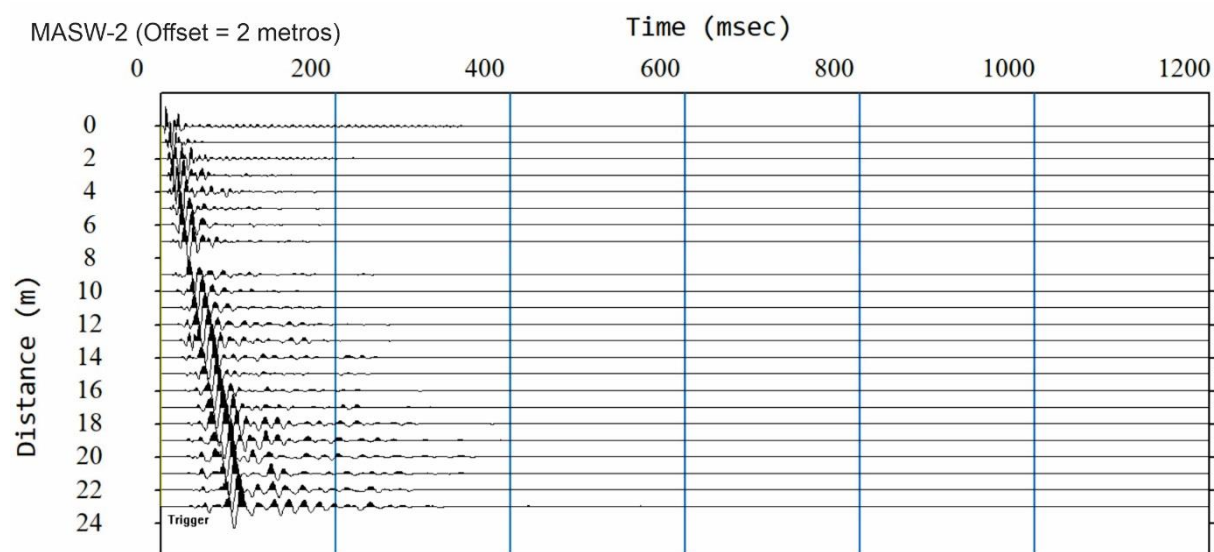
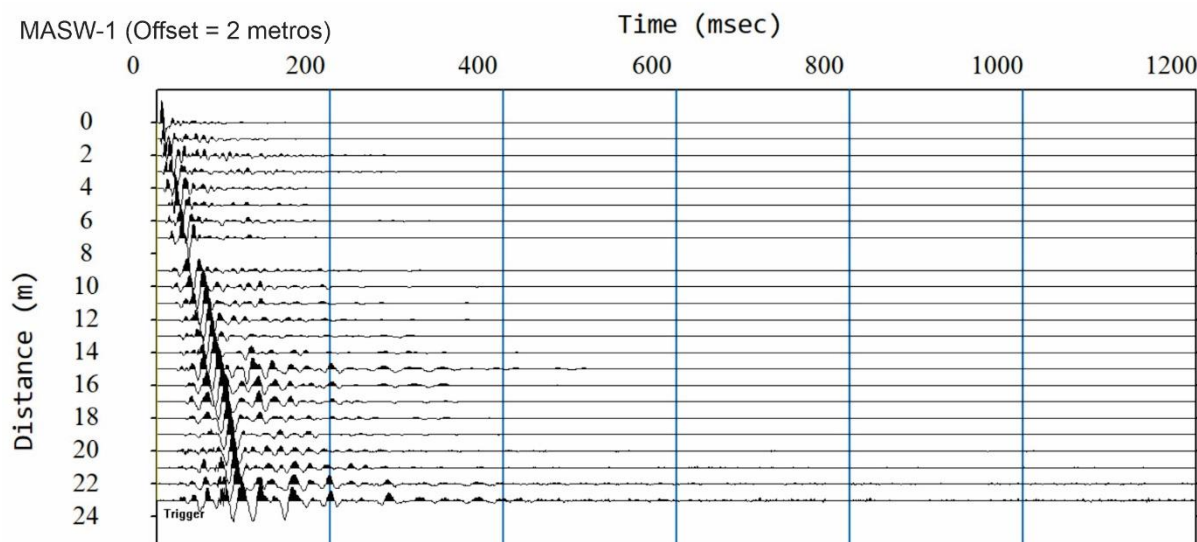
Linha 5: localizada na crista da bacia D1.

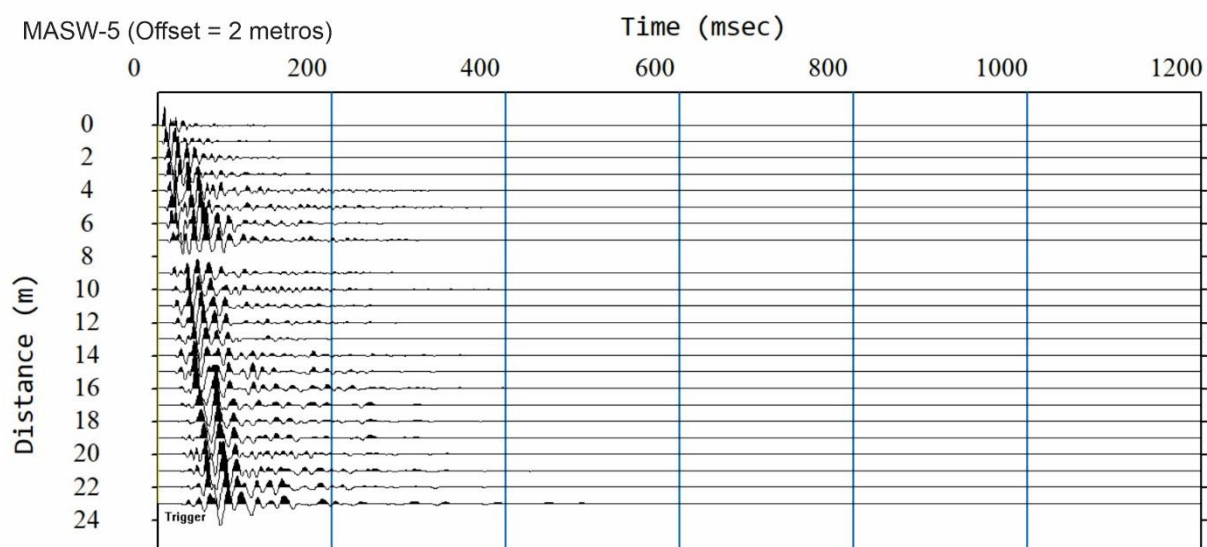
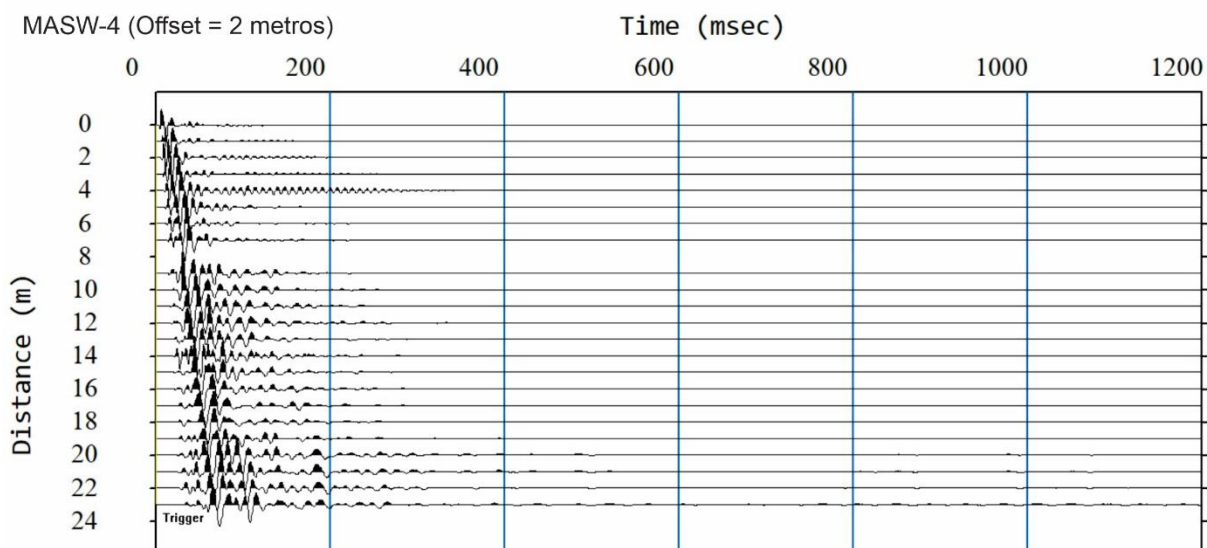
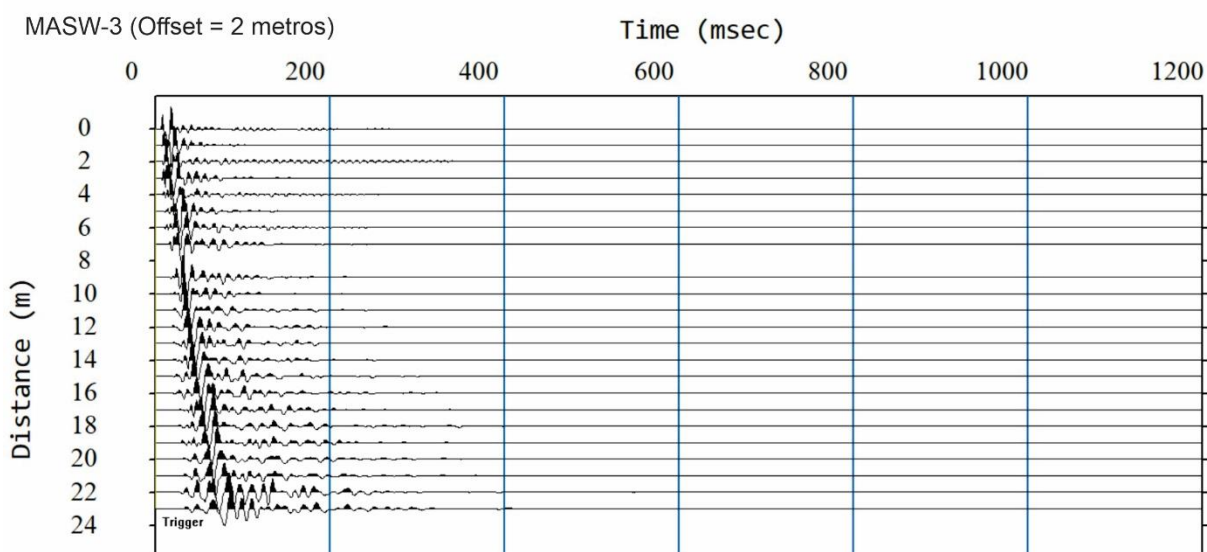


