



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

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO PARA PROJETOS DE “AS IS”

Eduardo Marchi

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

EDUARDO MARCHI

**PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DE INVESTIGAÇÃO
GEOTÉCNICA DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO PARA
PROJETOS DE “AS IS”**

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

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto G. V. Reis

Rio Claro - SP
2022

M317p

Marchi, Eduardo

Procedimentos metodológicos de investigação geotécnica de barragens de rejeito de mineração para projetos de "AS IS" / Eduardo Marchi. -- Rio Claro, 2022

86 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

1. Geotecnia de Barragens. 2. Investigação de Barragens de Rejeito. 3. Procedimento Metodológico, AS IS. 4. Geofísica. 5. SPT. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas *Câmpus*
de Rio Claro

EDUARDO MARCHI

**PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA DE
BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO PARA PROJETOS DE “AS IS”**

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

Comissão Examinadora

Orientador: Prof Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Prof Dr. Maximilian Fries

Prof Dr. José Eduardo Zaine

Conceito: Aprovado.

Rio Claro, SP 24 de Novembro de 2022

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Lícia Pignataro Porto Marchi, por ser o esteio de nossa família, me apoiar em tudo, e cuidar tanto de nós.

Agradeço aos Professores Doutores Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, Maximilian Fries e José Eduardo Zaine, por toda contribuição para que esse trabalho fosse possível.

Aos profissionais José Pedro Nicola, Joel Lopes de Paula, Noedir Nava e Luciano Rocha, que tanto me ajudaram em algum momento de minha vida profissional.

Aos meus pais Antônio Sergio Marchi e Vera Lúcia Nicola Marchi, e a minha irmã Erika Marchi Martins, por me apoiarem em todas as etapas da minha vida.

Aos meus filhos Helena Pinheiro Santos Marchi e André da Silva Porto Marchi, por serem minha razão de lutar.

RESUMO

Com base na Política Nacional de Segurança de Barragens, nº 12.334, de 2010, regulamentada e consolidada pela resolução ANM 95 de 2022, todas as Barragens de Mineração precisam apresentar o estudo “*As Built*” (como construído). No entanto, grande parte das barragens construídas, anteriormente a 2010, não dispõe desse estudo. Para suprir essa necessidade, a legislação brasileira estabeleceu um novo tipo de projeto denominado “*As Is*” (como está). Nesse sentido, alguns autores vêm desenvolvendo técnicas de investigação “*As Is*”. O objetivo desta pesquisa é integrar as técnicas da eletrorresistividade e da sísmica (*Masw*), com ensaios diretos tipo resistência à penetração no solo (SPT) e sondagem via seca com revestimento (*Hollow*), realizadas em duas barragens de rejeito usadas em uma mineração de areia no interior de São Paulo, de modo a avaliar os procedimentos metodológicos de investigação geotécnica mais adequados na análise das condições atuais (projeto “*As Is*”) e propor uma metodologia geral de investigação. Os resultados mostram que, devido aos cálculos matemáticos usados pelos *softwares* de interpretação geofísica, as linhas de divisa das mudanças de velocidade e resistência não são exatas. A continuidade lateral de uma anomalia pode sofrer interferência dos resultados superiores e inferiores, criando uma linha não contínua onde deveria ter tal característica, como nos casos de filtros horizontais. Mesmo assim, as alternâncias se mostraram bem marcadas e, portanto, não é difícil interpretar que algumas descontinuidades são, na realidade, superfícies contínuas. O uso integrado dos dois métodos geofísicos mostra-se ideal na identificação de alvos em subsuperfície para a realização de ensaios diretos. Correlacionando os resultados, é possível reconstituir a forma com que a barragem foi construída e seu comportamento no momento das investigações, permitindo identificar possíveis pontos de fragilidade e gerar seções-bases para a elaboração do estudo de estabilidade.

Palavras-chave: Geotecnia de Barragens. SPT. Geofísica. Investigação de Barragens de Rejeito. *As Is*.

ABSTRACT

Based on the National Dam Safety Policy, No. 12,334, of 2010, regulated and consolidated by ANM resolution 95 of 2022, all Mining Dams must present the “As Built” study, however most dams built, before 2010, do not have this study and to meet this need, Brazilian legislation established a new type of project called “As Is”. In this sense, some authors have been developing “As Is” investigation techniques. The aim of this research is to integrate the techniques of DC resistivity and seismic (Masw) with direct tests such as standard penetration test (SPT) and dry drilling with Hollow Stem Auger, carried out in two tailings dams used in a sand mining in the interior of São Paulo, to evaluate the most appropriate methodological procedures in geotechnical investigation on analysis of current conditions (“As Is” project) and to propose a general investigation methodology. The results show that due to the mathematical calculations used by the geophysical interpretation software, the boundary lines of changes in velocity and resistance are not exact, as well as the lateral continuity of an anomaly can be interfered with by the upper and lower results, creating a non-continuous line, where it should be continuous, as in the case of horizontal filters. Even so, the alternations proved to be well marked, so it is not difficult to interpret that some discontinuities are actually continuous surfaces. The integrated use of the two geophysical methods is ideal in the identification of subsurface targets for direct tests. Correlating the results it is possible to reconstitute the way in which the dam was built and how is its behavior at the time of the investigations, allowing to identify possible weak points and generate the base sections for the elaboration of the stability study.

Keywords: Dam Geotechnics. SPT. Geophysics. Investigation of Tailing Dams. As Is.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	08
2	OBJETIVOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	Eletrorresistividade	12
3.1.1	Sondagem Elétrica Vertical e o Arranjo Schlumberger	13
3.1.2	Caminhamento Elétrico e o Arranjo Dipolo-Dipolo	14
3.2	Método da Sísmica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)	16
3.3	Investigação Geotécnica Direta.....	18
3.4	Legislação sobre Barragens.....	20
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1	Etapa 1 - Revisão Bibliográfica	25
4.2	Etapa 2 - Análise do Material Documental sobre o Estudo de Caso e Levantamento de Dados	26
4.2.1	Método da Eletrorresistividade	27
4.2.2	Método da Sísmica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves	30
4.2.3	Método de Sondagem Direta	31
4.3	Etapa 3 - Integração dos Dados Diretos e Indiretos	34
4.4	Etapa 4 - Proposta de Procedimento Metodológico de Investigação Geotécnica	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Levantamento Bibliométrico.....	35
5.2	Levantamento de Campo e Geologia	40
5.3	Resultados da Eletrorresistividade	40
5.4	Resultados do MASW.....	46
5.5	Integração dos Resultados da Geofísica	51
5.6	Resultados das Investigações Diretas.....	54
5.7	Integração dos Resultados Diretos e Indiretos	59
5.8	Interação e Comparativo.....	75

5.9	Proposta Metodológica.....	76
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	78
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Com base na Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelecida pela Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2020), da Portaria ANM nº 70.389, de 17 de maio de 2017 (BRASIL, 2017) e pela Resolução ANM 95, de 30 de setembro de 2022 (BRASIL, 2022), todas as Barragens de Mineração precisam apresentar o estudo de estabilidade e o projeto denominado “*As Built*” (como construído).

No entanto, grande parte das barragens construídas, anteriormente a 2010, não dispõe desse estudo e projeto derivado, constituindo um problema legal e, principalmente, um risco para a segurança desses empreendimentos. Assim, para suprir a grande carência de projetos “*As Built*”, a legislação brasileira estabeleceu um novo tipo de projeto denominado “*As Is*” (como está).

O projeto “*As Is*” estabelece uma série de estudos e serviços de investigações geotécnicas para determinar a situação atual das barragens, considerando sua estrutura total, condições da fundação e ombreiras, existência de drenos, características de percolação e concentração de água no interior do maciço, propriedades mecânicas atuais do maciço, entre outros pontos.

Nesse sentido, vários métodos de investigação têm sido usados para avaliar a situação de barragens de água e rejeito, sem que haja orientação básica e análise integrada dos resultados que estão sendo obtidos sobre a eficácia de cada método em cada situação identificada.

Camarero, Moreira e Pereira (2019) apresentaram uma alternativa de baixo custo e de aplicação rápida para a investigação de infiltração de água em barragens de terra, construídas com materiais de aterro distintos: uma barragem composta predominantemente por lodo e solo argiloso, e outra com predomínio de solo arenoso. Os métodos de pesquisa utilizados foram: avaliações geotécnicas usando testes de graduação, de permeabilidade pelo método do permeametro de Guelph, e aplicação do método geofísico da eletrorresistividade (DC) e da técnica de tomografia de resistividade elétrica (ERT) na matriz de Wenner. Os resultados da pesquisa mostraram-se bastante positivos para identificar pontos de saturação e possíveis canais de infiltração.

Outro importante estudo sobre barragens foi desenvolvido por Albuquerque *et al.* (2019), utilizando a eletrorresistividade para avaliar o estado de uma barragem de rejeito no município paulista de Cajati, cujo resultado mostrou excelente desempenho do método geofísico, aliado à instrumentação.

Em nível internacional, pode ser citado o estudo realizado por Seokhoon Oh e Chang-Guk Sun (2008), que combinaram resultados de eletrorresistividade com ensaio de SPT (*“Standard Penetration Test”* - Ensaio de Índice de Resistência à Penetração no Solo), demonstrando a existência de padrões correlatos entre a geofísica e os resultados de SPT. No entanto, podem ser obtidas algumas características incompatíveis com a interpretação apresentada. Assim, nem sempre o baixo valor da resistividade significa *status* instável ou problemático do material a ser protegido contra infiltrações, se a zona central mostra faixa adequada do valor da resistividade considerando a água retida nas partículas finas. Algumas regiões podem apresentar valor da resistividade mais alto, enquanto o valor do SPT se mantém muito baixo, indicando que a eletrorresistividade, por si só, é insuficiente para a correta interpretação da situação da barragem – “As Is”.

Hutchinson e Beird (2016) destacaram a boa correlação entre o método MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves* ou Análise Multicanal de Ondas de Superfície) e os ensaios de SPT, mas também levantaram dúvidas. Valores N baixos (= 6) são muito insensíveis à previsão de Vs, onde há uma mudança significativa a cada contagem de golpes. Além disso, valores N superiores a 30 contagens de golpes produzem uma faixa estreita de Vs, levando a dados imprecisos. Inclusive, objetos grandes, como seixos, não são detectados pelo método MASW, mas o método SPT pode produzir leituras muito altas para a zona de profundidade na qual o objeto é encontrado.

No trabalho de Al-Fares (2011), é feito um comparativo entre Tomografia por Resistividade Elétrica (ERT) e Eletromagnetismo (EM), sendo a primeira mais eficiente, mostrando zonas de percolação de água dentro do maciço.

Rocha, Braga e Rodrigues (2019) compararam os resultados de *Ground Penetrating Radar* (GPR), Eletrorresistividade e níveis de água em leituras piezométricas, no complexo de Mineração de Tapira, no estado de Minas Gerais, Brasil, para desenvolver um método de monitoramento de barragens indireto, comparando com piezômetros existentes.

Face ao exposto, foi levantado o seguinte problema de pesquisa nesse estudo:

Quais procedimentos metodológicos para investigação geotécnica são mais adequados na avaliação das condições atuais (projeto “As Is”) em barragens de rejeito?

Para responder essa pergunta, foram selecionadas, como objeto de estudo, duas barragens de rejeito de mineração de areia no interior do estado de São Paulo, onde foram comparados, inicialmente, os resultados de quatro linhas de geofísica de Eletrorresistividade, sobrepostas com ensaios de MASW, de sondagem pelo método *Hollow*, e ensaios de SPT realizados em pontos estratégicos sob as linhas de geofísica. Essa campanha foi realizada em 2016. Em 2021, foi realizada nova campanha de geofísica, comparando-se os resultados obtidos nos dois anos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é apresentar proposta de procedimentos metodológicos de investigação geotécnica de barragens de rejeito de mineração para elaboração de “As Is”, integrando resultados de dados de sondagens e geofísica, a partir de estudos realizados em duas barragens no interior de São Paulo.

Os objetivos específicos compreendem:

a) Analisar as principais aplicações de métodos de investigação direta e indireta na caracterização de barragens de rejeito.

b) Avaliar as condições geotécnicas de maciços de barragens de rejeito pela integração de dados de investigação direta (sondagem com *Hollow*, SPT e ensaios geotécnicos) e indiretos, por meio da geofísica (eletrorresistividade e MASW).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente item, é apresentada uma revisão da literatura, conceituando os métodos diretos e indiretos utilizados neste estudo.

3.1 Eletrorresistividade

As primeiras pesquisas relacionadas aos métodos geoeletricos datam do século XVIII. O método da eletrorresistividade (em inglês *electrical resistivity* – ER) foi um dos primeiros estudados. Os registros iniciais são atribuídos a Gray e Wheeler que, em 1720, publicaram trabalhos sobre a resistividade elétrica das rochas, e a Watson que, no ano de 1746, descobriu que o solo é um condutor elétrico (ORELLANA, 1972).

Os irmãos Schlumberger, junto ao matemático Sabba e ao físico Maillet, em 1932, se dedicaram aos estudos teóricos matemáticos sobre a propagação de corrente elétrica constante em meios estratificados usados na interpretação dos dados da sondagem elétrica.

De acordo com Souza e Gandolfo (2018), a Eletrorresistividade se insere no Grupo dos Métodos Geoeletricos e constitui um método geofísico com a finalidade de determinar a resistividade elétrica dos materiais geológicos, identificar a litologia e subsidiar a caracterização de seus estados, como fraturamento, saturação etc., sem a necessidade de escavações ou perfurações físicas.

Propriedades eletromagnéticas das rochas, como potencial elétrico natural, resistividade elétrica, constante dielétrica e permeabilidade magnética estão associadas à composição mineralógica, porosidade e textura, sendo a resistividade elétrica uma das propriedades fundamentais dos materiais geológicos, servindo para caracterizar seu estado, em termos de grau de alteração, saturação e fraturamento. A resistividade elétrica de uma rocha é influenciada pela resistividade dos minerais, pela resistividade dos líquidos e gases que preenchem os poros, pela própria porosidade ou pelos processos que ocorrem no contato dos líquidos contidos nos poros com sua parede (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

Além dos fatores citados, existe a influência do tamanho dos grãos, do tipo de mecanismo de condução de corrente elétrica, da condução eletrônica (ocorre por meio

de elétrons livres presentes em minerais metálicos ou na grafita) ou da condução eletrolítica (ou iônica, devido ao deslocamento de íons presentes na água e/ou eletrólitos contidos em fissuras e porosidades do solo e das rochas), conforme mencionado por Souza, Silva e Yomasa (1998).

O Método da Eletroresistividade baseia-se na aplicação de corrente elétrica no terreno, a partir de um arranjo denominado dispositivo eletródico. Em geral, este dispositivo é constituído por quatro eletrodos, onde A e B são convencionados como eletrodos de corrente, por meio dos quais é aplicada a corrente elétrica em subsuperfície, enquanto os eletrodos M e N são convencionados como eletrodos de potencial, utilizados para medir a diferença de potencial criada pelo circuito de corrente. Tal circuito é conectado a um voltímetro capaz de medir a diferença de potencial entre os eletrodos (BRAGA, 1997).

A técnica de Imageamento Elétrico baseia-se na realização de medidas de resistividade aparente ao longo de uma linha/seção, com o objetivo de investigar variações em um ou mais níveis em profundidade (BRAGA, 1997).

3.1.1 Sondagem Elétrica Vertical e o Arranjo Schlumberger

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) refere-se à constatação da variação da resistividade elétrica em profundidade, a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno. Nesse arranjo, os eletrodos de potencial M e N são internos aos eletrodos de corrente A e B e ambos os pares de eletrodos são simétricos em relação ao ponto de investigação O, conforme ilustrado na Figura 1.