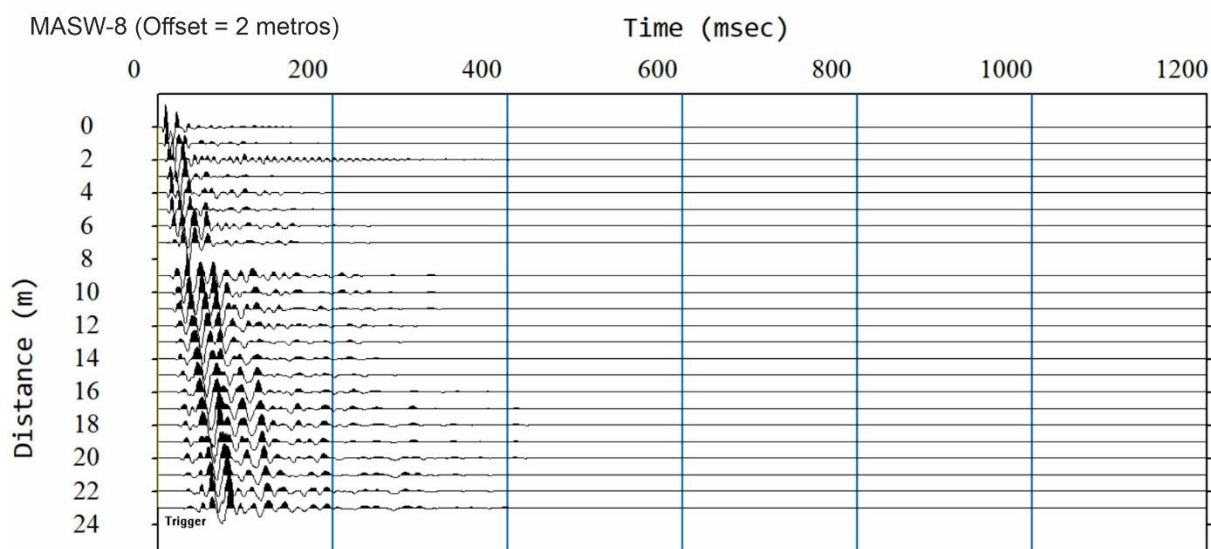
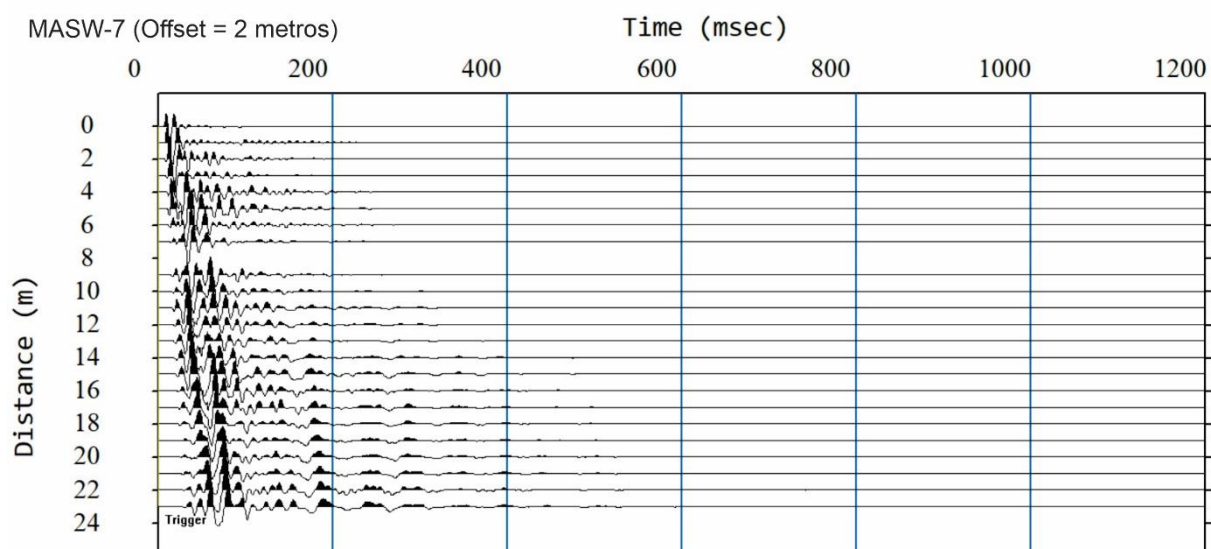
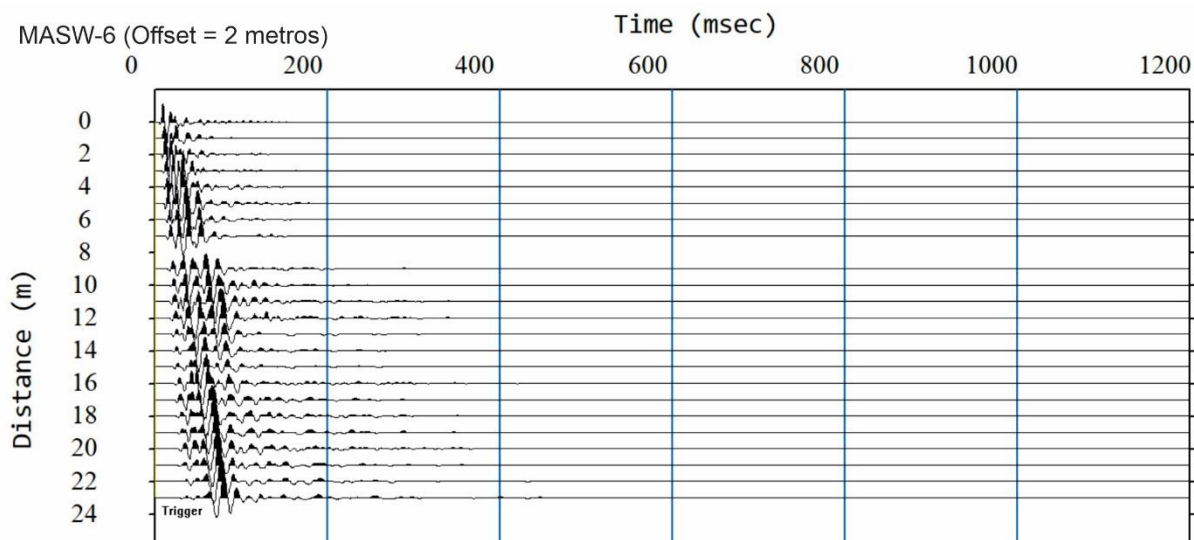
Linha 6: localizada na crista da bacia D2.

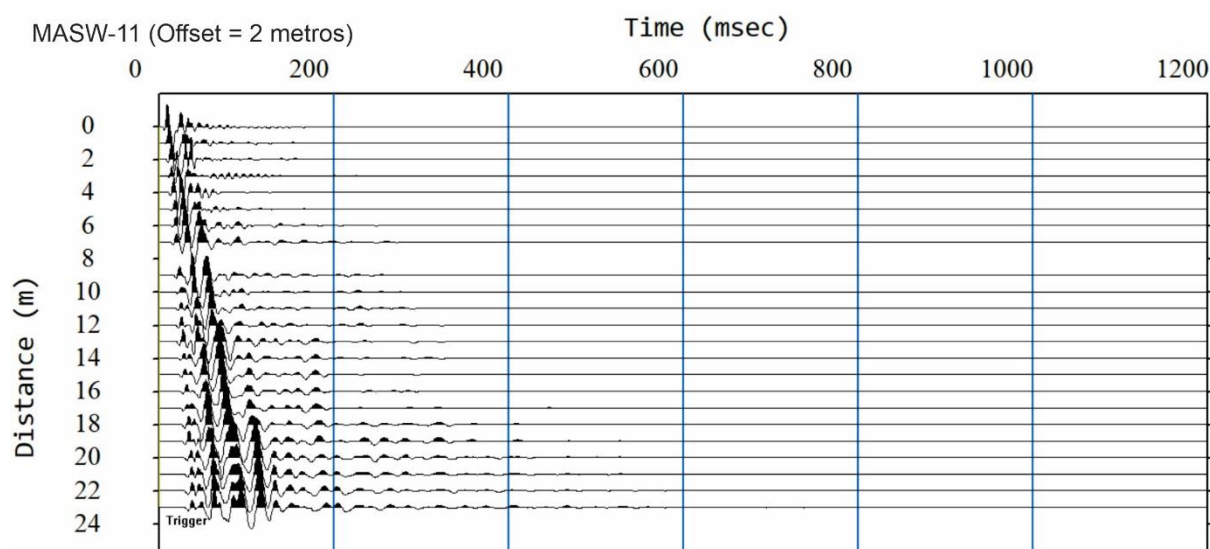
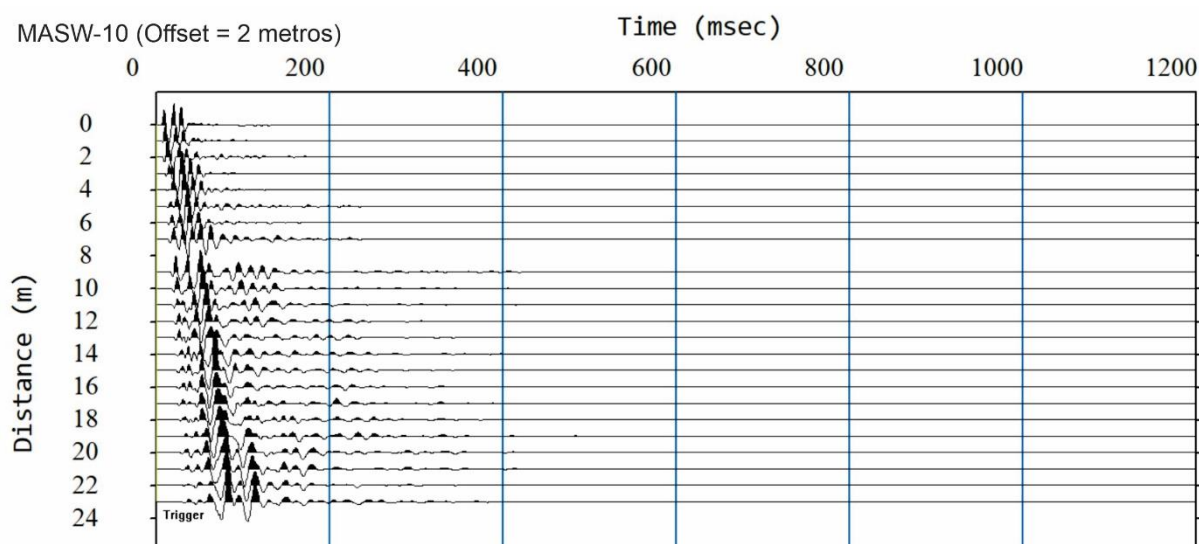
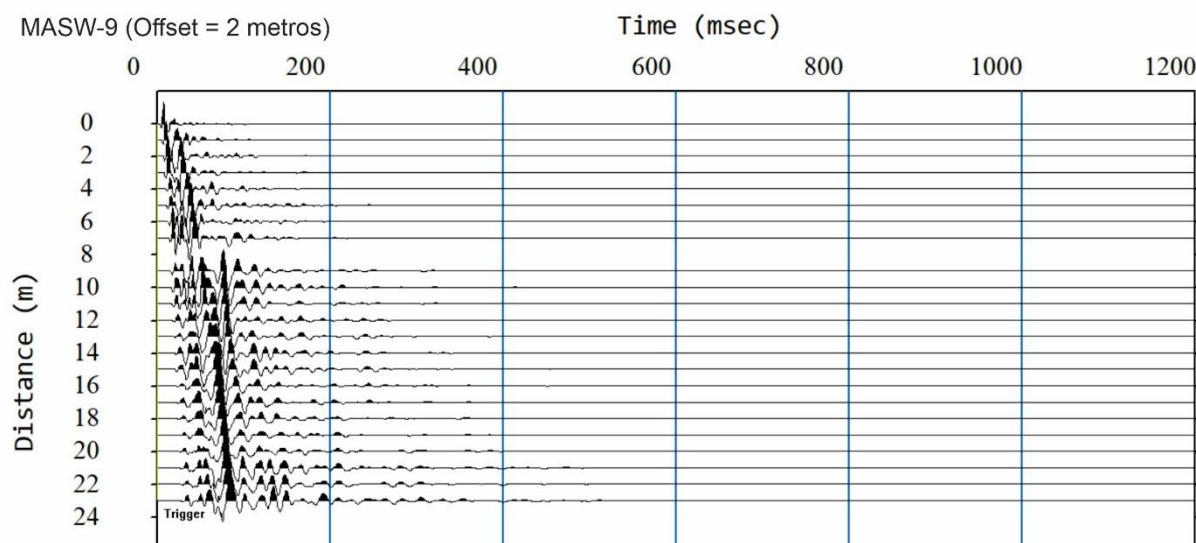


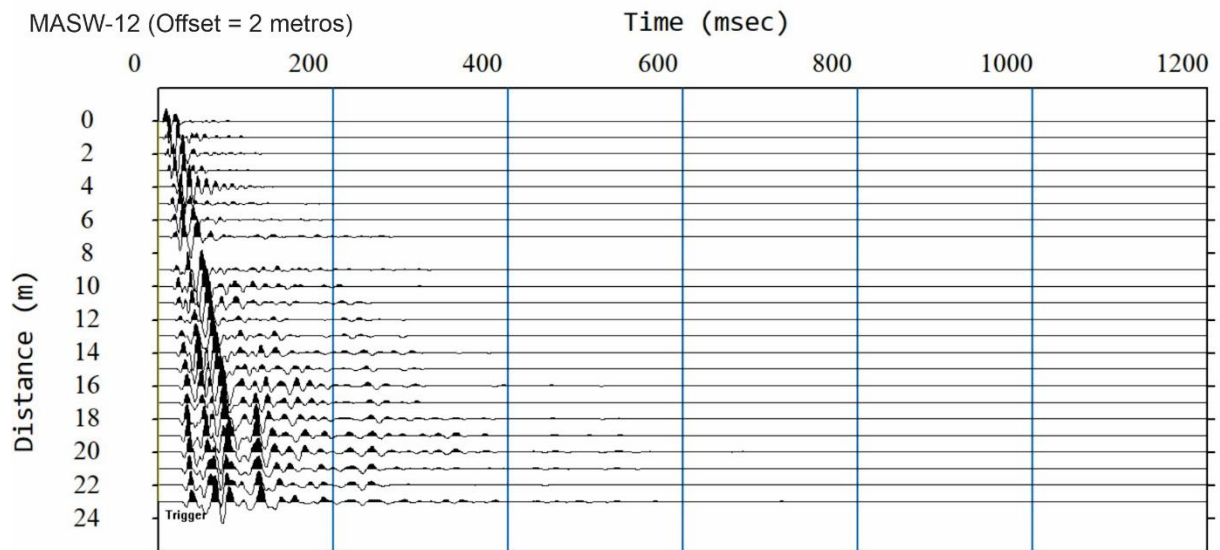
Anexo VI: Sismogramas obtidos nos 12 ensaios de MASW realizados na 2ª berma do barramento.