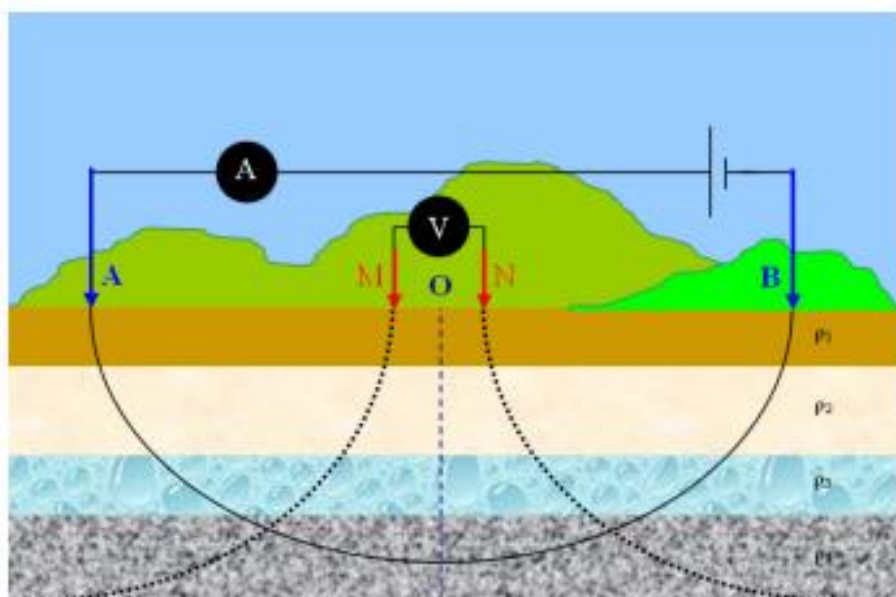
Os eletrodos de potencial M e N permanecem fixos no centro do arranjo, enquanto os eletrodos de corrente A e B, nas extremidades, apresentam uma separação crescente em relação ao ponto de origem, de modo que a distância de separação MN tenda a zero em relação à distância de separação AB, minimizando os erros dos dados obtidos em campo. A distância entre os eletrodos de corrente deve ser, no mínimo, igual ou 5 vezes maior que a distância entre os eletrodos de potencial (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

A profundidade teórica de investigação (Z) é diretamente proporcional à distância de separação AB ($\uparrow AB$, $\uparrow Z$) e, normalmente, situa-se entre $0,25AB$ e $0,1AB$, dependendo da resistividade das litologias subjacentes. Os dados obtidos em campo

são plotados em gráficos bi-logarítmicos, em função da distância de separação $AB/2$ correspondente (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

Essa técnica é considerada ideal para um reconhecimento de profundidade, onde o interesse maior é saber quais camadas geológicas estão presentes e em qual profundidade.

Figura 1 – Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) – Arranjo Schlumberger

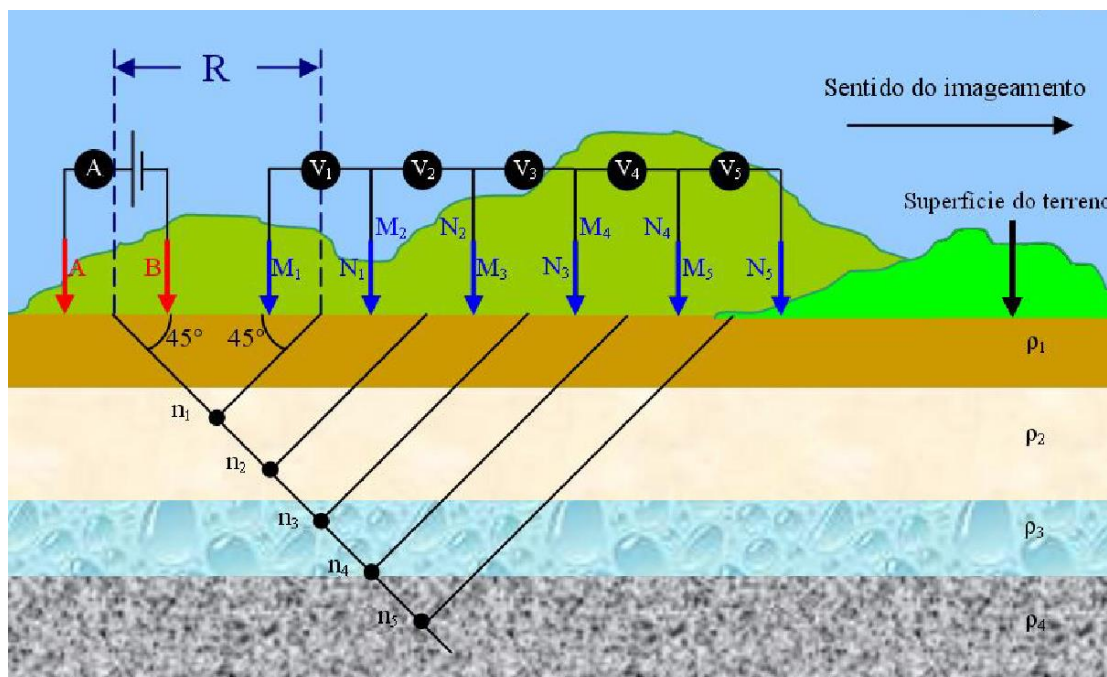


Fonte: Telford, Geldart e Sheriff (1990)

3.1.2 Caminhamento Elétrico e o Arranjo Dipolo-Dipolo

O arranjo Dipolo-Dipolo (Figura 2) se caracteriza por utilizar, simultaneamente, vários dipolos de recepção dispostos ao longo da linha a ser levantada. Cada dipolo refere-se a um nível de investigação e, dependendo do interesse da pesquisa, podem ser estudadas as variações horizontais de um parâmetro geológico ao longo de um perfil com um ou mais dipolos, atingindo várias profundidades de investigação. Neste tipo de arranjo, a profundidade teórica atingida, em cada nível investigado, pode ser tomada como sendo $R/4$ (metros). É utilizado espaçamento igual entre MN e AB, com deslocamento do centro de ambos os dipolos ao longo da linha. O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode ser variado, a partir do uso simultâneo de vários dipolos MN ao longo da linha (SOUZA; GANDOLFO, 2018).

Figura 2 – A técnica do Imageamento Elétrico (IE) – arranjo dipolo-dipolo



Fonte: Souza e Gandolfo (2018)

A profundidade de investigação cresce com o espaçamento entre os centros de AB e MN, correspondendo, teoricamente, a $R/2$ ou ao cruzamento de duas retas com um ângulo de 45° , ou seja, uma reta que parte do centro de AB e outra que parte do centro de MN. Assim, as leituras são realizadas a partir do par de eletrodos de potencial M_1N_1 , que correspondem à profundidade teórica n_1 (DOURADO *et al.*, 2001).

O fator geométrico **K** é calculado pela fórmula:

$$K = 2 \pi GX$$

sendo,

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

onde **X** é o espaçamento entre os dipolos AB e MN, e **n** é o nível teórico de investigação.

Portanto, o arranjo Dipolo-Dipolo é o mais indicado, segundo a literatura consultada, para a avaliação da continuidade lateral das camadas geológicas.

Camarero, Moreira e Pereira (2019) usaram o princípio físico da condução eletrolítica, ou seja, a diminuição da resistência elétrica em materiais ou minerais

silicosos em condições de umidade, em comparação com o material no estado seco. Os resultados revelaram zonas de baixa resistividade restritas a alguns pontos, associadas à infiltração de água em barragens de terra.

Já Albuquerque *et al.* (2019) empregaram a eletrorresistividade para estudo de uma barragem de rejeito de calcário construída com rejeito e com núcleo de argila em Cajati (SP), de modo a identificar a presença de água no interior do maciço.

3.2 Método da Sísmica: MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Na interface entre duas camadas rochosas existe, normalmente, uma variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas, resultante da diferença das propriedades físicas do material que compõe as duas camadas. Nessa interface, a energia da onda sísmica incidente é dividida em uma fração transmitida e outra refletida. As amplitudes relativas das partes refletidas e transmitidas são descritas pela equação de Zoeppritz, em termos das velocidades e densidades das duas camadas (TELFORD *et al.*, 1990).

Ainda segundo Telford *et al.* (1990), a orientação e o tipo de características estruturais dependem de campos, como a tensão a que a área tenha sido exposta ou que ainda esteja. Assim, o prévio conhecimento das estruturas, sejam naturais ou construídos, auxilia na interpretação e no tipo de estrutura delineada no levantamento sísmico.

Os ensaios sísmicos empregando ondas superficiais conhecidas como ondas *Rayleigh* e ondas *Love* têm sido utilizados comumente na caracterização geotécnica, devido à possibilidade de se obter o módulo de distorção inicial do solo (G_0 ou G_{max}), considerado o parâmetro mais importante na caracterização dinâmica de solos (SOUZA; GANDOLFO, 2018).

A aquisição de ondas *Rayleigh* é mais simples e, por isso, a mais utilizada. Este ensaio é realizado usando dois receptores verticais (geofones P), que registram os impulsos provocados no solo por uma fonte impulsiva. A sequência de ondas é transformada para obter a curva de dispersão, que projeta a velocidade das ondas de *Rayleigh* em função da frequência (ou do comprimento de onda). Após tratamento usando um algoritmo de inversão, obtém-se a velocidade da onda de corte (V_s) em função da profundidade, isto é, o perfil sísmico do solo. A partir de V_s , obtém-se G_0 pela relação simples: $G_0 = \rho V_s^2$. (ρ = massa específica do material dada em kg/m^3).

Na última década, foram desenvolvidos métodos para o estudo das ondas superficiais, com base na aquisição com múltiplos receptores, normalmente 24 ou mais, os quais, além do procedimento de campo mais rápido, permitem maior rigor nos resultados, devido à elevada integridade espectral dos dados adquiridos (SOUZA; GANDOLFO, 2018).

As ondas superficiais são ondas sísmicas que se propagam paralelamente à superfície do terreno, sendo que sua amplitude decresce exponencialmente com a profundidade, com a propagação energética limitando-se a uma camada superficial equivalente a cerca de um comprimento de onda (λ). Durante a aquisição, utilizando uma fonte para criar ondas longitudinais (ondas P), mais de dois terços da energia sísmica produzida correspondem a ondas de Rayleigh (RICHART; WOODS; HALL, 1970).

Em um meio verticalmente heterogêneo, as ondas superficiais apresentam comportamento dispersivo, isto é, diferentes frequências (comprimento de onda) com velocidades de propagação distintas, designadas velocidade de fase. A propagação da onda é influenciada pelas propriedades mecânicas da(s) camada(s) atingida(s) por esse comprimento de onda. A relação entre a velocidade de fase e a frequência, ou comprimento de onda, é representada pela curva de dispersão e depende, essencialmente, do perfil do solo (RICHART; WOODS; HALL, 1970).

O método MASW abrange três etapas fundamentais: a aquisição, o processamento (cálculo da curva de dispersão) e a inversão (geração do modelo de Vs).

A aquisição (etapa 1) é realizada usando múltiplos receptores de baixa frequência (24 ou mais) e uma fonte impulsiva (ondas P e Rayleigh), registrando, no tempo e no espaço, o trem de ondas completo onde as ondas de *Rayleigh* são dominantes. O sismograma obtido deve conter o registro das ondas de *Rayleigh* em uma larga banda de frequências, pois a profundidade atingida pelo ensaio depende, fundamentalmente, da frequência mínima registrada (RICHART; WOODS; HALL, 1970).

O processamento (etapa 2) consiste, principalmente, em obter a curva de dispersão, a partir do sismograma (t, x), trabalhando no domínio frequência-número de onda ($f-k$). O sismograma tempo-distância é transformado para o domínio $f-k$ pela aplicação de uma 2D FFT, que consiste na aplicação sucessiva de duas

transformadas de Fourier. Na primeira operação, os dados do domínio tempo-distância são transformados em frequência-distância, decompondo os sinais registrados, de acordo com o seu conteúdo em frequências. Na segunda aplicação da transformada, na direção espacial, os dados são transpostos para o domínio frequência-número de onda ($f-k$). O espectro $f-k$ mostra as propriedades dispersivas das ondas de Rayleigh, sendo a curva de dispersão o resultado da pesquisa, para cada frequência, dos máximos energéticos (RICHART; WOODS; HALL, 1970).

Posteriormente (etapa 3), a curva de dispersão passa por um processo matemático de inversão, onde se obtém um modelo de camadas com diferentes espessuras e velocidades da onda S que ajustam a curva. O processo de inversão da curva de dispersão consiste na obtenção dos parâmetros do modelo do terreno, por meio de algoritmos que se baseiam nos dados experimentais. A inversão pode utilizar diferentes abordagens, como um processo interativo de inversão das curvas modais, com base no método dos mínimos quadrados pesados de Marquardt-Levenberg (DAL MORO, 2008).

Para cada base MASW implantada em campo, são obtidos perfis 1D de velocidade de onda S, correspondendo a diferentes posições ao longo desta base. Desta forma, avançando o arranjo em sucessivas bases MASW, ao longo de uma linha de estudos (*roll-along*), é possível construir um perfil 2D, plotando-se todos os perfis 1D em suas respectivas posições. Em linhas sísmicas mais curtas, é possível realizar o caminhamento dos pontos de batida (tiros), ao longo de uma base fixa, denominado caminhamento ao longo da linha (*walk-away*). Isto possibilita extrair pontos 1D de forma otimizada para cada base sísmica unitária, permitindo a construção de modelos mais confiáveis (menor distância entre pontos 1D amostrados) e a compilação de seções 2D mais fidedignas. Tipicamente, para uma base sísmica com 24 canais, é possível extrair, pelo menos, sete perfis 1D, distribuídos ao longo do alinhamento sísmico e, com o avanço para bases sucessivas (*roll-along*), a seção 2D resultante terá a melhor resolução lateral de informação MASW (DAL MORO, 2008).

3.3 Investigação Geotécnica Direta

O *Standard Penetration Test* (SPT), ou Ensaio de Penetração Padronizado, é executado durante a sondagem, de modo a gerar índices de resistência à penetração do solo, a cada metro, a partir de 1 m de profundidade. Consiste na cravação do

barrilete amostrador, pelo impacto de um martelo de 65 kg, caindo livremente de uma altura de 75 cm sobre a composição das hastes. As peças e dimensões do equipamento utilizado seguem as especificações preconizadas na ABNT NBR 6484 (2001), atualizada pela segunda edição em outubro de 2020.

O barrilete é colocado no fundo do furo de sondagem e na cota desejada. São assinalados com giz, na porção da haste que permanecer fora do revestimento, três trechos de 15 cm cada um, referidos a um ponto fixo do terreno. A seguir, o martelo é apoiado suavemente sobre a composição de hastes, anotando-se a eventual penetração observada, a qual corresponderá a zero golpe. Se a penetração for inferior a 45 cm, tem início a cravação do barrilete pela queda do martelo, sendo que cada uma corresponderá a um golpe, até atingir a cravação de 45 cm no amostrador. Durante o ensaio, são anotados o número de golpes e a penetração em centímetros para a cravação de cada terço do barrilete. Após o término do trecho de 45 cm, a sondagem prossegue até a cota do próximo ensaio (a cada metro, a partir de 1 m) (MARRANO; IYOMASA; MIYASHIRO, 2018).

O valor da resistência à penetração consiste no número de golpes necessários à cravação dos 30 cm finais do barrilete amostrador. Caso a penetração seja menor que 5 cm após 10 golpes consecutivos, excetuando os cinco primeiros golpes do teste, ou se o número de golpes ultrapassar 50 em um mesmo ensaio, a cravação do barrilete é interrompida, e o material é considerado impenetrável ao SPT, devendo ser anotados o número de golpes e a penetração respectiva (MARRANO; IYOMASA; MIYASHIRO, 2018).