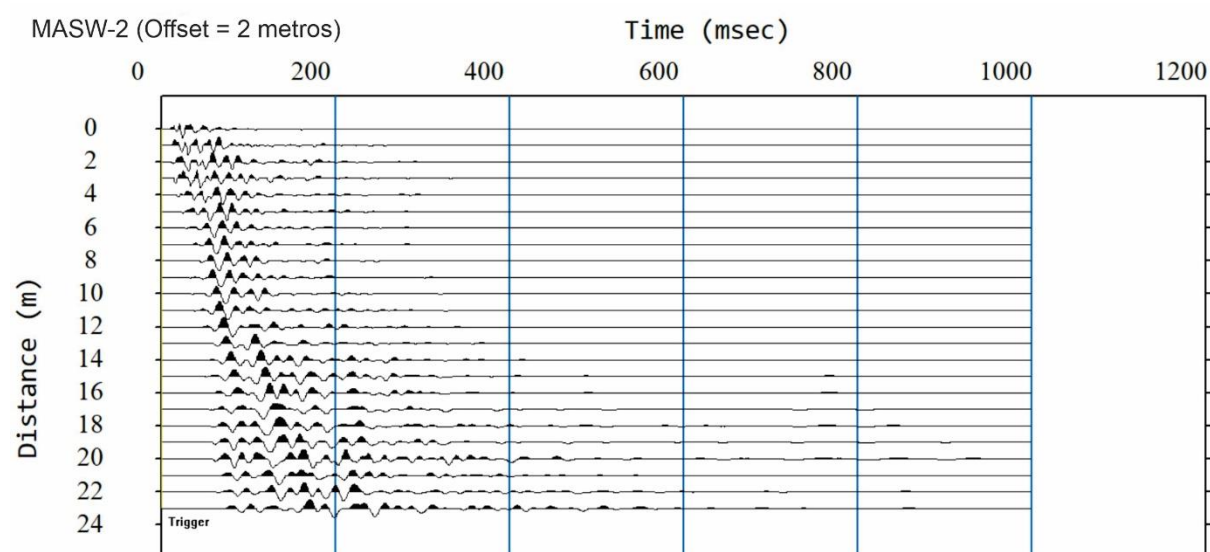
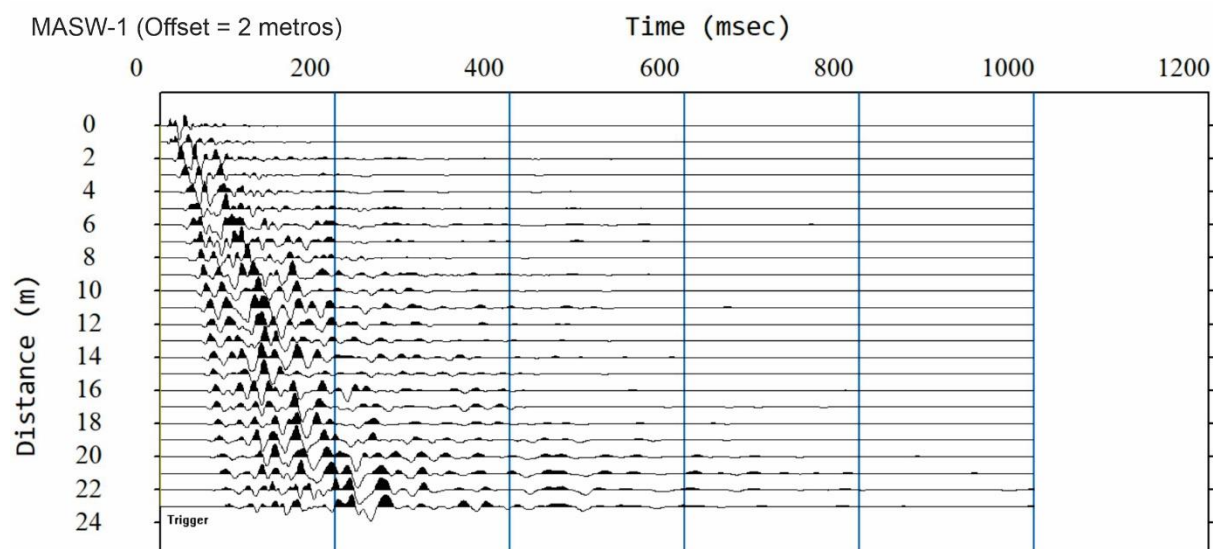


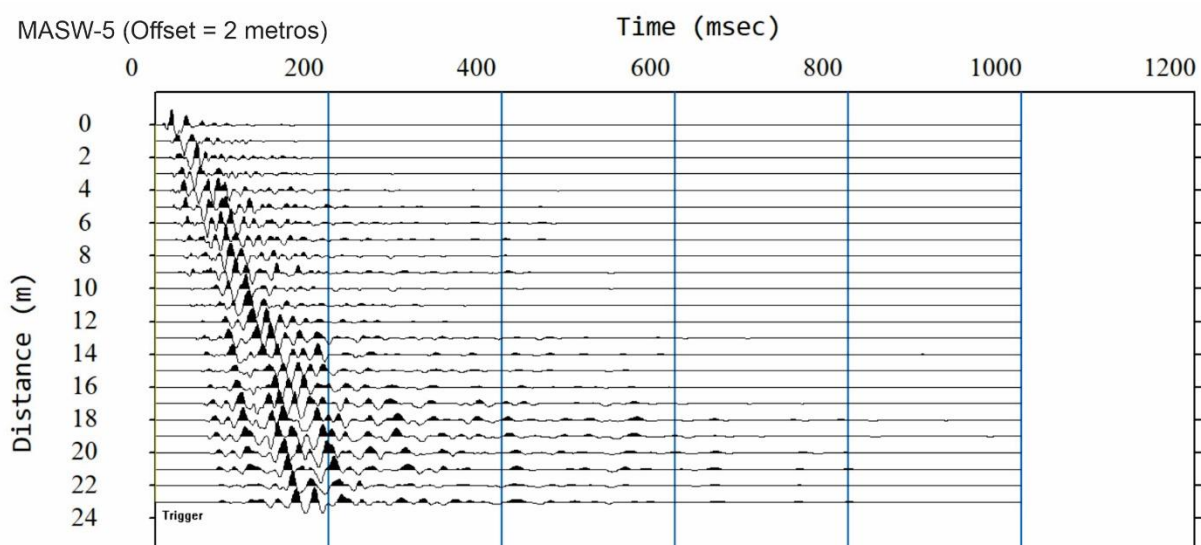
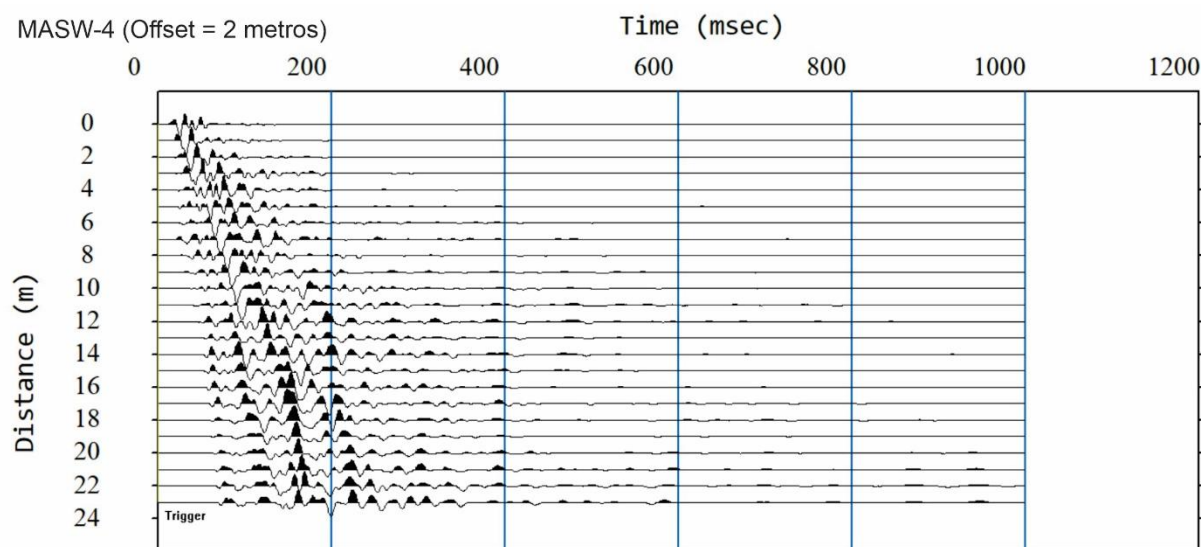
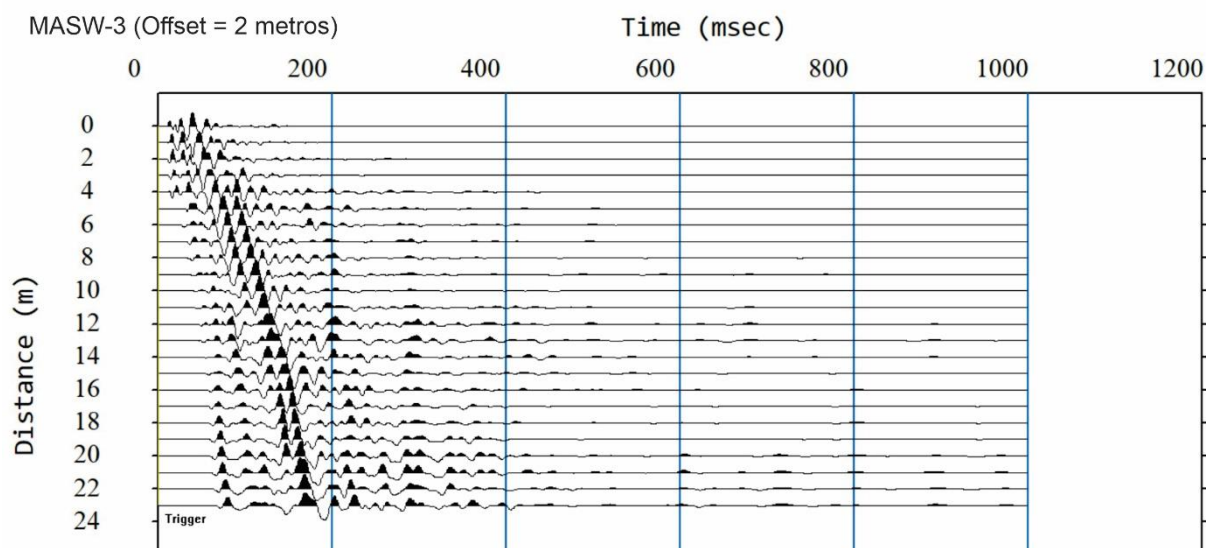