A técnica de perfuração denominada *HOLLOW STEM AUGER* (trado helicoidal oco) opera, simultaneamente, como revestimento e permite a coleta de amostras de solo, por meio da haste oca, em profundidades específicas, utilizando tecnologia *Direct Push*. Essa modalidade de sondagem de solo é referência nos trabalhos ambientais, possibilitando uma perfuração alinhada e revestida, o que diminui a chance de contaminação. A haste helicoidal oca, com abertura no fundo, permite descer outra haste de menor diâmetro em seu interior, de modo a se obter amostras dos maciços nos diferentes níveis, também propiciando a instalação de piezômetros ou medidores de nível, sem a injeção de água durante a perfuração (MARRANO; IYOMASA; MIYASHIRO, 2018).

3.4 Legislação Sobre Barragens

Os principais instrumentos legais inerentes a barragens podem ser traduzidos, conforme descritos a seguir.

Primeiramente, o Projeto de Lei (PL) nº 1.181/2003 criou o Grupo de Trabalho no âmbito da Câmara Técnica de Análise de Projetos (CTAP), do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (GT SB CTAP/CNRH), com a seguinte ementa: “Estabelece diretrizes para verificação da segurança de barragens de cursos de água para quaisquer fins e para aterros de contenção de resíduos líquidos industriais” (BRASIL, 2003).

A esse PL foi apensada minuta de substitutivo, discutida e aprovada pela Câmara Técnica de Assuntos Legais e Institucionais (CTIL) e pelo plenário do CNRH, dando origem ao Projeto de Lei PLC-168/2009 (BRASIL, 2009), culminando com a aprovação da Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010).

A referida Lei estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) “destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais”.

Por essa Lei, foi criado o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, com os seguintes objetivos: garantir a observância de padrões de segurança; regulamentar; promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, junto à população potencialmente afetada.

Para se enquadrar na Política Nacional, a barragem deve ter, pelo menos, um dos atributos:

- a) altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 metros;
- b) capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);
- c) reservatório que contenha resíduos perigosos, conforme normas técnicas aplicáveis;

d) categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.

O Plano de Segurança da Barragem é específico para cada barragem e constitui uma das obrigações dos empreendedores, que tiveram até a data de 20 de setembro de 2012, para submeter o relatório à aprovação do respectivo órgão fiscalizador, especificando as ações, o cronograma e implementando as inspeções de segurança regular, além do Plano Emergencial, conforme contido nas Resoluções CNRH nº 143 (BRASIL, 2012a) e nº 144 (BRASIL, 2012b), de 10 de julho de 2012. Ambas fornecem as diretrizes para implementação da PNSB, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

Pelo sistema de classificação, discriminado na Resolução CNRH nº 143/2012, as barragens são classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo CNRH.

A classificação por categoria de risco (CRI) - alto, médio ou baixo - depende das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. Já a classificação por categoria de dano potencial associado à barragem (DPA) - alto, médio ou baixo - baseia-se no potencial de perdas de vidas humanas e nos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (BRASIL, 2012a).

Posteriormente, a Portaria DNPM nº 70.389, de 17 de maio de 2017, criou o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispôs sobre o Plano de Segurança, a Revisão Periódica de Segurança e as Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração, e o Plano de Ações de Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM (BRASIL, 2017).

Para a ANM, Barragens de Mineração englobam barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada,

compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais.

A Declaração de Condição de Estabilidade (DCE) é um instrumento que obriga o empreendedor a atestar a estabilidade de sua barragem para operação, por meio da expedição de um documento formal ao órgão fiscalizador (BRASIL, 2017).

A Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.765/2019 e a Resolução SEMAD nº 2.762/2019 determinam, respectivamente: a) a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos de mineração que utilizem ou tenham utilizado método de alteamento para montante, e b) o sobrestamento da análise de processos de regularização ambiental em curso referentes à atividade de disposição de rejeitos em barragens, independentemente do método construtivo, até que sejam publicadas novas normas pelos órgãos competentes.

A Resolução ANM nº 4/2019 (BRASIL, 2019a) foi revogada pela Resolução ANM nº 13/2019, a qual contempla no Art. 3º:

Ficam os empreendedores responsáveis por quaisquer barragens de mineração, proibidos de conceber, construir, manter e operar, nas localidades pertencentes à poligonal da área outorgada ou em áreas averbadas no respectivo título minerário e inseridos na Zona de Autossalvamento - ZAS: I - Instalações destinadas a atividades administrativas, de vivência, de saúde e de recreação; II - Barragens de mineração ou estruturas vinculadas ao processo operacional de mineração para armazenamento de efluentes líquidos, situadas imediatamente à jusante da barragem de mineração cuja existência possa comprometer a segurança da barragem situada à montante, conforme definido pelo projetista; e III - Qualquer instalação, obra ou serviço que manipule, utilize ou armazene fontes radioativas (BRASIL, 2019b).

Continuando, a Resolução ANM nº 13/2019 (BRASIL, 2019b), em seu Art. 7º, especifica que: As barragens de mineração que necessitam ter PAEBM, conforme § 2º do art. 9º da Portaria ANM nº 70.389, de 17 de maio de 2017, devem contar com sistemas automatizados de acionamento de sirenes instaladas fora da mancha de inundação e outros mecanismos adequados ao eficiente alerta na ZAS, instalados em lugar seguro, e dotados de modo contra falhas em caso de rompimento da estrutura, complementando os sistemas de acionamento manual no empreendimento e o remoto.

A Lei nº 14.066/2020 (BRASIL, 2020) alterou as Leis nº 12.334/2010 (Política Nacional de Segurança de Barragens), nº 7.797/1989 (Fundo Nacional do Meio

Ambiente), nº 9.433/1997 (Política Nacional de Recursos Hídricos) e o Código de Mineração, estabelecendo as seguintes diretrizes:

- a) proibição do uso de barragens alteadas pelo método a montante;
- b) novas regras para descaracterização de barragens, com exigência de descaracterização das estruturas alteadas a montante até 25 de fevereiro de 2022, prazo que poderá ser prorrogado por decisão da ANM referendada pelo órgão licenciador;
- c) sanções administrativas para caso de rompimento das barragens;
- d) possibilidade de exigência de seguro, caução ou outras garantias financeiras em caso de barragens de rejeitos, e
- e) obrigações específicas para titulares de barragens, como por exemplo: elaboração de mapa de inundação, comunicação e articulação com órgãos ambientais, de fiscalização e da defesa civil).

Por fim, a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Além de consolidar as normas de barragem (Portaria DNPM nº 70.389/2017, Resolução ANM nº 13/2019 – Proibição de barragens a montante e Resolução ANM nº 51/2020 – PAEBM), a nova Resolução ANM promove algumas alterações na legislação de barragens, descritas a seguir:

- a) qualquer barragem com categoria de risco alto passa a ser enquadrada na Política Nacional de Segurança de Barragens;
- b) para descadastramento, por descaracterização de barragem, será necessário apresentação de documento elaborado por profissional legalmente habilitado e revisado por segunda parte (consultoria externa com experiência mínima de 5 anos);
- c) obrigatoriedade do envio do mapa de inundação via SIGBM, em formato kmz, até 30 de setembro de 2022;
- d) foi acrescentado o VOLUME VI – Processo de Gestão de Risco (PGRBM) ao Plano de Segurança de Barragens;
- e) o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM passa a ser obrigatório para toda barragem inserida na Política Nacional de Segurança de Barragens;

f) está vedada a implantação de barragens de mineração em locais cujo mapa de inundação identifique a existência de comunidade na ZAS, conforme determina a Lei nº 14.066/2020, e

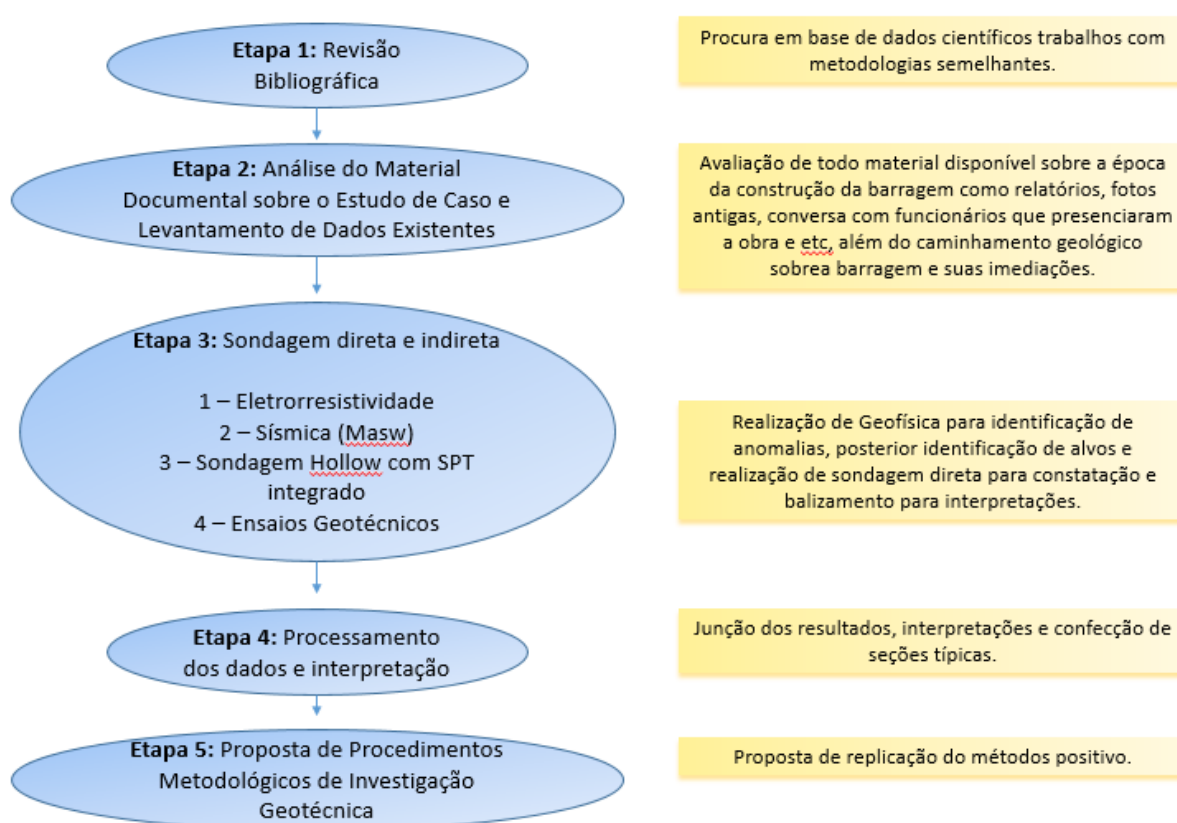
g) caso seja identificada a existência de comunidade na ZAS de barragens já instaladas deverá ser feita a descaracterização da estrutura ou reassentamento da população e o resgate do patrimônio cultural, ou obras de reforço que garantam a estabilidade efetiva da estrutura.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida com base na avaliação dos estudos de investigação geotécnica realizados em duas barragens de rejeito de mineração de areia industrial no interior de São Paulo, denominadas B-11 e B-12.

Para tanto, a pesquisa compreendeu as seguintes etapas e métodos correspondentes, sintetizados na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: elaborado pelo autor

A seguir, é apresentada a descrição de cada etapa do trabalho.

4.1 Etapa 1 - Revisão Bibliográfica

Essa etapa consistiu na análise dos principais métodos diretos e indiretos publicados sobre investigação geotécnica em uso, para avaliação das condições do

maciço de barragens de rejeito, com a finalidade de estabelecer vantagens e desvantagens de cada método utilizado, e propor uma metodologia de investigação.

Para tanto, foram inseridas palavras-chaves nos *sites* de bancos de pesquisas, de modo a se obter todas as publicações aí inseridas. Nestas plataformas, é possível consultar resumos e objetivos de cada trabalho de forma preliminar.

O autor pesquisou em diversas fontes, e a a Scopus trouxe resultados mais satisfatórios. Foram utilizadas as seguintes palavras-chaves para a pesquisa na plataforma: “SPT + Dam”, “Geophysics + Dam”, “SPT + Geophysics”, “SPT + Geophysics + Dam”, “Tailing Dam + Geophysics”, “Tailing Dam + Geophysics + SPT”, “Embankment Dam or Earth Dam or Tailing Dam or Terrain Dam or Earth-filled Dam + Geophysics”.

4.2 Etapa 2 - Análise do Material Documental sobre o Estudo de Caso e Levantamento de Dados

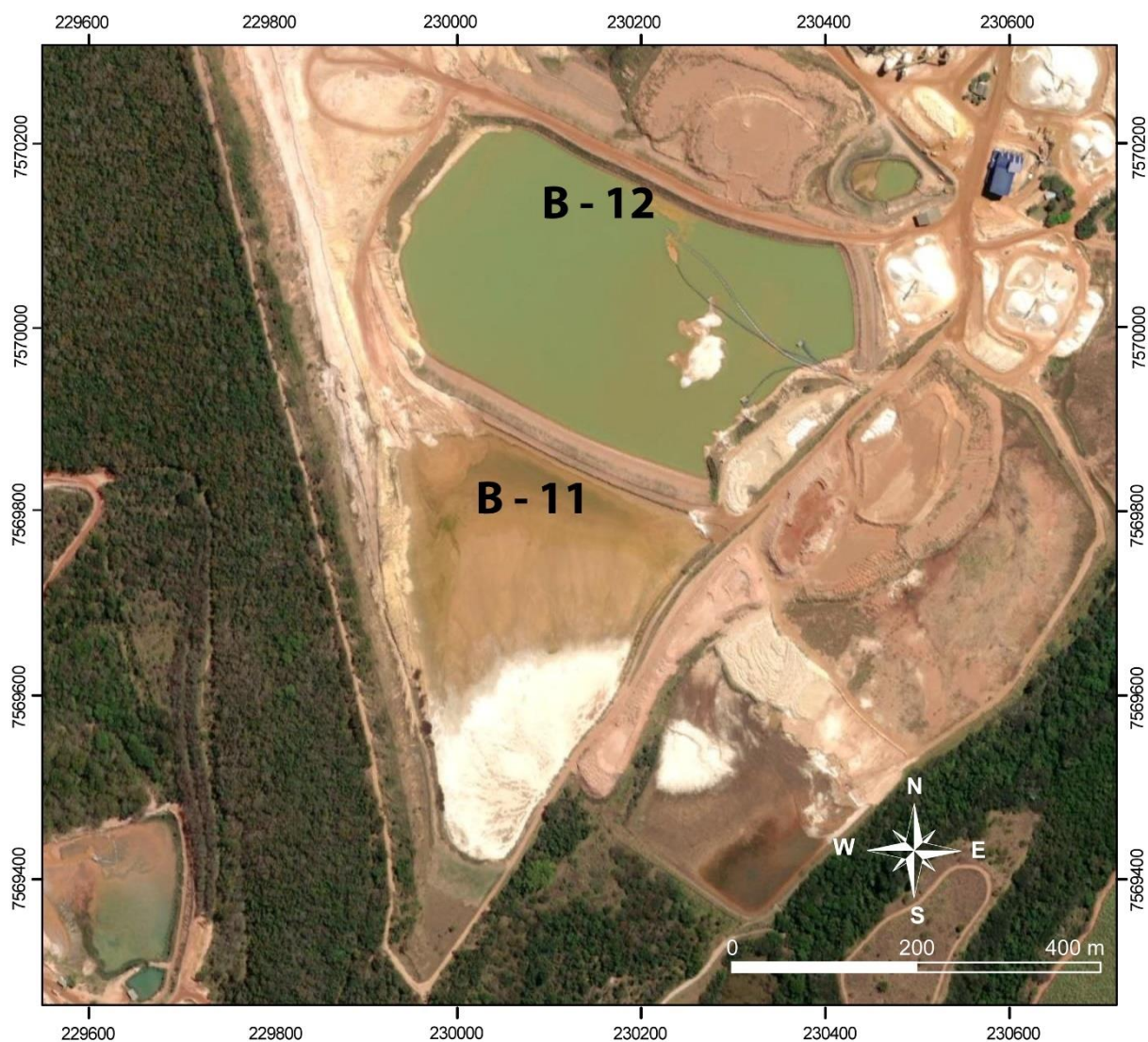
A etapa 2 envolveu a análise de toda a documentação dos estudos e ensaios geotécnicos e geofísicos executados para investigação das duas barragens de rejeito de mineração de areia industrial.

A empresa de mineração em questão contratou a empresa Alta Resolução Geofísica e Geologia (MACHADO; MARCHIORETO, 2016; 2021), para realizar a campanha inicial de investigação geofísica, em 2016, e para a campanha de 2021, após execução de obra nas barragens, com o intuito de comparação entre as situações nos diferentes anos. A mineradora contratou também as empresas G&MA - Geologia e Meio Ambiente Assessoria e Consultoria Ltda. (COPPEDÊ, 2018) para a integração dos dados, CWS Ambiental (SOUZA, 2018), para a campanha de sondagem *Hollow*, SPT e instalação dos piezômetros, e Amana Geologia Engenharia e Meio Ambiente (TAMBORIM, 2018), para acompanhamento das obras e ensaios. Todas essas investigações e a elaboração dos relatórios foram acompanhadas pelo autor desta dissertação, incluindo os trabalhos e ensaios de campo.

Foi realizado um caminhamento sobre as barragens com foco na identificação de anomalias nos taludes, na geologia do entorno e, principalmente, das ombreiras e fundação.

A Figura 4 apresenta a localização do complexo de barragens estudado.

Figura 4 – Localização do complexo de barragens, com destaque para as estudadas (B-11 e B-12)

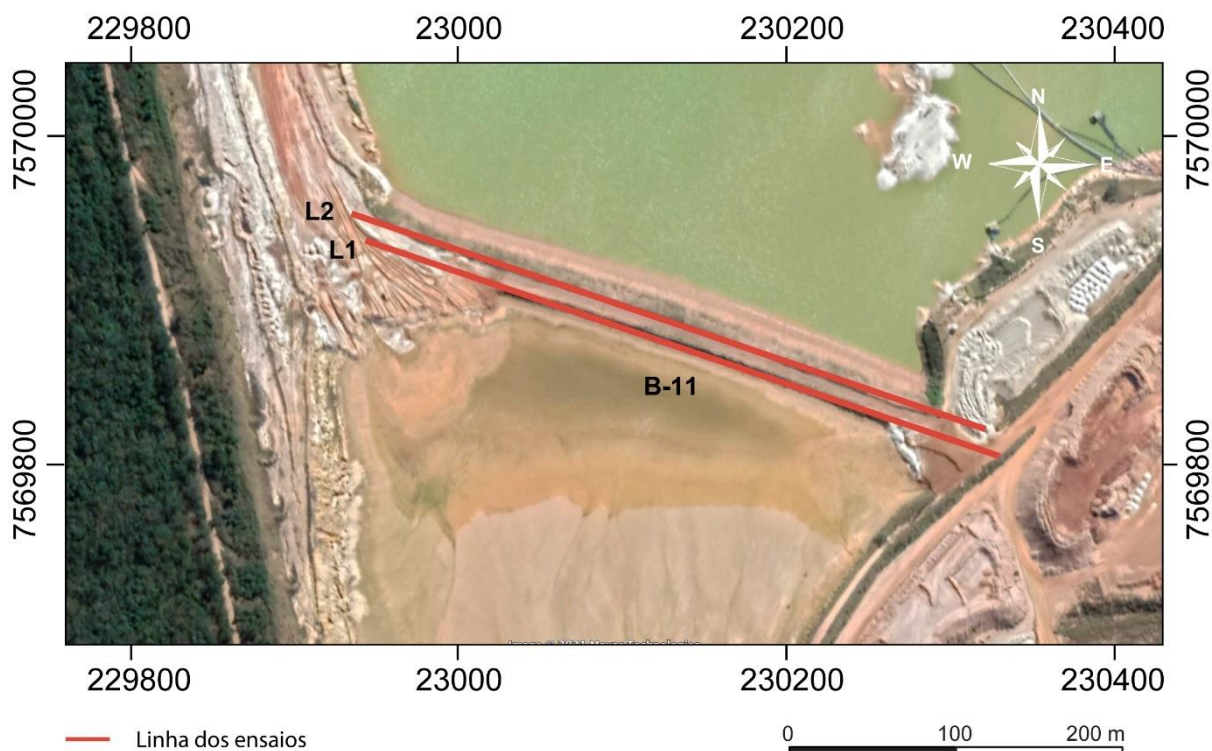


Fonte: elaborado pelo autor a partir de imagens do *software Google Earth* (2021)

4.2.1 Método da Eletorresistividade

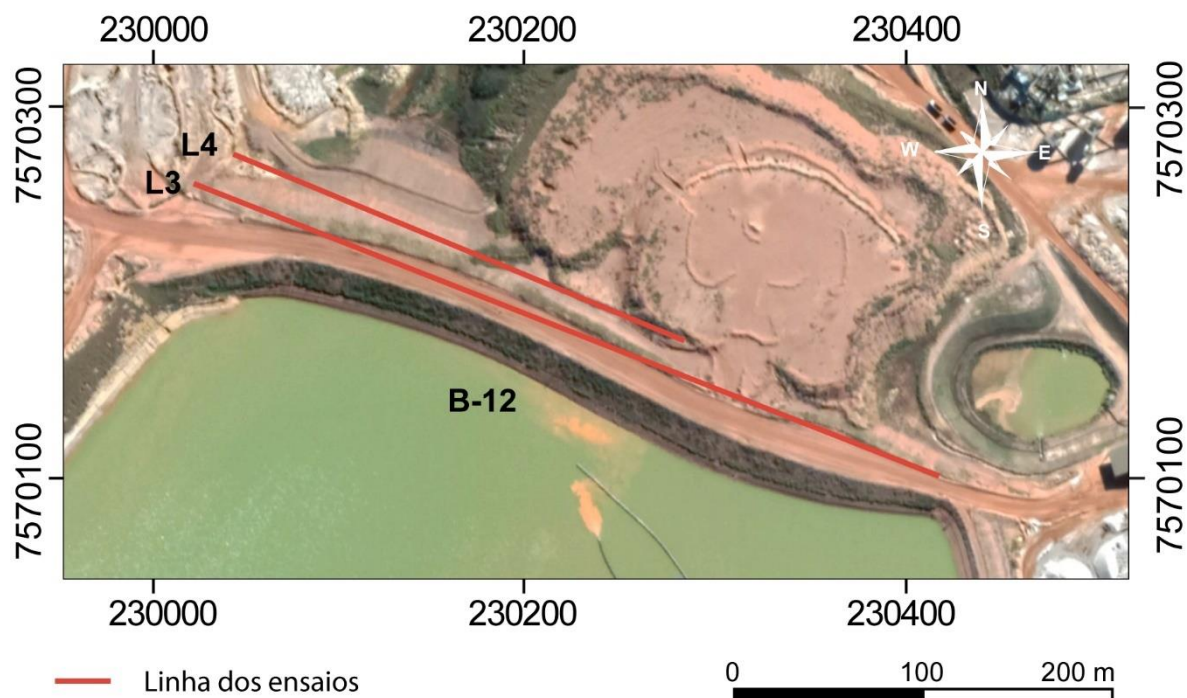
Os ensaios de Eletorresistividade consistiram no traçado de duas linhas paralelas ao maciço da barragem: uma na crista e outra no meio do talude de jusante, conforme mostram as linhas L1 e L2 na barragem B-11, e linhas L3 e L4 na barragem B-12 (Figuras 5 e 6). As duas campanhas (2016 e 2021) foram realizadas no mesmo local, com desvio de poucos metros entre campanhas de coleta (2016 e 2021), o que possibilitou a comparação entre ambas.

Figura 5 – Localização das linhas L1 e L2 na barragem B-11



Fonte: elaborado pelo autor a partir de imagens do software Google Earth (2021)

Figura 6 – Localização das linhas L3 e L4 na barragem B-12



Fonte: elaborado pelo autor a partir de imagens do software Google Earth (2021)

Para a seção de imageamento geolétrico (SIG), o arranjo utilizado foi o Dipolo-Dipolo, com espaçamento de 2,5 metros entre eletrodos, permitindo a investigação

até 30 metros de profundidade, tendo em vista que os maciços das barragens possuem, no máximo, 15 metros de altura, sendo 30 metros suficientes, portanto, para caracterizar toda a profundidade do aterro e sua fundação.

Os trabalhos foram realizados utilizando-se o equipamento “*Syscal Switch Pro multieletrodo*” de 96 canais, fabricado pela IRIS Instruments. O emprego do eletrorresistivímetro multieletrodos permitiu programar o *software* de aquisição para varrer o perfil investigado com vários Dp-Dp. Os mesmos métodos e equipamentos foram utilizados na campanha de 2021.

As seções elétricas, obtidas pelo caminhamento elétrico, são classificadas como pseudo-seções, porque os resultados obtidos não correspondem aos valores reais dos parâmetros de resistividade elétricos, mas representam valores aparentes, assim como as profundidades na seção vertical são também apenas qualitativas, representados em escalas cromáticas, para facilitar a observação das variações ao longo do perfil. Na interpretação dos dados das pseudo-seções obtêm-se informações qualitativas sobre a posição espacial dos corpos e, mais raramente, pode-se estimar o seu mergulho. Como decorrência, as informações são tão mais precisas quanto melhor a definição de uma anomalia de resistividade.

Para a interpretação dos dados, foram utilizadas funções matemáticas que relacionam os parâmetros físicos (resistividade, velocidade, densidade etc.) com os resultados obtidos por meio de *softwares* específicos. As pseudo-seções de resistividade aparente são geradas pelo processo de inversão, o qual modela as distorções inerentes ao método, aproximando a imagem 2D à situação real, facilitando a interpretação.

A tecnologia digital multieletrodos permite a integração entre os levantamentos vertical e horizontal, além de grande quantidade de pontos amostrados, elevando o levantamento convencional do caminhamento elétrico para um Imageamento Geoelétrico.

O perfil gerado recebe o nome de Seção de Imageamento Geoelétrico (SIG), onde os valores de resistividade elétrica, bem como suas posições espaciais foram corrigidos para a situação real. A integração de seções oferece a visualização 3D e possibilita, também, a geração de modelos 3D.

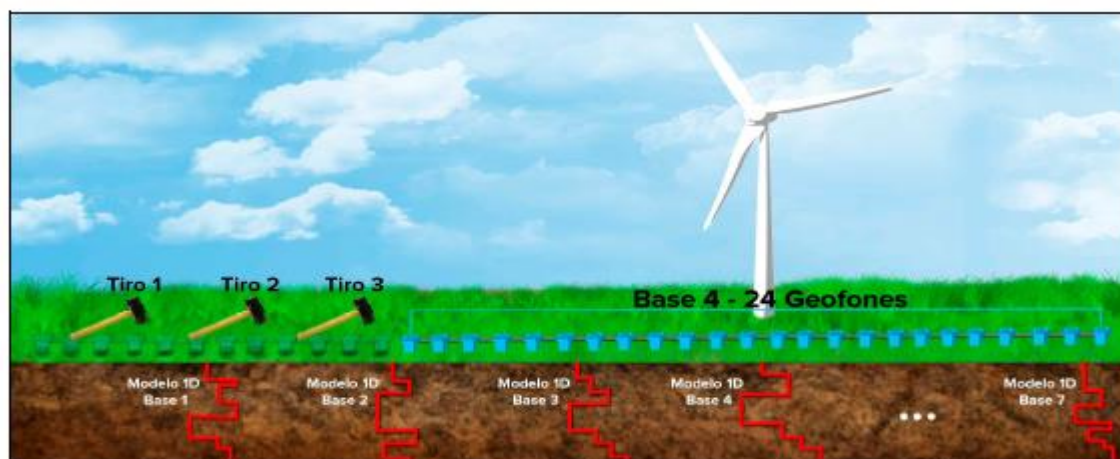
4.2.2 Método da Sísmica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*)

O equipamento consistiu em um sismógrafo digital composto por amplificadores, filtros analógicos e conversor analógico/digital de 24 bits, modelo GEODE da Geometrics Inc. (USA-2010), e um microcomputador tipo notebook. O controle do sistema é obtido por meio de *software* que controla a taxa de amostragem, tempo total de registro e demais parâmetros de aquisição, assim como apresenta os dados na tela, em forma de sismogramas. Os dados são gravados em arquivos no próprio disco rígido do microcomputador.

Para cada canal foi adotada uma frequência de amostragem de 4.000 Hz, com comprimento de registro de 4.000 amostras (1 segundo de registro).

Foram utilizados geofones de baixa frequência (4,5 Hz), com espaçamentos de 2,5 m, gerando arranjos de geofones (bases sísmicas) com 57,5 m de extensão. Para cada base sísmica MASW, foram realizados dois pontos de batida da marreta, efetuados próximos ao primeiro geofone e afastados em 20 m e 2,5 m. Além desses, foram realizados pontos de tiro ao longo da base (base fixa). O caminhamento entre as diversas bases MASW (*roll-along*) foi obtido avançando 14 geofones. Este procedimento possibilitou a amostragem da subsuperfície em sucessivos perfis 1D (pontos de amostragem), a cada 5 m. A Figura 7 exhibe o *layout* das bases MASW ao longo de um alinhamento de estudo.

Figura 7 – Exemplo do arranjo das sucessivas bases MASW ao longo de um alinhamento



Fonte: Machado (2016)

Para o processamento, inversão das curvas de dispersão, obtenção dos modelos 1D e geração das seções MASW 2D dos dados MASW, foi utilizado o software SurfSeis Versão 4.2.

Os Mesmos métodos e equipamentos foram utilizados na campanha de 2021.

4.2.3 Método de sondagem direta Hollow, SPT e Piezômetros

Os ensaios de SPT foram feitos por dentro da sondagem com *Hollow* (trado oco), de metro em metro, em pontos previamente definidos com base na interpretação dos resultados da geofísica, ou seja, onde os ensaios mostravam alguma anomalia negativa (pontos com baixa resistividade elétrica, indicativos da presença de água, ou com inversão de velocidade de ondas apontando baixa resistência).

Os perfis de eletrorresistividade e os de *Masw* foram confrontados por terem sido realizados na mesma posição. Onde houve acúmulo das duas anomalias, foi feita a locação da sondagem.