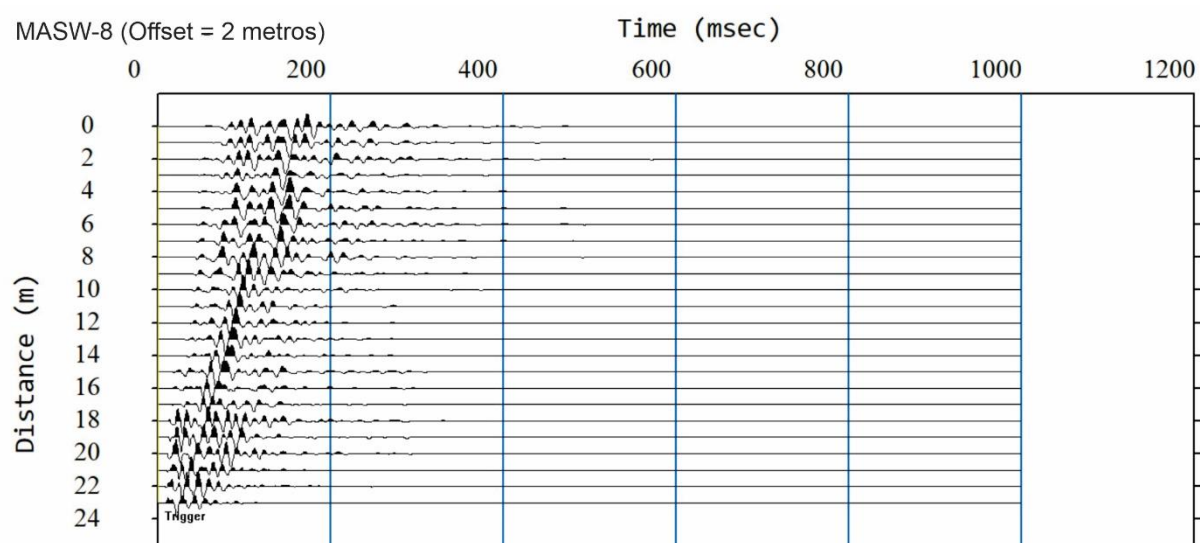
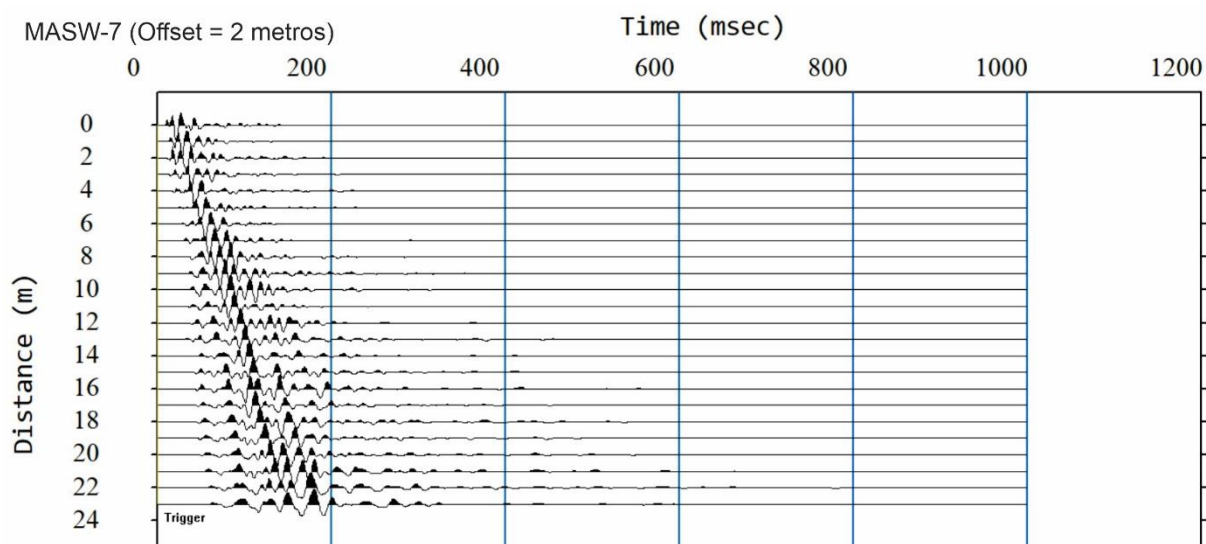
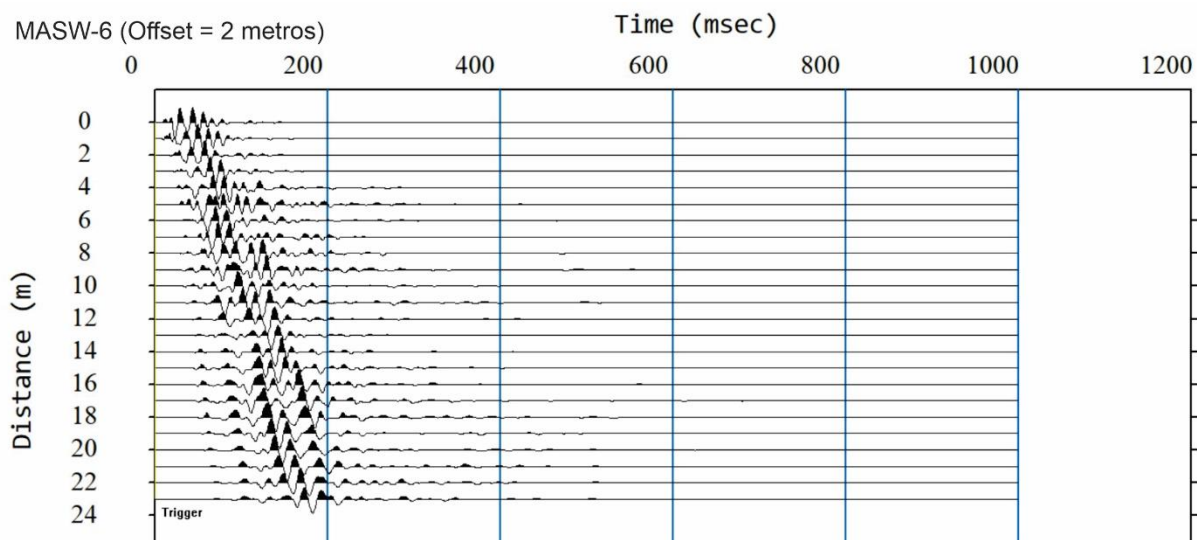


Anexo VII: Sismogramas obtidos nos 16 ensaios de MASW realizados na área das bacias de armazenamento de radioisótopos.

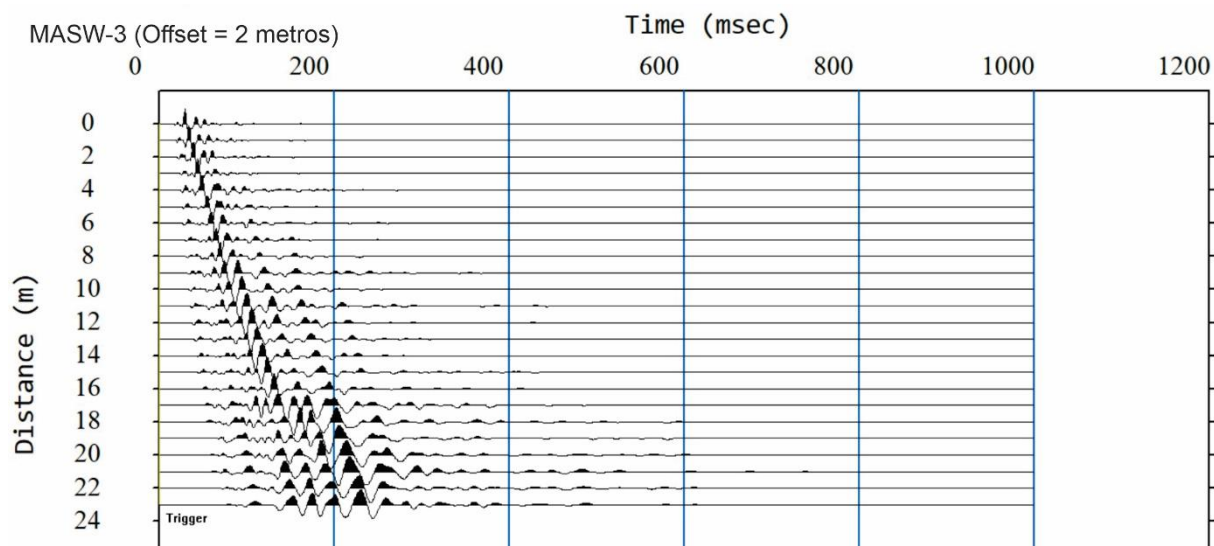
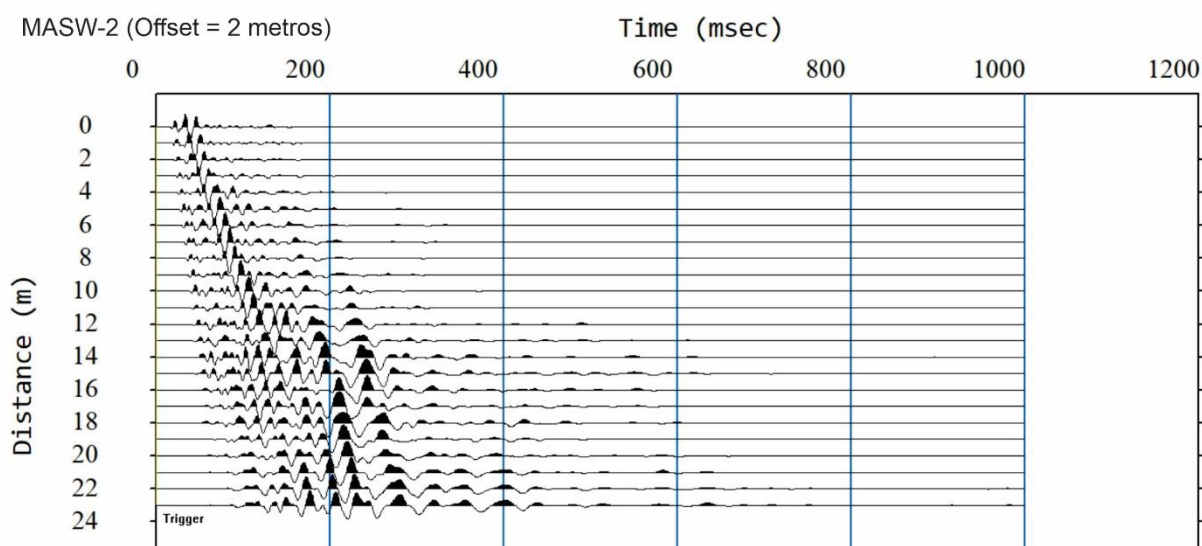
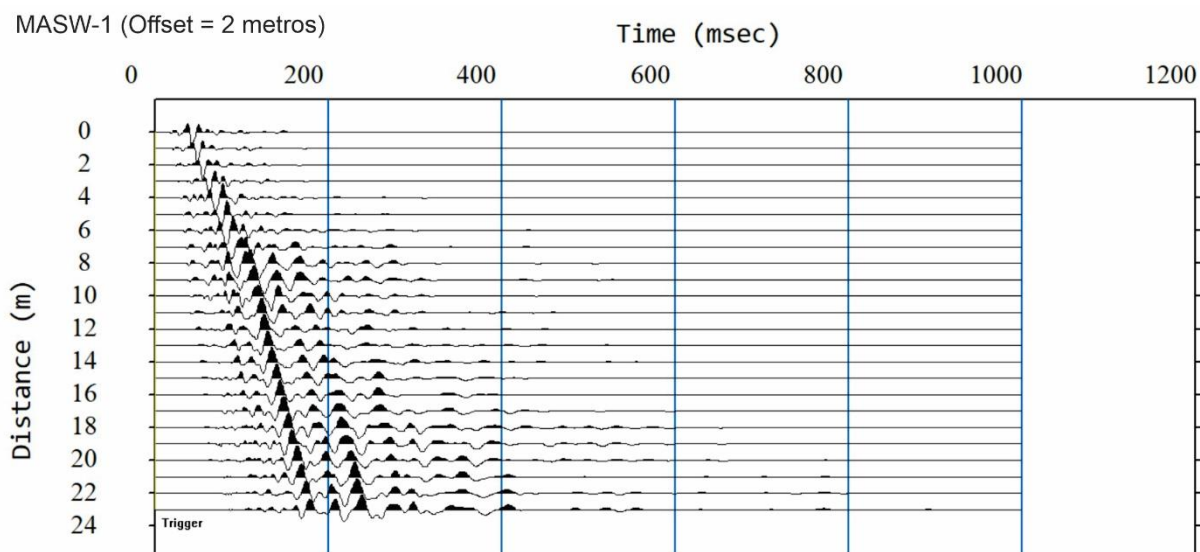
Linha 5: localizada na crista da bacia D1.