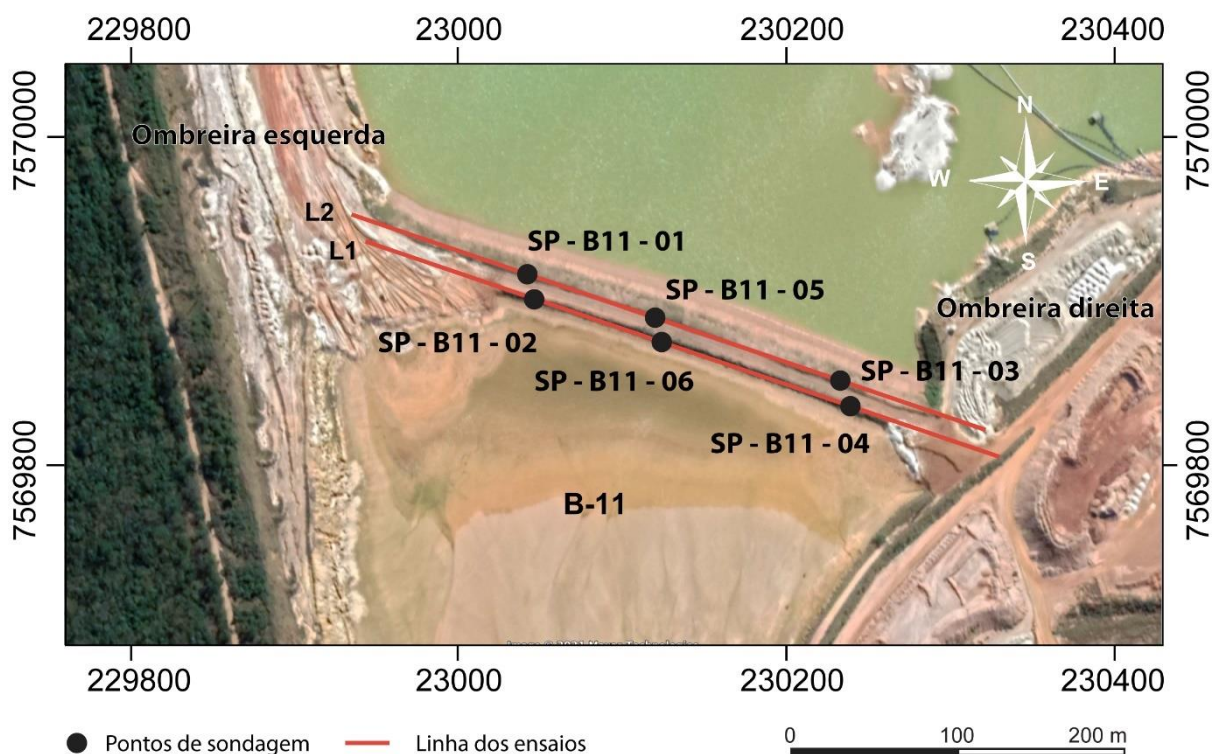
Foram executados 10 furos de sondagens e realizados de forma concomitante os ensaios de penetração padronizados (SPT) a cada metro perfurado. Nos pontos de realização das sondagens, além dos ensaios SPT, foram instalados poços de monitoramento para o acompanhamento da variação do nível de água e pressão dentro do maciço. Desse total, seis foram na B-11 e quatro na B-12. Os ensaios foram nomeados SP-01, SP-03 e SP-05 (talude de jusante) e SP-02, SP-04 e SP-06 (crista) na barragem B-11, e SP-01 e SP-03 (talude de jusante) e SP-02 e SP-04 (crista) na barragem B-12, conforme mostrado na Tabela 1 e nas Figuras 8 e 9.

As Fotos 1 e 2 mostram o tripé e a perfuratriz utilizados para os ensaios SPT e o procedimento de cravação do barrilete amostrador com o martelo de 65 kg, em meio à sondagem com *Hollow*.

Tabela 1 – Localização geográfica dos furos de sondagem e profundidade alcançada

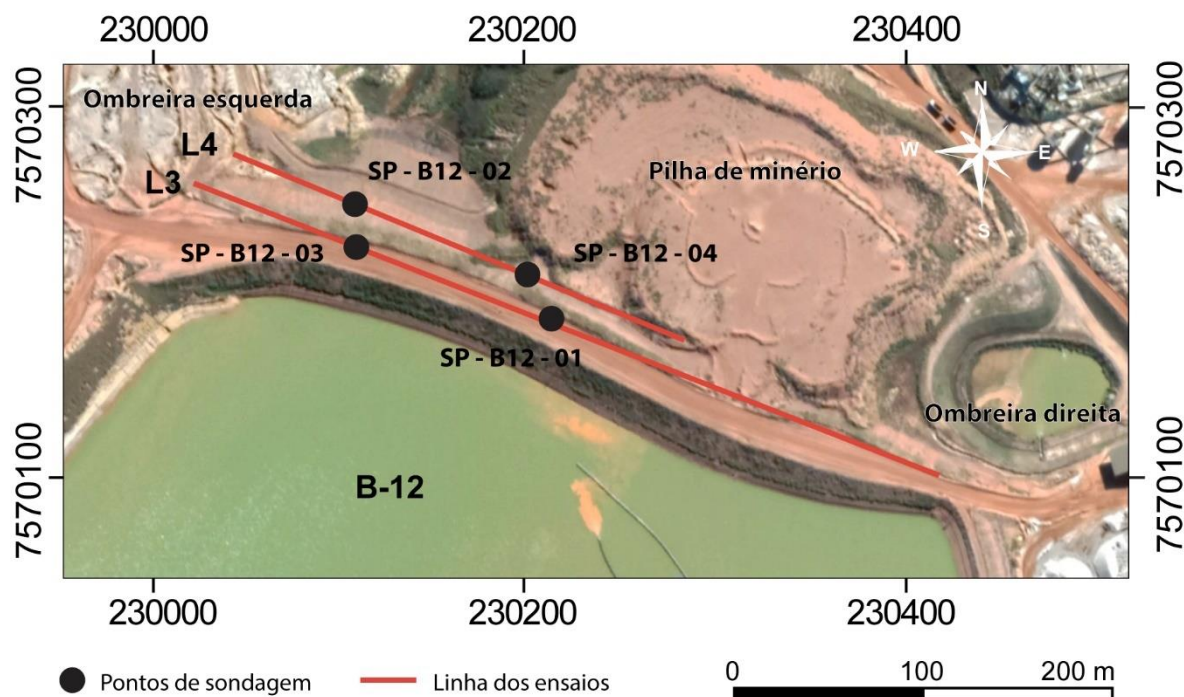
Barragem	Sondagem	Coordenadas UTM (m)			Profundidade de execução (m)
		X	Y	Z	
B-11	SP-01	230.242,1	7.569.815	655,504	14,3
	SP-02	230.244,1	7.569.824	651,382	13,0
	SP-03	230.085,8	7.569.871	655,6043	15,0
	SP-04	230.093,9	7.569.880	649,637	13,0
	SP-05	230.166,7	7.569.842	655,5363	15,3
	SP-06	230.173,9	7.569.850	650,4987	11,7
B-12	SP-01	230.187,4	7.570.187	650,2	16,6
	SP-02	230.118,2	7.570.246	641,962	7,0
	SP-03	230.113,8	7.570.219	651,294	15,1
	SP-04	230.176,9	7.570.203	645,3397	12,2

Fonte: Souza (2018)

Figura 8 – Localização dos pontos de sondagem SPT e instalação dos piezômetros da barragem B-11

Fonte: Google Earth (2021), elaborado pelo autor

Figura 9 – Localização dos pontos de sondagem e instalação dos piezômetros da barragem B-12



Fonte: *Google Earth* (2021), elaborado pelo autor

Foto 1 – Equipamento de *Hollow* com trado helicoidal oco



Fonte: acervo do autor

Foto 2 – Execução do ensaio de SPT por dentro da haste



Fonte: acervo do autor

4.3 Etapa 3 - Integração dos Dados Diretos e Indiretos

Os dados das campanhas de geofísica (Eletrorresistividade e MASW) foram analisados em conjunto com os das campanhas de investigação direta (Sondagem com *Hollow*, SPT, Triaxial), para integralização das informações e construção dos perfis longitudinais e transversais de como a barragem se apresenta (“*As Is*”).

Os perfis foram elaborados no programa AutoCAD, para permitir melhor visualização, aumentando, assim, a acertabilidade dos resultados.

Foi utilizado o método visual, que busca o melhor ajuste para um conjunto de dados, tentando minimizar as diferenças entre o valor estimado e os dados de SPT, usando análise qualitativa nos valores de Eletrorresistividade e de MASW, e a resistência à penetração (SPT) para cada furo de sondagem, interpretando-se o melhor resultado. Os resultados pontuais sob as seções são extrapolados para o restante dos perfis geofísicos, permitindo uma correlação para cada camada encontrada.

4.4 Etapa 4 - Proposta de Procedimentos Metodológicos de Investigação Geotécnica

A partir da integração e consolidação dos resultados obtidos nas etapas anteriores, foi elaborada uma proposta de procedimentos metodológicos aplicados à investigação geotécnica das condições de estabilidade de barragens de rejeito para o desenvolvimento de estudos denominados “*As Is*”.

Dessa maneira, é possível estabelecer a sequência metodológica mais indicada, assim como os principais estudos de investigação que devem ser realizados, conforme as características do empreendimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os resultados da revisão bibliométrica e dos dados das campanhas de sondagem e geofísicas executadas nas duas barragens, com a integração e discussão dos resultados obtidos.

5.1 Levantamento Bibliométrico

Primeiramente, pôde-se constatar o reduzido número de trabalhos correlacionando investigações indiretas com diretas, principalmente em barragens de rejeito, as quais estão, normalmente, relacionadas a ocorrências de desastres.

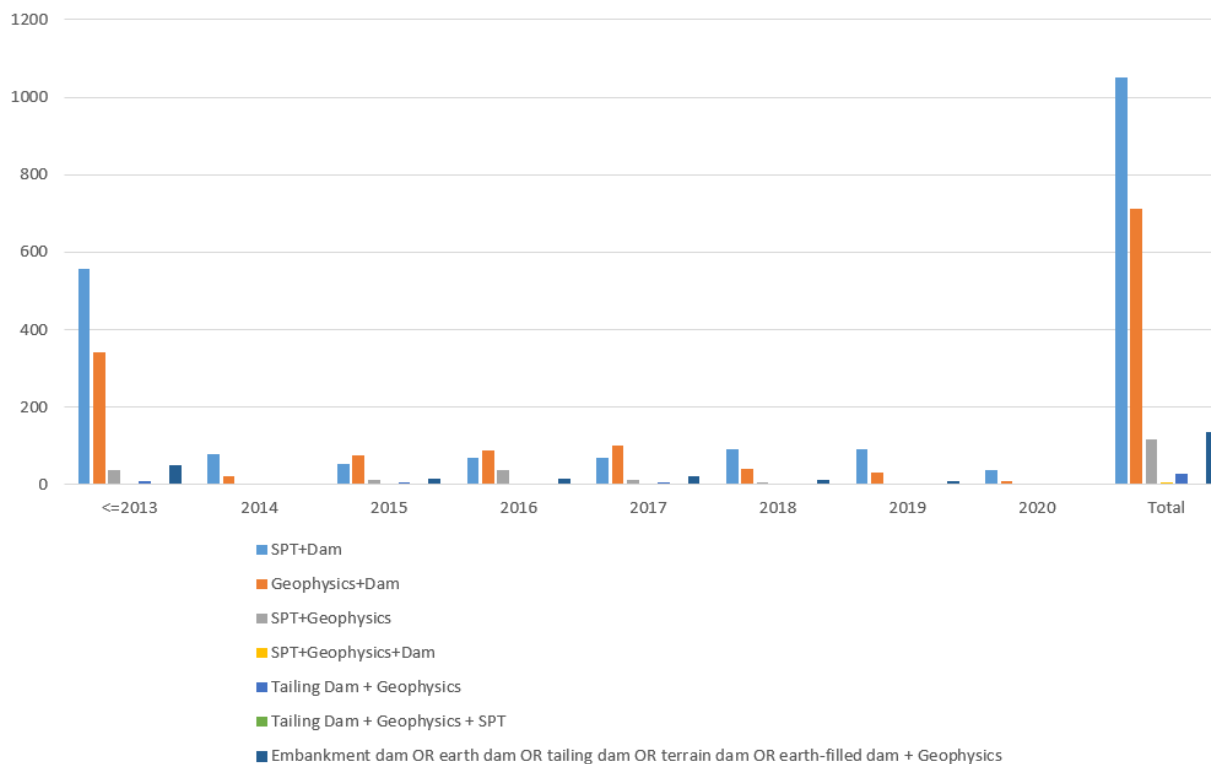
O banco de dados Scopus se mostrou mais relevante entre as várias fontes consultadas. Os números de publicações anuais por palavras-chaves são apresentados na Tabela 2 e na Figura 10.

Tabela 2 – Palavras-chaves usadas na pesquisa a partir do banco de dados Scopus

Tema	≤2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
SPT + Dam	558	78	55	69	69	91	93	39	1052
Geophysics + Dam	341	21	77	88	101	42	33	8	711
SPT + Geophysics	38	4	13	38	12	6	4	3	118
SPT + Geophysics + Dam	3	0	0	1	1	0	0	1	6
Tailing Dam + Geophysics	9	0	5	2	5	2	4	1	28
Tailing Dam + Geophysics + SPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Embankment dam OR Earth dam OR tailing dam OR terrain dam OR earth-filled dam + Geophysics	51	4	17	17	23	13	8	4	137

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 10 – Representação gráfica das palavras-chaves usadas na pesquisa, levantadas no banco de dados Scopus



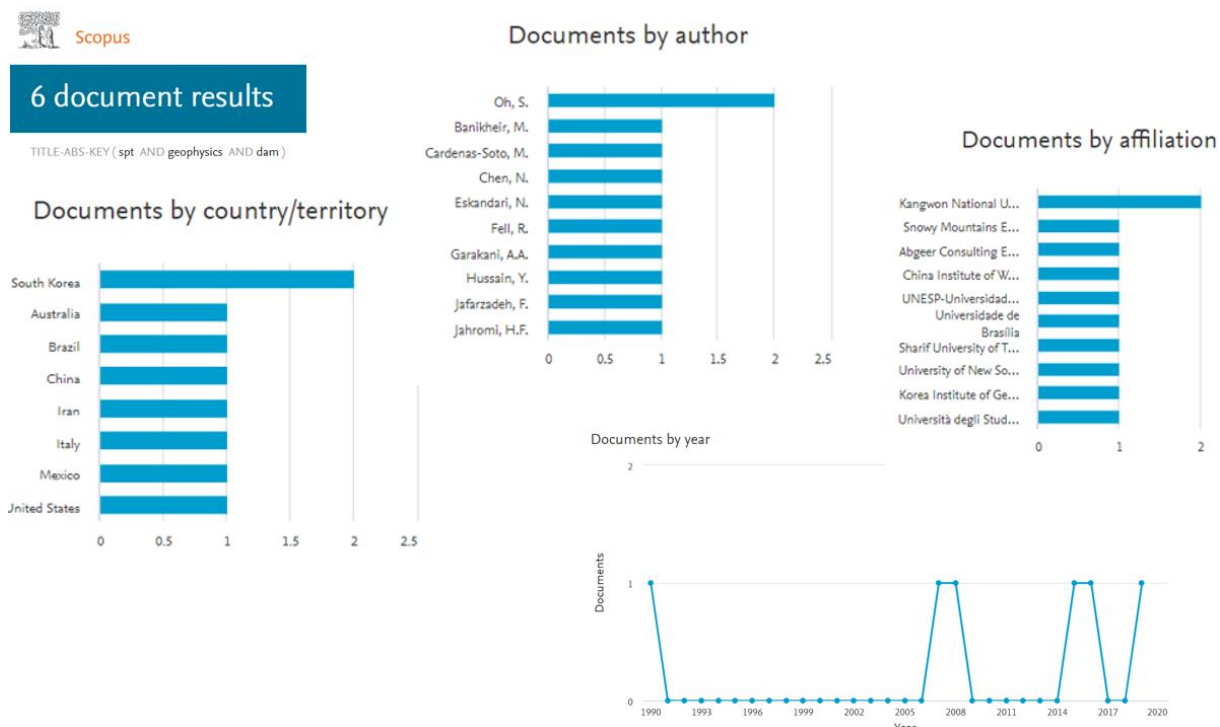
Fonte: elaborado pelo autor

Foram registrados apenas seis resultados que relacionam exatamente estudos de sondagens diretas (SPT) com geofísica em barragens (SPT + Geophysics + *Dam*). A Figura 11 ilustra o resultado da pesquisa por autor, país e instituição associada. Destaca-se o autor coreano Seokhoon Oh, com duas publicações.

Quando a pesquisa se restringiu a Barragens de Mineração (*Tailing Dam*), não houve resultado. Com isso, decidiu-se utilizar uma expressão mais genérica (*Tailing Dam + Geophysics*), que recuperou 28 artigos relacionados, com resultado mais representativo.