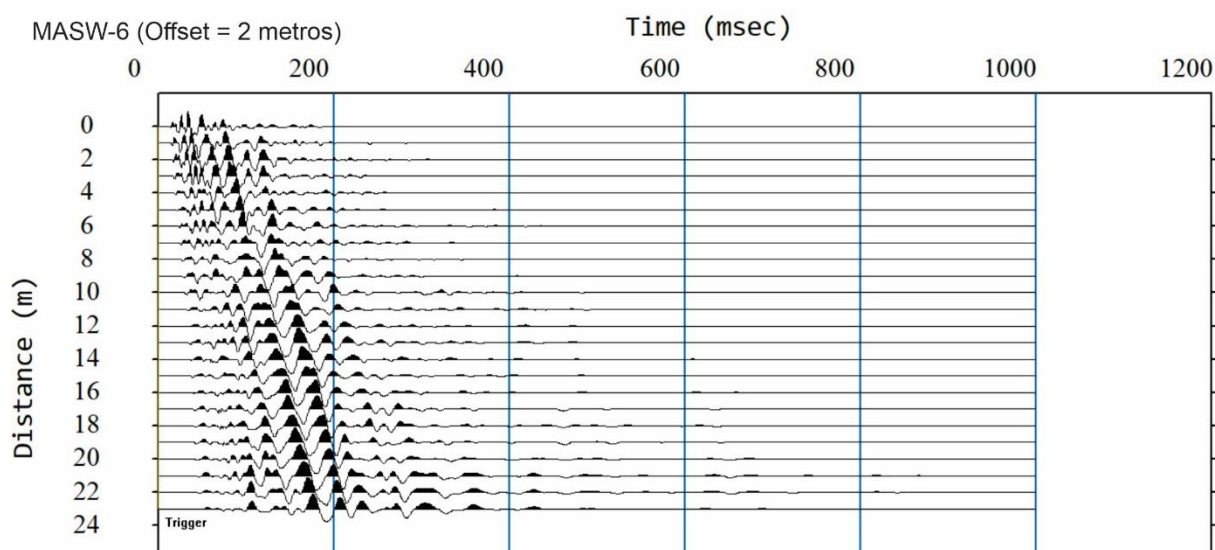
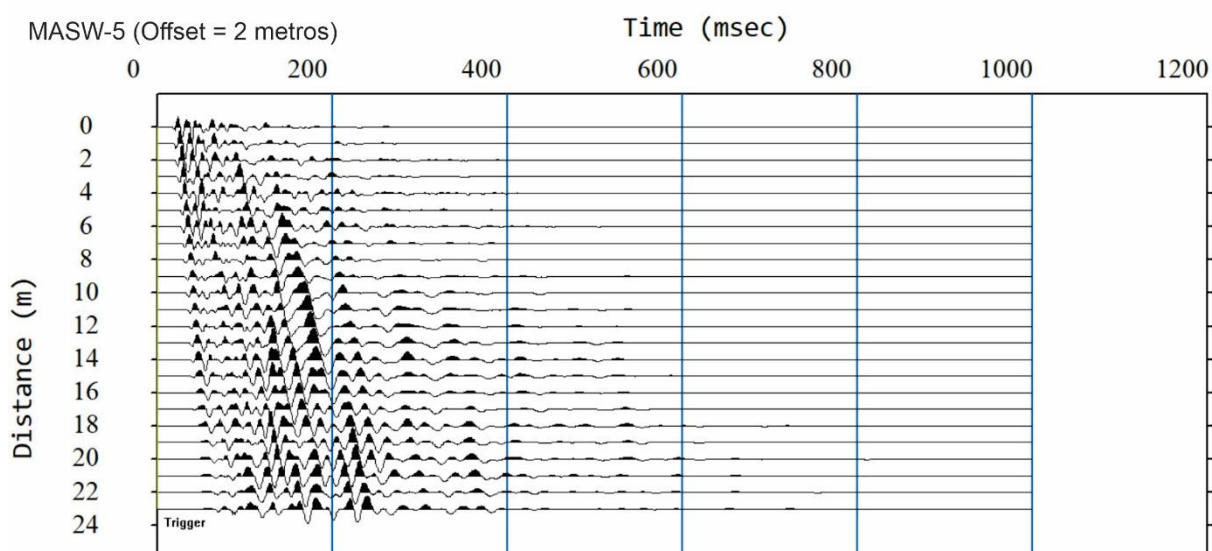
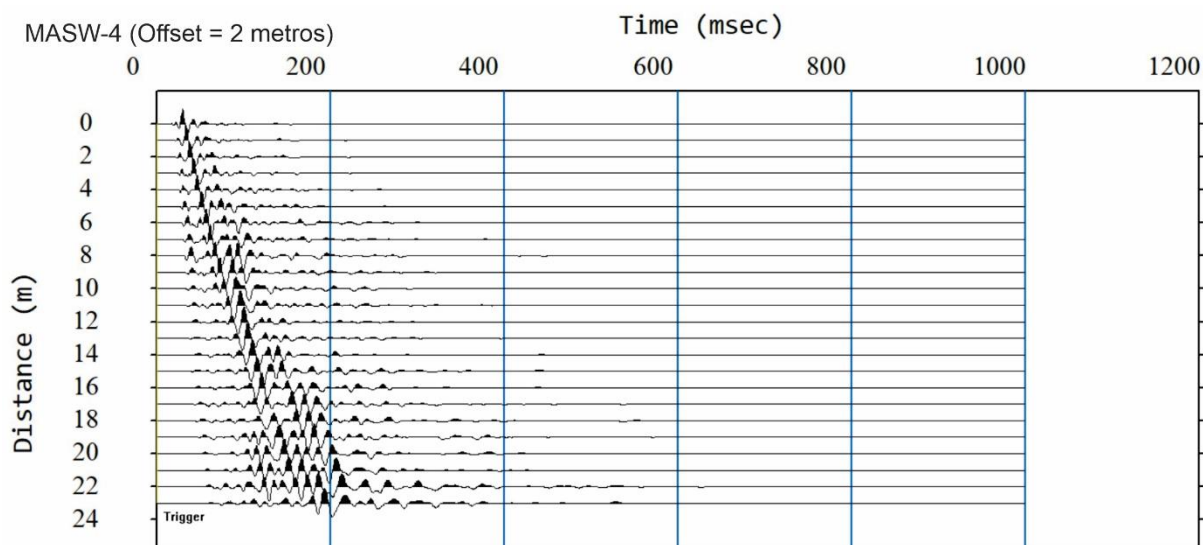


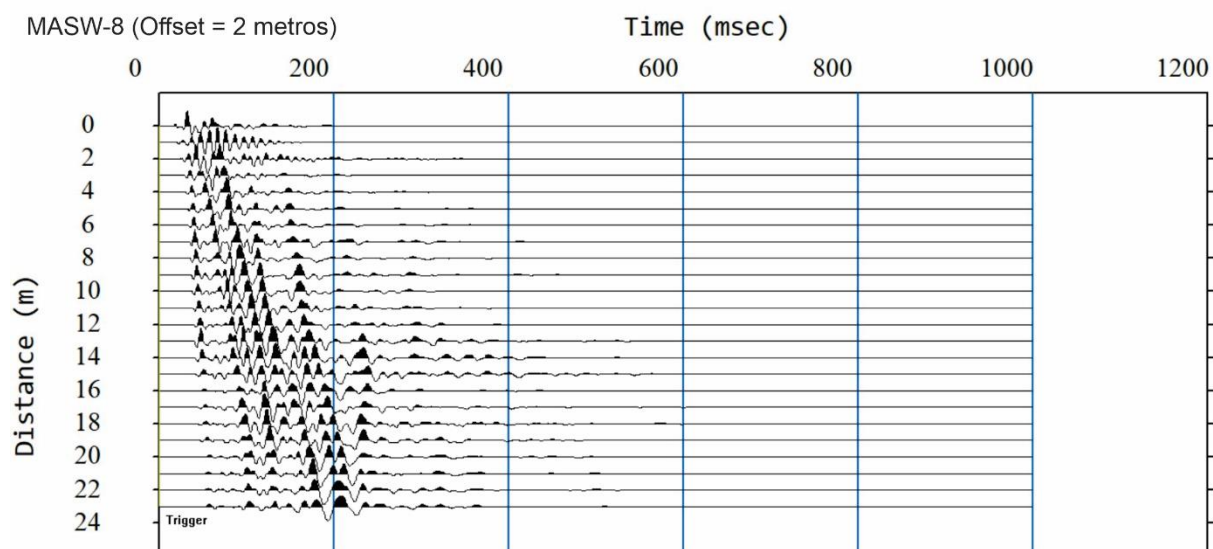
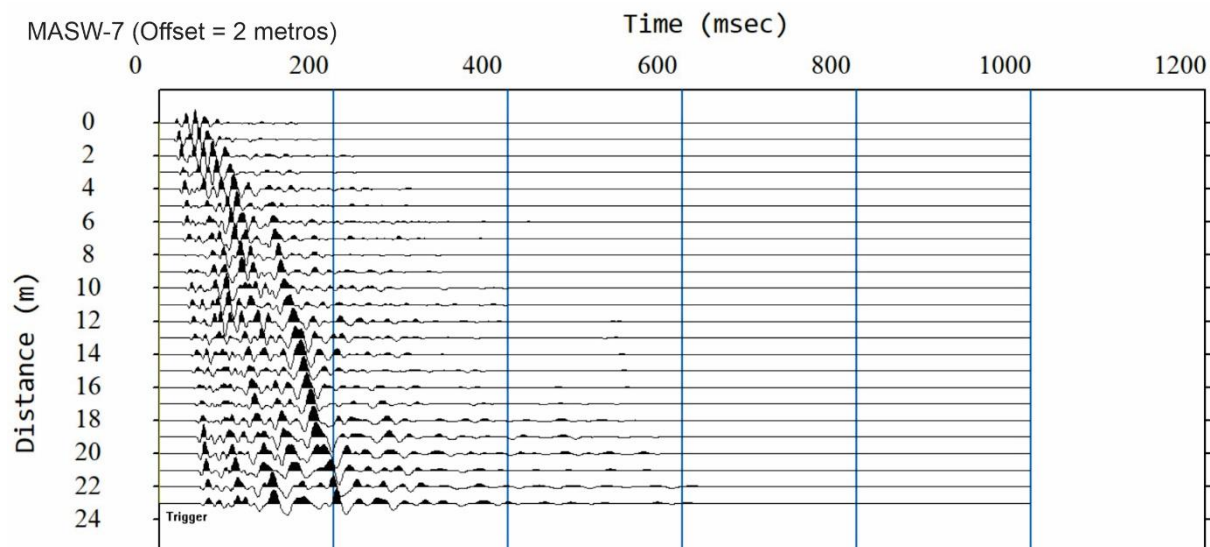