Ao se utilizar a expressão (SPT + *Geophysics*), foram gerados 118 artigos de integração entre os dois métodos. No entanto, a maioria dos artigos não se refere a barragens. Assim, considerou-se que a maneira mais assertiva de verificação é com a integração dos dois últimos: (*Tailing Dam + Geophysics*) e (SPT + *Geophysics*).

Figura 11 – Resultado da pesquisa restritiva na plataforma Scopus (SPT + Geophysics + Dam)



Fonte: elaborado pelo autor

O Quadro 1 apresenta os métodos diretos e indiretos utilizados em cada um dos seis principais artigos pesquisados. O método geoeletrico é um destaque na maior parte dos trabalhos, indicando que, apesar de algumas diferenças em pontos onde o *range* de cada camada está em seu limite (podendo “in situ” ser um pouco diferente), pode ser um excelente parâmetro de comparação ao SPT.

Ao comparar com os métodos usados nesse trabalho, é possível afirmar que o método da eletrorresistividade pode ser utilizado com bastante segurança para estudos e monitoramento de barragens.

Quadro 1 – Comparativo entre os tipos de barragens e os métodos diretos e indiretos usados nos principais trabalhos no tema

Título do Trabalho	Tipo de Barragem	Método Geofísico Primário	Método Geofísico Secundário	Método Geotécnico direto	Instalação de Piezômetros	Ano do trabalho
<i>Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam</i>	Barragem	(ERT)	(MASV)	SPT	-	2007
<i>A Comparison of Surface- and Standard Penetration Test-Derived Shear-Wave Velocity</i>	Diversas superfícies	(MASV)	-	SPT	-	2016
<i>Analysis of the Physical Integrity of Earth Dams from Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Brazil</i>	Barragem de Terra	(DC) Resistivity	(ERT)	Teste de SPT, permeabilidade e gradação	Guelph Permeameter	2019
<i>Characterization of Tailing Dams Using Shallow Geophysics: Application in the Cajati B1 Dam, São Paulo</i>	Barragem de Rejeito	(ERT)	-	Piezômetros	-	2018

<i>Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria</i>	Barragem de Água	(EM) Superficial Electromagnetic(ES) Electrical Sounding	(ERT)	SPT e escavação de valetas	-	2011
<i>Geophysical Methods for BR Tailings Dam Research and Monitoring in the Mineral Complex of Tapira – Minas Gerais, Brazil</i>	Barragem de Rejeito	Electrical Resistivity	(GPR)	SPT e Piezômetros	Casagrande e INA	2019

5.2 Levantamento de Campo e Geologia

A partir a campanha de caminhamento sobre o maciço das barragens e seu entorno, foi possível identificar algumas feições de gramíneas mais verdes em pontos baixos, provavelmente nas saídas dos drenos horizontais que estavam recobertos.

Tanto nas ombreiras, quanto na fundação, foram identificados arenitos amarelados com estratificação cruzada acanalada, pertencentes à Formação Piramboia. Esses arenitos possuem granulometrias variadas e são considerados reservatório de água do Aquífero Guarani.

A presença de água na formação geológica é evidenciada pelo surgimento de água a jusante da barragem B-12. Na mineração existe o rebaixamento do lençol freático para a lavra do minério.

5.3 Resultados da Eletorresistividade

Segundo Machado e Marchioretto (2016), no trabalho realizado nas barragens B-11 e B-12, as principais feições geoeletricas observadas nos perfis individuais foram assinaladas e sintetizadas nas legendas apresentadas no Imageamento Geoeletrico (Figura 12).

As feições anômalas foram mapeadas, delimitadas e interpretadas, exibindo a escala cromática das resistividades elétricas utilizadas (valores em Ohm.m).

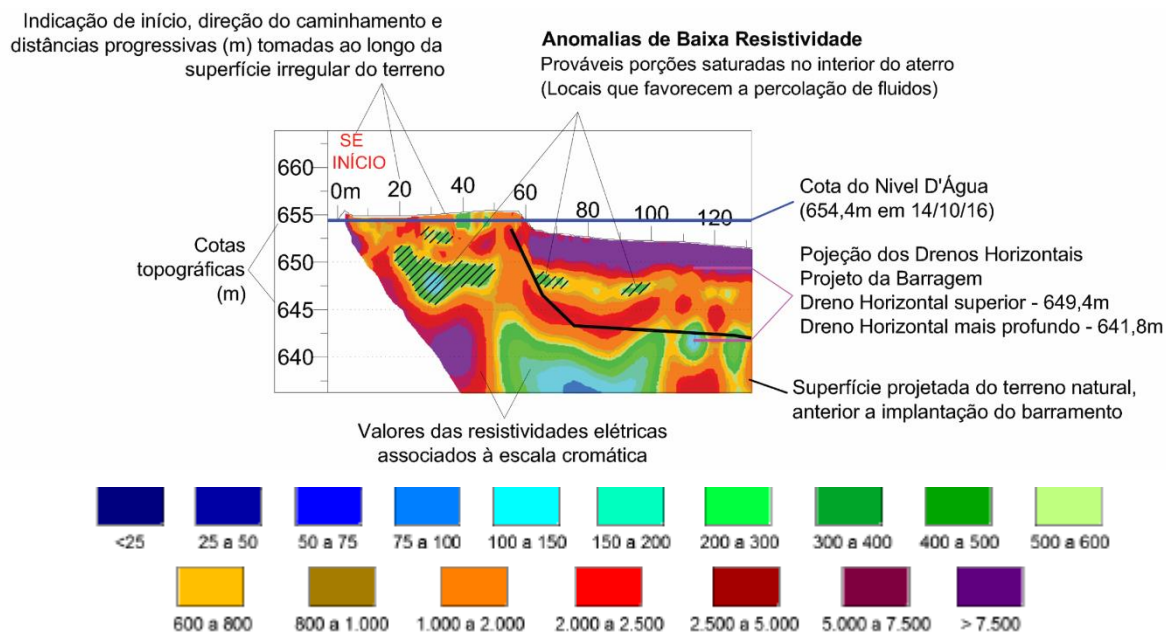
As cores frias, em tons de azul, são indicativas de zonas de mais baixa resistividade, com predomínio de áreas saturadas. As cores mais quentes indicam porções onde inexistente água.

Na Figura 12, as anomalias de baixos valores (tons de azul a verde) aparecem destacadas por hachuras na cor preta, representando as porções no interior do aterro dos barramentos que, muito provavelmente, estão saturadas.

As respostas geoeletricas foram muito parecidas entre as seções. Os valores mais altos (tons de vermelho/roxo) ocorrem nas porções superiores, mantendo-se até profundidades entre 10 e 15 m, abaixo das quais predominam valores menores (cores frias), que seguiram até as máximas profundidades amostradas, indicando a base da barragem. Interessante notar que, entre 3 e 5 m de profundidade (≈ 651 m L1 / ≈ 644 m L2), as duas seções mapearam um horizonte de ocorrências de baixos valores (<

500 Ohm.m - tons de azul claro a verde), em posições localizadas no interior do corpo do barramento, com anomalias geolétricas de baixa resistividade, que foram destacadas nas seções por hachuras na cor preta.

Figura 12 – Ilustração das seções de Imageamento Geolétrico



Fonte: Machado e Marchioreto (2016)

É provável que a presença de fluidos nos materiais seja a principal causa dos baixos valores, delimitando possíveis caminhos preferenciais à percolação dos fluidos ligados a níveis de diferentes compactações entre interfaces de alteamento. Na B-11, é possível notar que essa anomalia está na cota 651, na linha da crista, e na cota 644, na linha da berma, destacando a inclinação do talude do maciço anterior ao alteamento.

Na B-12 existe um filtro vertical construído fora do fundo, em cota intermediária (≈ 645 m L3), onde é possível identificar um fluxo de água vertical, indicando possível ponto de surgência (olho d'água), oriundo do lençol freático local, que é rebaixado para a extração do minério (≈ 636 m Progressiva 130 L3). Também é possível identificar na L4, entre as progressivas 80 e 110, a presença de umidade no contato entre a barragem e a pilha de estéril que apoia a B-12.

A Figura 13 exhibe os resultados das seções geofísicas em ambas as barragens.

Figura 13 – Ilustração das seções de Eletroresistividade, executadas nas barragens B-11 e B-12

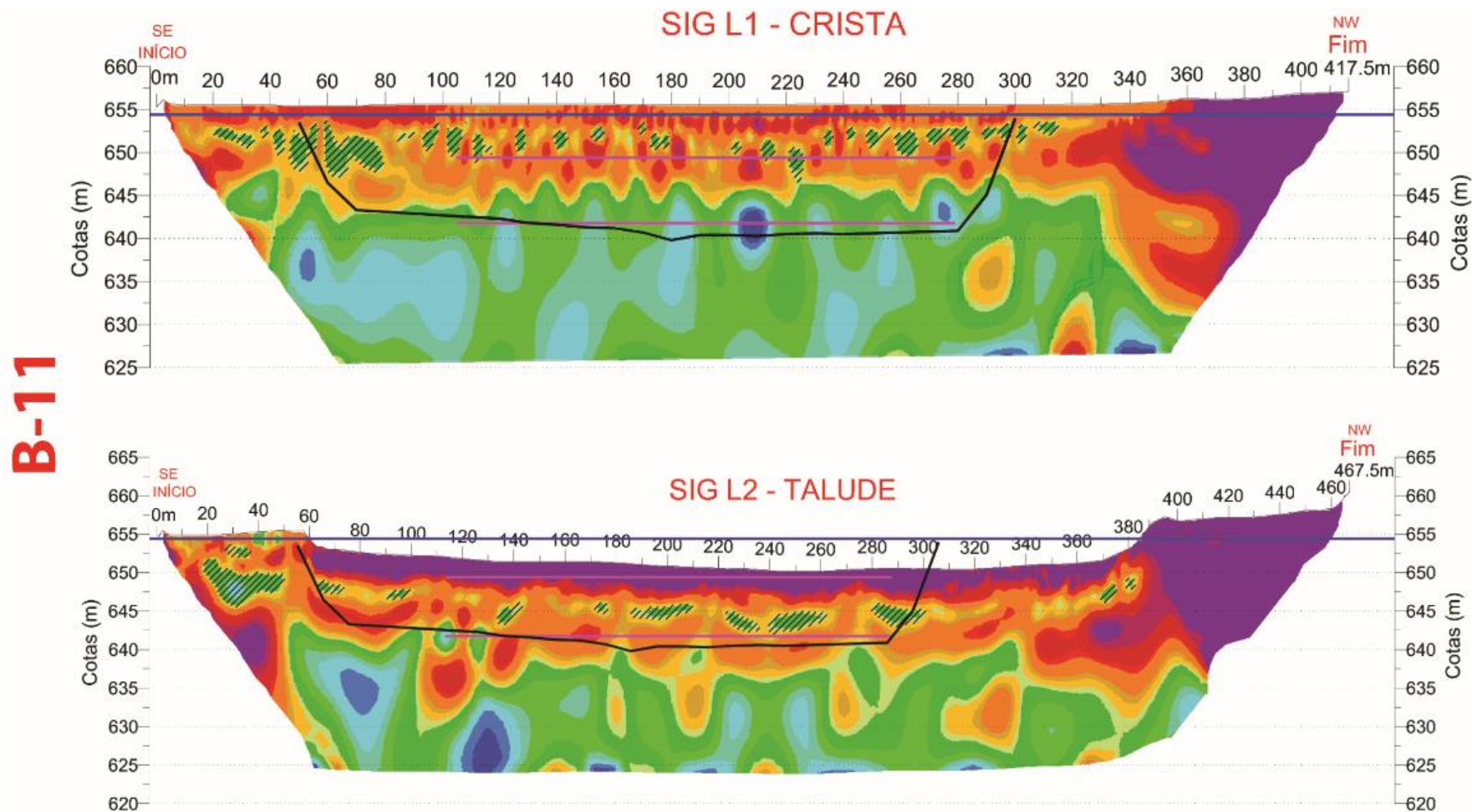
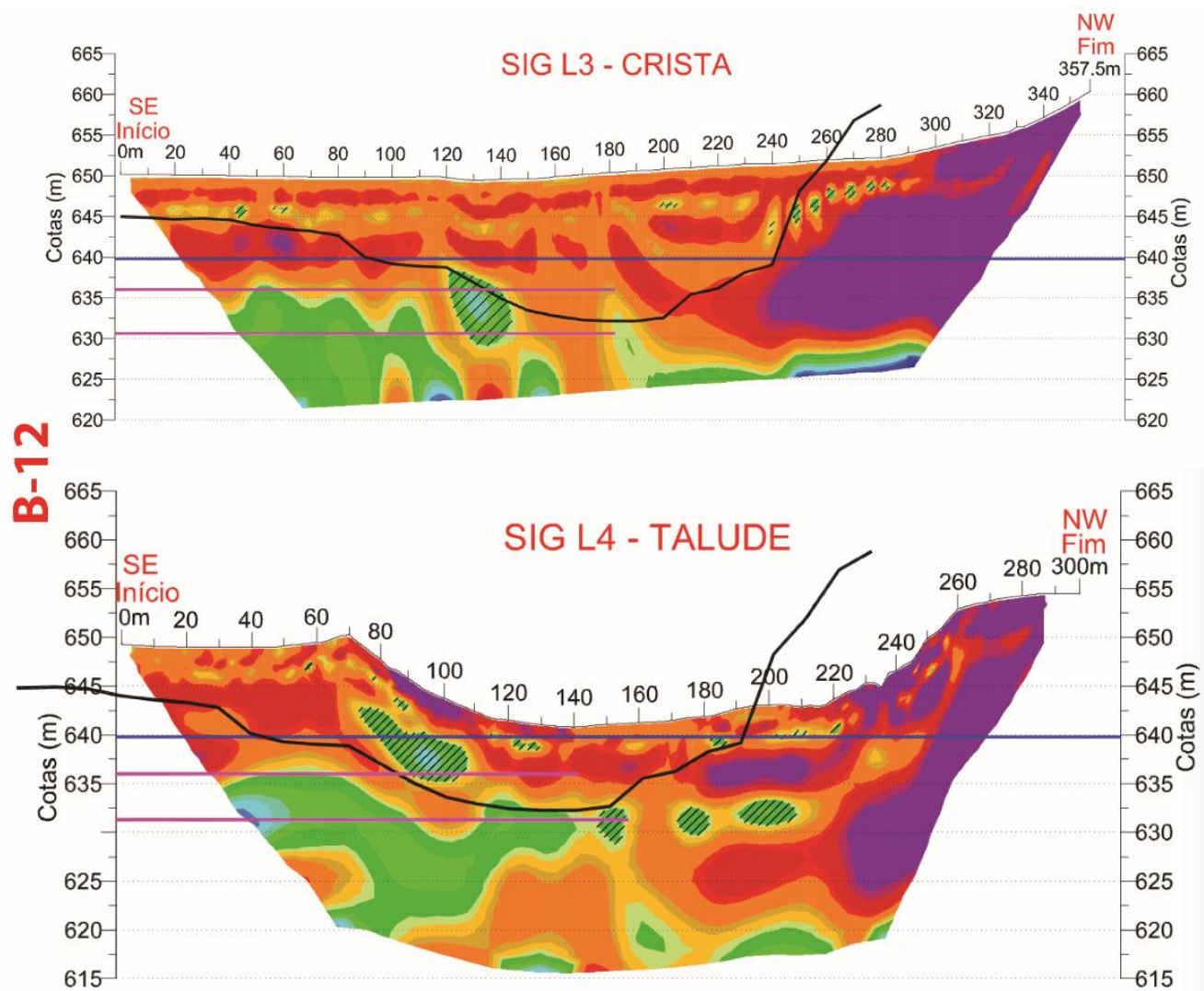


Figura 13 – Cont.



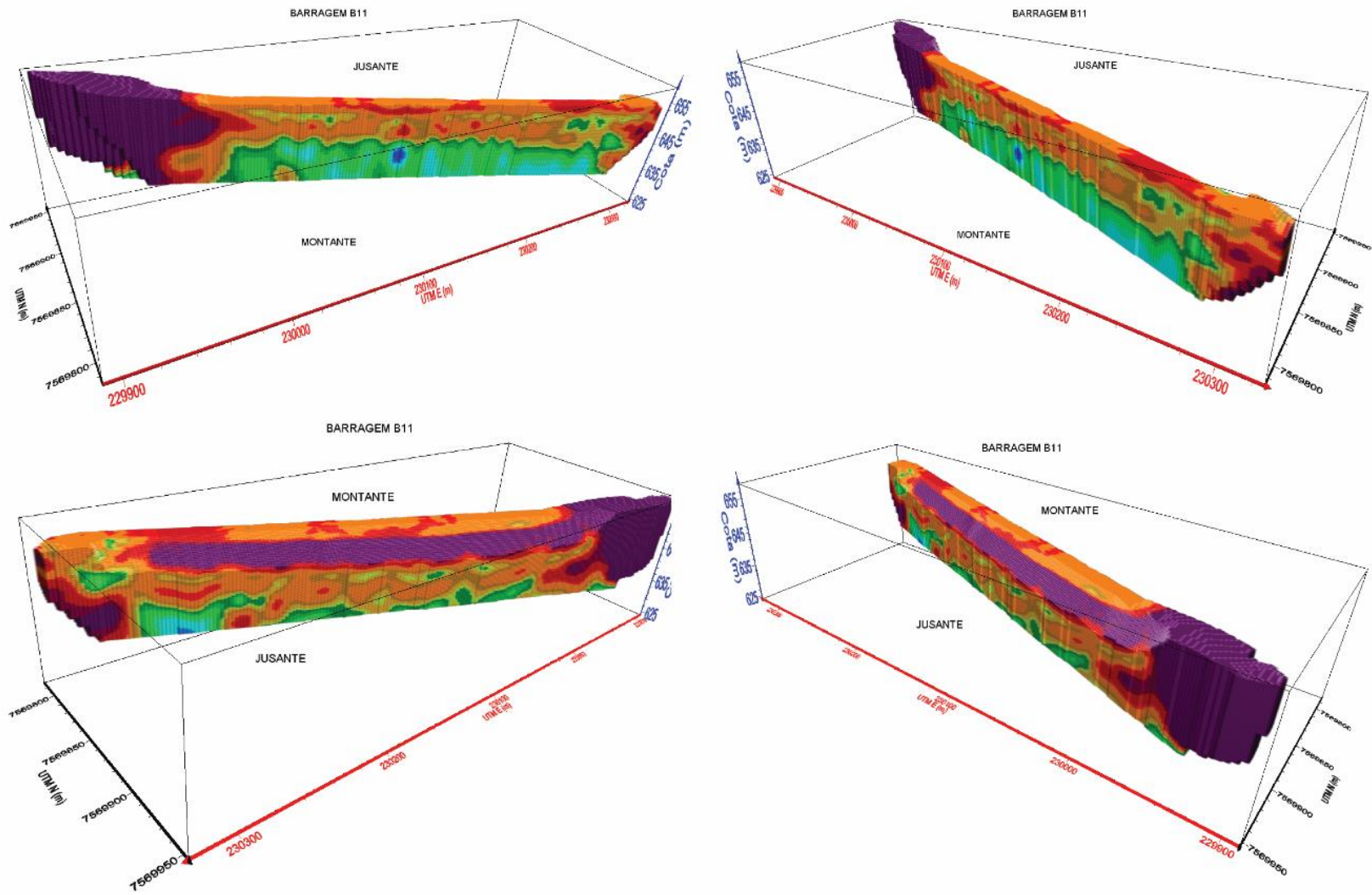
Fonte: Machado e Marchioreto (2016)

Além das visualizações 2D, foram gerados modelos e visualização em 3D por dados de eletrorresistividade, fornecendo mais recursos para a observação dos resultados obtidos pela extrapolação dos dados das seções 2D (interpolação 3D). Esse procedimento permitiu visualizar as anomalias de baixa resistividade e dimensioná-las em duas e três dimensões.

A visualização 3D possibilita demarcar as anomalias de baixos valores, delimitados por valores de resistividades até 500 Ohm.m, de forma a destacar todas as porções com prováveis percolações dos fluidos no interior do aterro (elevações entre 654 m até 643 m).

A Figura 14 apresenta algumas visualizações da junção de pixels das seções medidas (voxel) Volume + Pixel, compilado para a barragem B-11.

Figura 14 – Representação em 3D dos valores de eletroresistividade para a barragem B-11



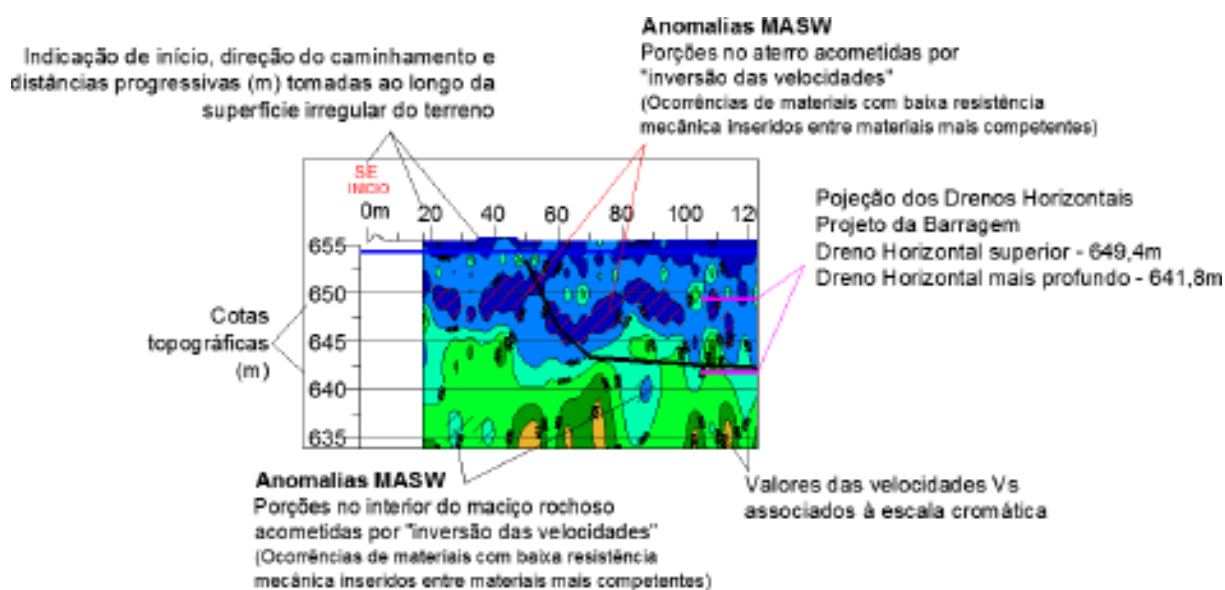
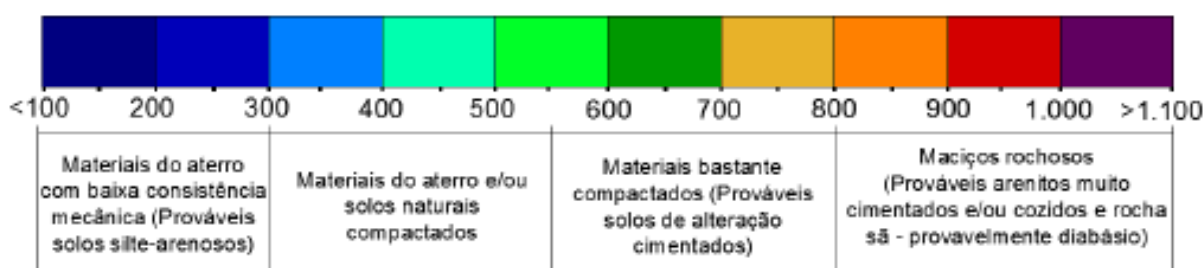
Fonte: Machado e Marchioretto (2016)

5.4 Resultados do MASW

As seções MASW foram realizadas nos mesmos alinhamentos geodésicos (L1 a L4) e foram construídas correlacionando os valores das velocidades V_s a uma escala cromática. Essas velocidades apresentam relação direta com a resistência mecânica dos materiais. Portanto, foi possível inferir a classificação geomecânica dos materiais da subsuperfície, em função das diferentes faixas de valores das velocidades V_s , conforme apresentado na Figura 15, além da legenda com a síntese das informações para as seções MASW.

Figura 15 – Escala cromática dos valores de velocidade V_s com a legenda apresentada para as seções MASW

ESCALA CROMÁTICA DOS VALORES DAS VELOCIDADES DA ONDA CISALHANTE (V_s - m/s)
E UMA PRIMEIRA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA EM FUNÇÃO DAS VELOCIDADES



Fonte: Machado e Marchioreto (2016)

Conforme observado e ilustrado na Figura 15, foram registradas duas feições de anomalias MASW: "inversão das velocidades", em camadas no interior do aterro

(hachuradas em vermelho), e anomalias mapeadas em profundidades maiores; e "inversão das velocidades" no interior dos maciços rochosos (hachuradas em preto), que representam ocorrências de materiais com baixa resistência mecânica e uma de alta acima das de baixa velocidade.

Detalhando as anomalias, pode-se afirmar que as de alta velocidade, quando aparecem nas camadas dos aterros (≈ 648 m L1; ≈ 645 m L2), representam ocorrências isoladas e alongadas em uma vizinhança com predomínio de valores menores, representando possível nível de alta compactação entre duas etapas de alteamento.

As anomalias de baixa (≈ 646 m L1; ≈ 642 m L2) no interior da barragem podem estar relacionadas com drenos horizontais ou materiais próximos à presença de água. Já as anomalias por "inversão das velocidades" de baixa, presentes nas duas barragens e assinaladas no interior dos maciços rochosos (hachuras em preto), correspondem ao mesmo tipo de feição sísmica, porém estão associadas a maiores profundidades, indicando possíveis pontos de surgência da água do lençol freático. São anomalias importantes, visto que foram mapeadas em grandes profundidades (20 a 30 m), próximas às fundações das barragens.

Na Figura 16 são apresentados os dados do levantamento do MASW e as anomalias de velocidade de Vs.