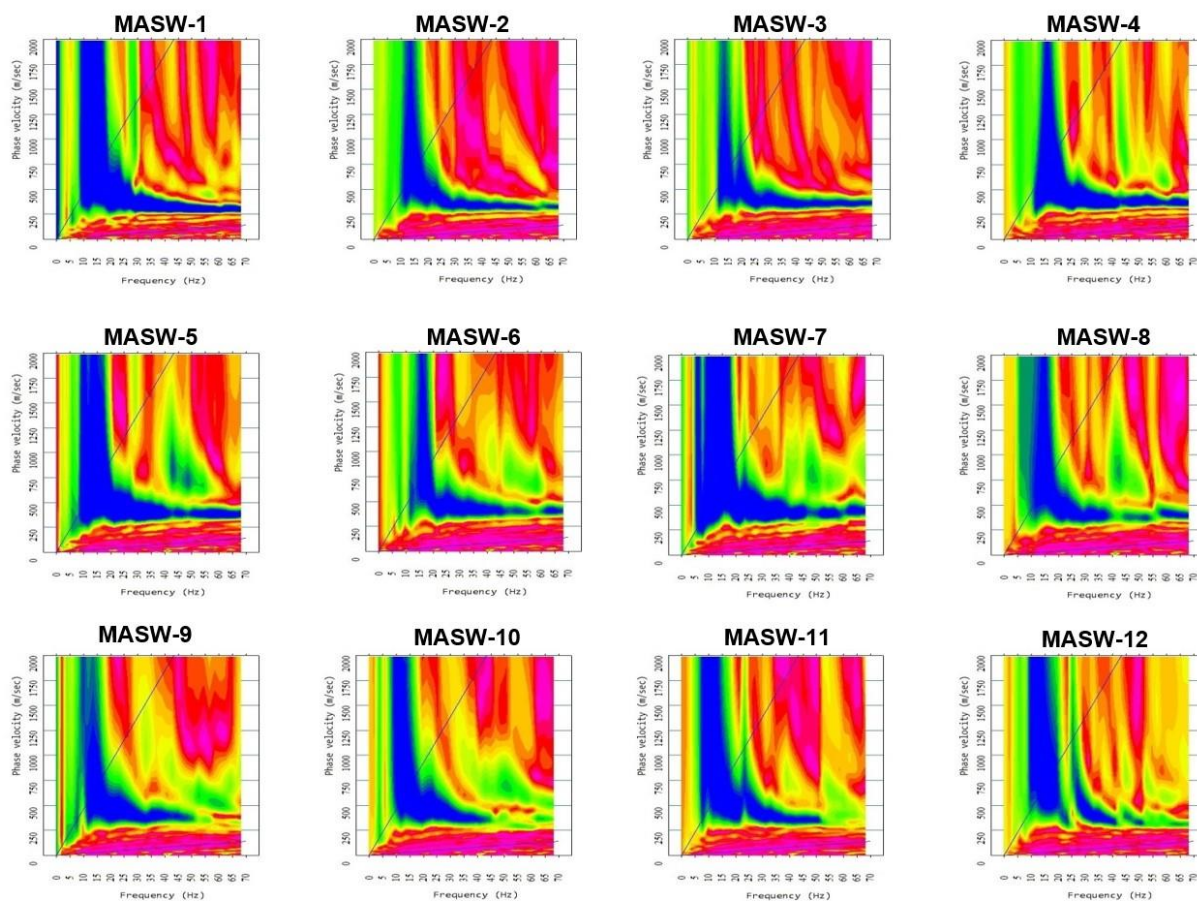
Linha 6: localizada na crista da bacia D2.





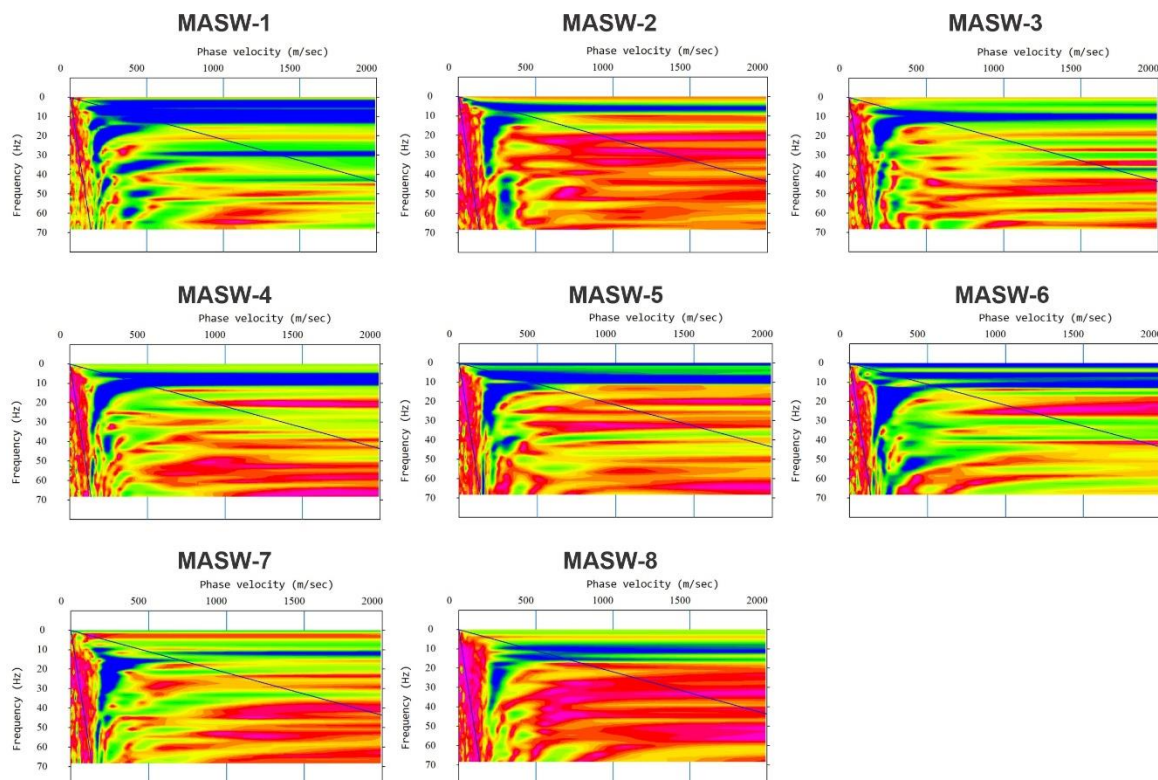


Anexo VIII: Imagens de dispersão (frequência x velocidade) obtidas para os 12 ensaios de MASW realizados na 2ª berma do barramento.

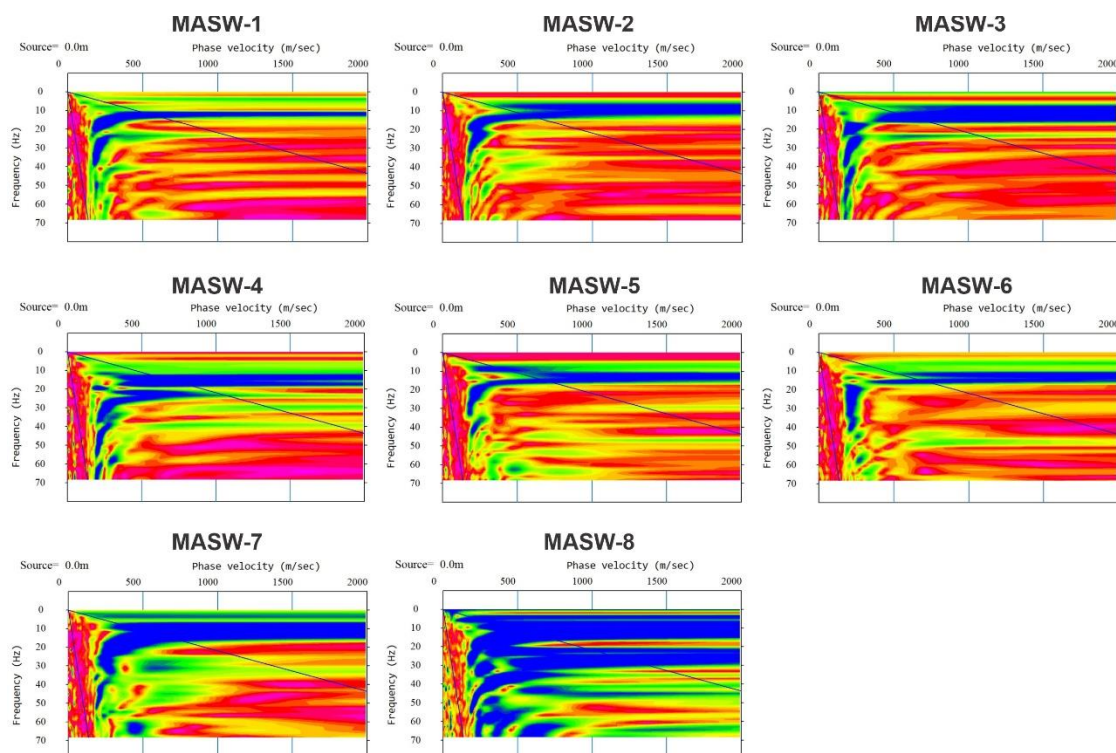


Anexo IX: Imagens de dispersão (frequência x velocidade) obtidas para os 16 ensaios de MASW realizados na área das bacias de armazenamento de radioisótopos.

Linha 5: localizada na crista da bacia D1.



Linha 6: localizada na crista da bacia D2.



Anexo X: Modelos 3D com as anomalias elétricas condutivas em profundidade (arranjo Schlumberger) realizados na área das bacias de armazenamento de radioisótopos.