Figura 16 – Perfis de resultados de MASW nas barragens B-11 e B-12

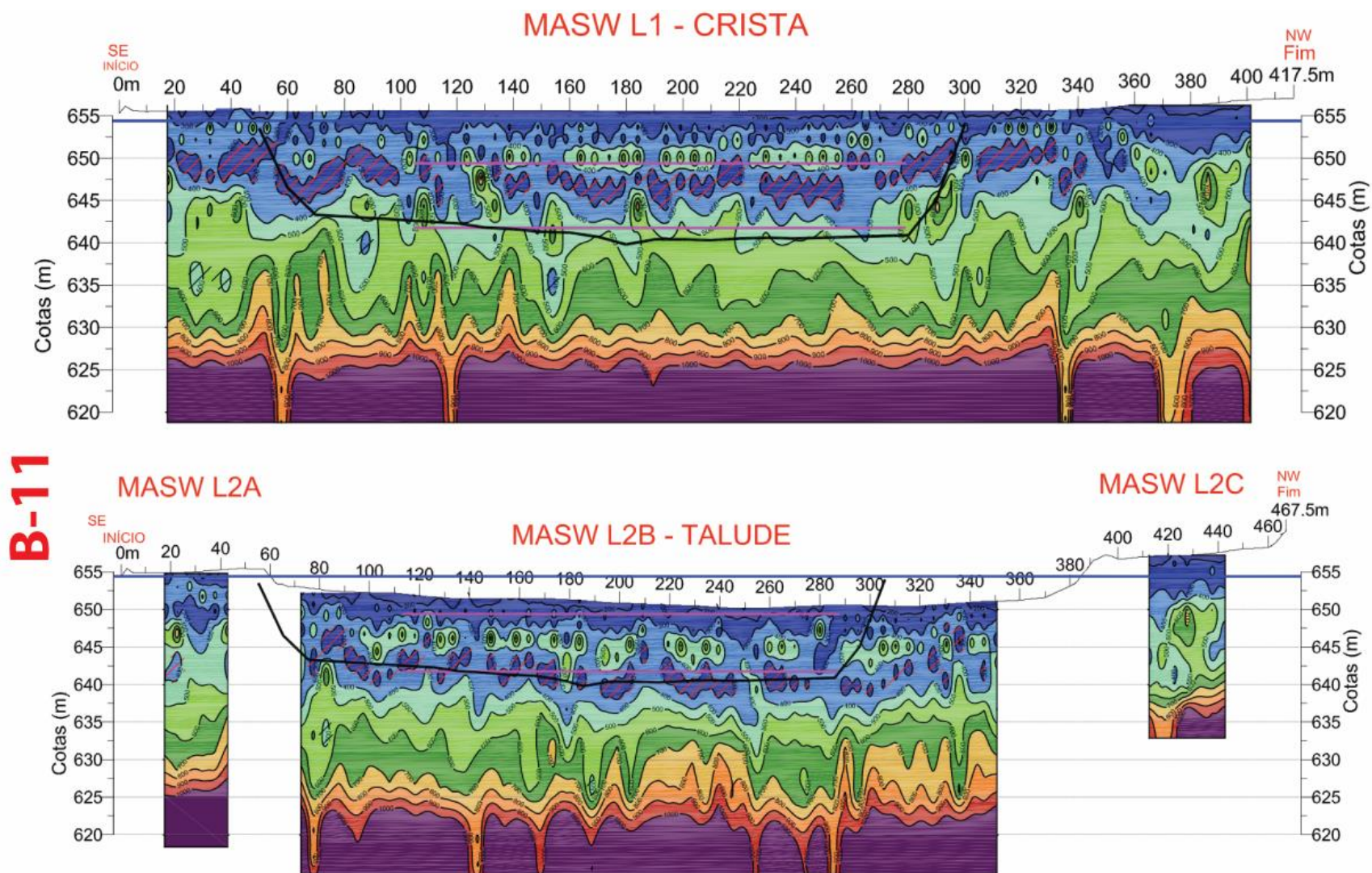
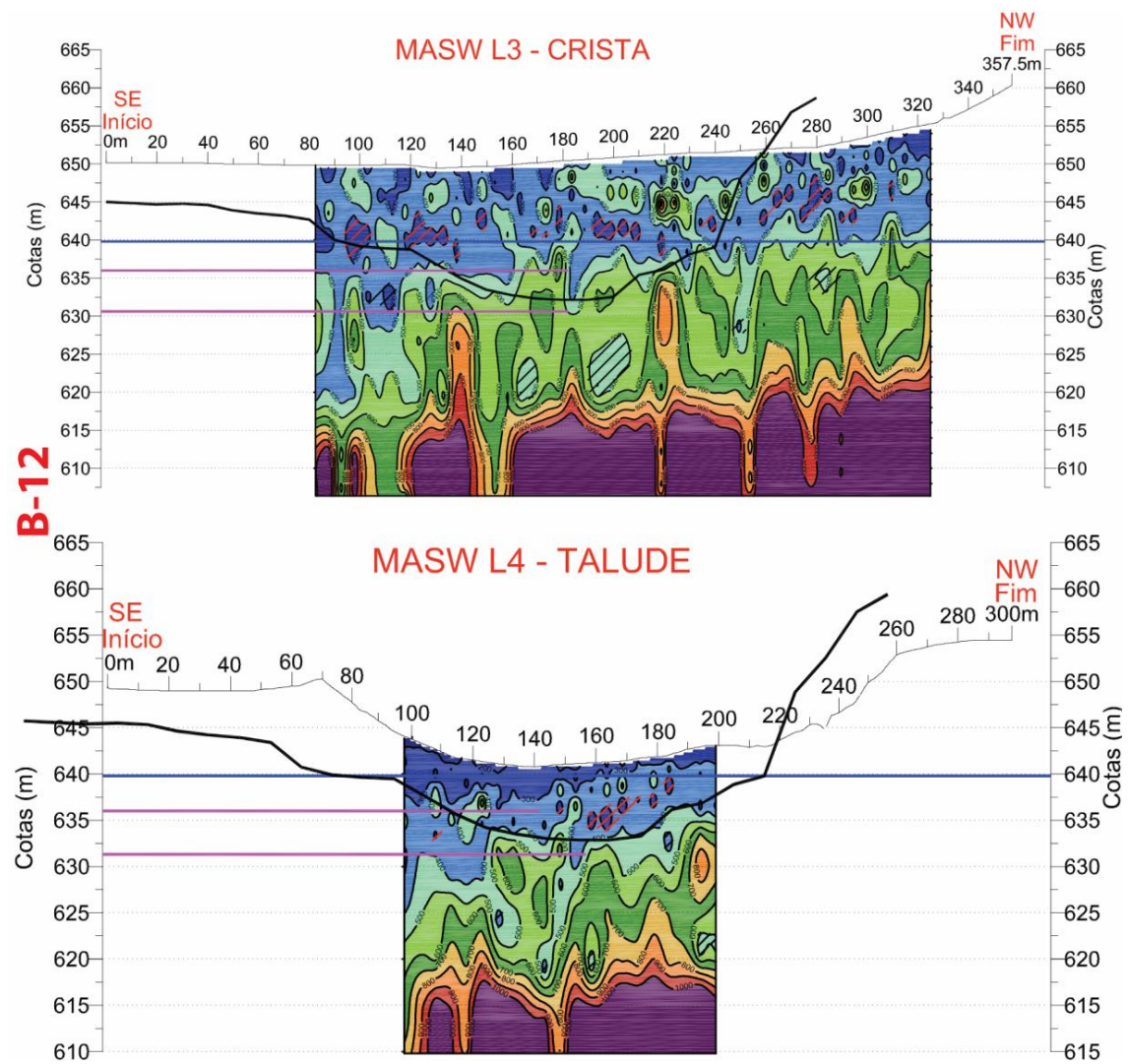
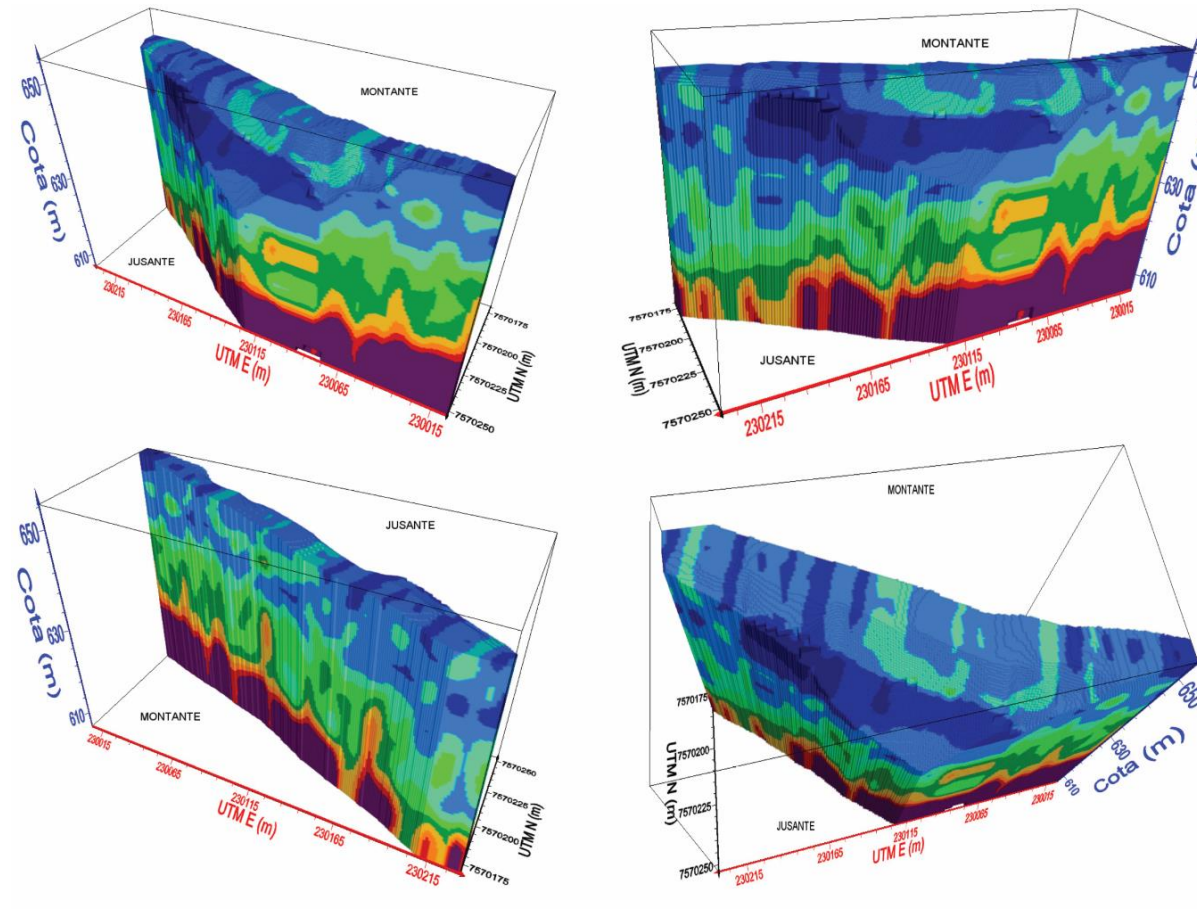


Figura 16 – Cont.



Assim como na eletrorresistividade, foram gerados blocos 3D, para melhor visualização e entendimento das camadas de ondas, como mostrado na Figura 17. Essas apresentações 3D permitem identificar as dimensões das anomalias.

Figura 17 – Visualização 3D das velocidades V_s



Fonte: Machado e Marchioreto (2016)

5.5 Integração dos Resultados de Geofísica

Analisando separadamente cada método geofísico, é possível identificar algumas anomalias, como presença de água no maciço ou solos moles.

Os resultados obtidos nos levantamentos permitiram a integração entre essas duas técnicas e o maior entendimento das anomalias, visto que aquelas de baixa resistividade elétrica, oriundas do fluxo dos fluidos, podem ser total ou parcialmente responsáveis pelas ocorrências das anomalias MASW de baixa resistência mecânica.

As anomalias geoeletricas de baixa resistividade (hachuras vermelhas) e MASW de “inversão da velocidade” para baixa resistência (hachuras pretas), foram delimitadas e integradas em perfis (Figura 18), possibilitando visualizar as intersecções entre as áreas de influências das anomalias geofísicas e destacar as porções prioritárias (alvos) em subsuperfície, para a execução de estudos geotécnicos mais detalhados (Sondagem e SPT).

Existem pontos de baixa resistência mecânica que não apresentam umidade. Portanto, nem sempre as anomalias são exatamente no mesmo local, indicando que porções com média ou baixa compactação podem estar secas (≈ 640 m da B-12 – filtro horizontal seco no meio da barragem), mas sempre são pontos de atenção em monitoramentos. Apesar disso, é nítido outros locais onde as anomalias de baixa resistência possuem umidade e esses foram os alvos da investigação direta.

É notória também a existência de camadas mais resistivas mecanicamente, como na cota ≈ 648 m L1, que são sobrepostas por camadas de baixa resistividade e coincidentes com anomalias geoeletricas, mostrando a existência de superfícies de contato construtivo ou, como na B-12, a existência de superfície de contato entre a fundação, o maciço construído e a pilha de estéril a jusante da barragem.

Os locais das intersecções foram projetados para a superfície e estão representados por barras na cor preta. Além dessas posições, foram destacadas também as anomalias MASW mais profundas (retângulos com hachuras em vermelho), que foram mapeadas no interior dos maciços.

Figura 18 – Integração das informações do mapeamento geofísico, destacando as porções de subsuperfície na área dos barramentos, com anomalias de Imageamento Geoelétrico (hachuras em vermelho) e anomalias MASW (hachuras em preto), nas barragens B-11 e B-12.

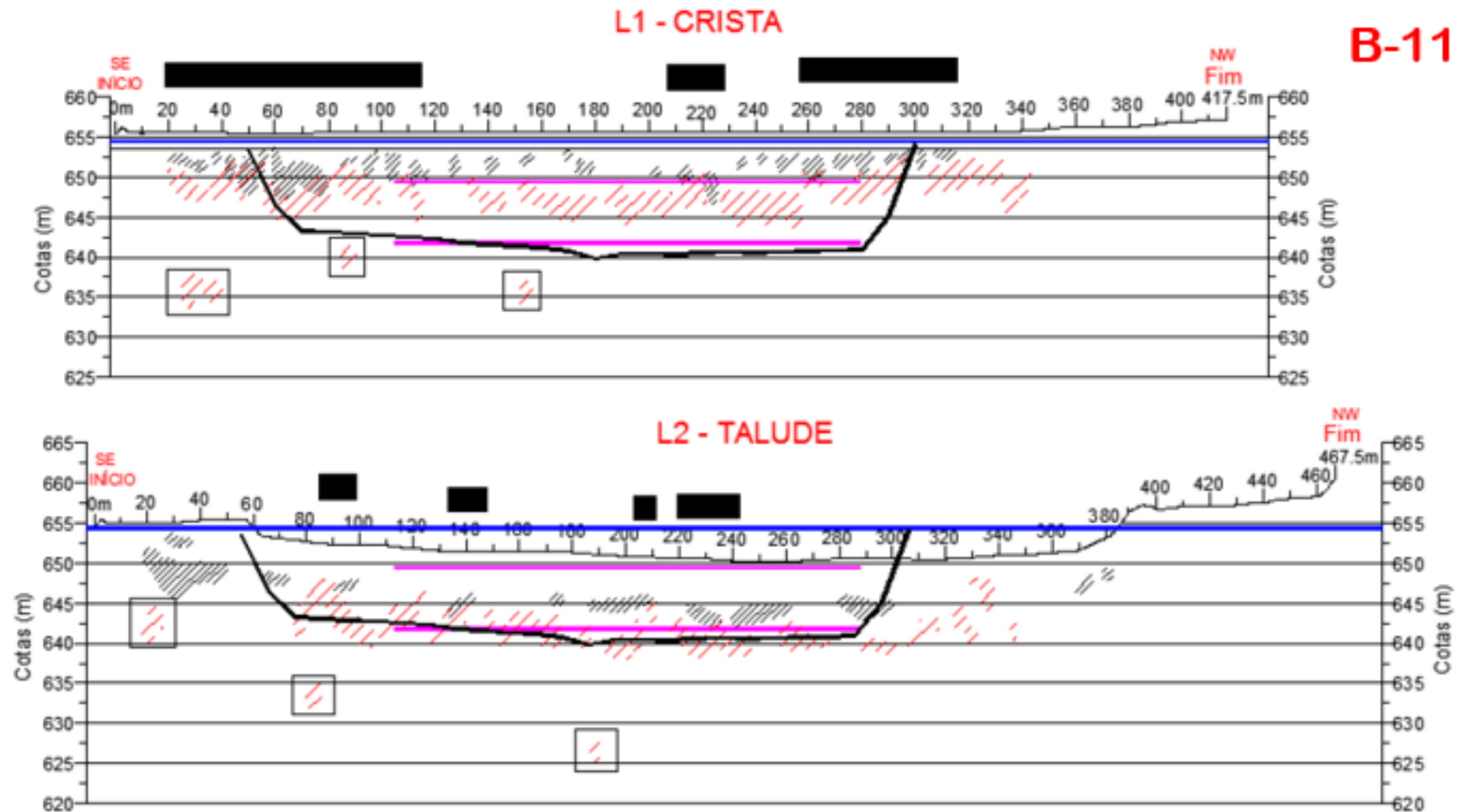
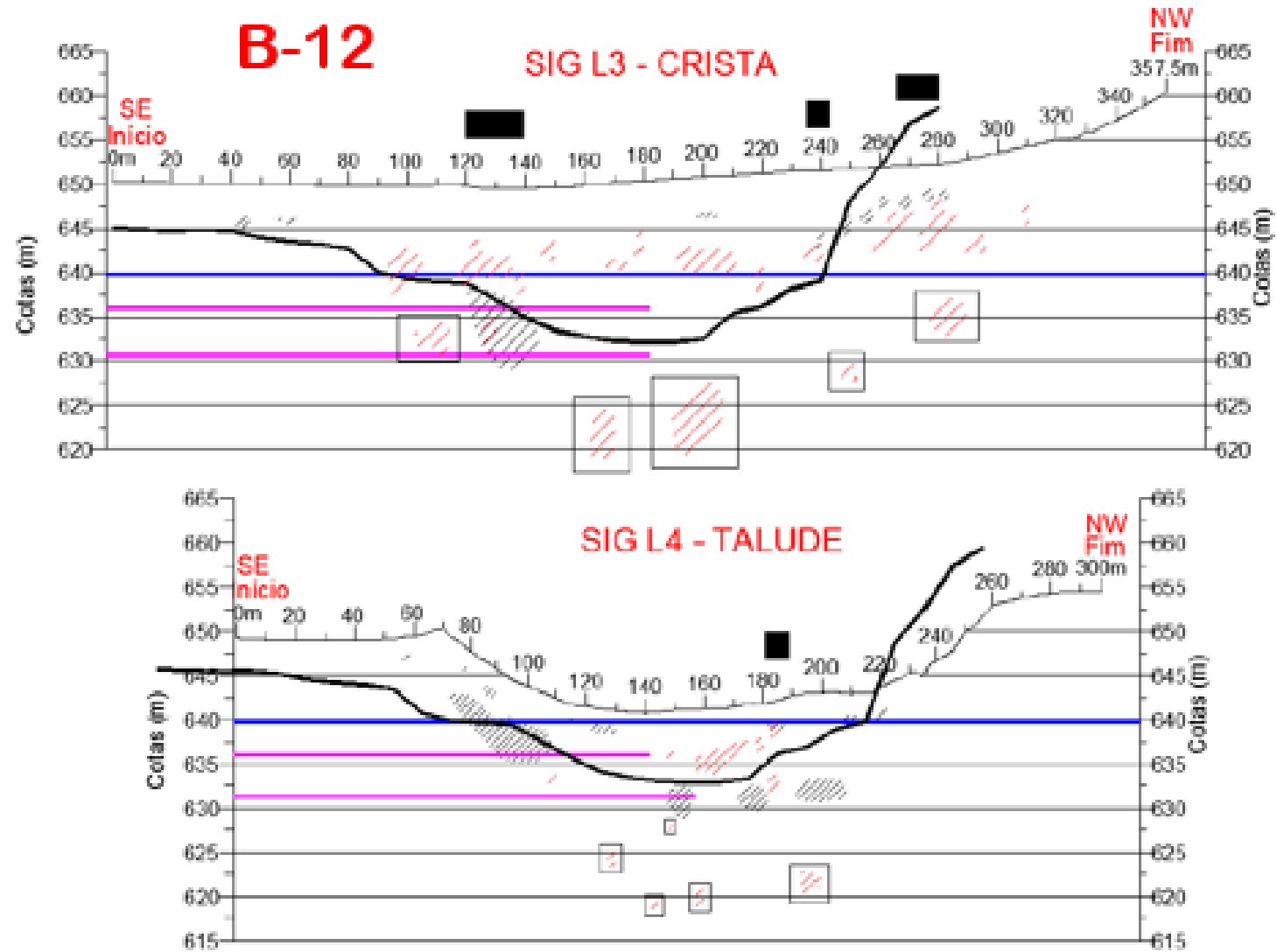


Figura 18 – Cont.



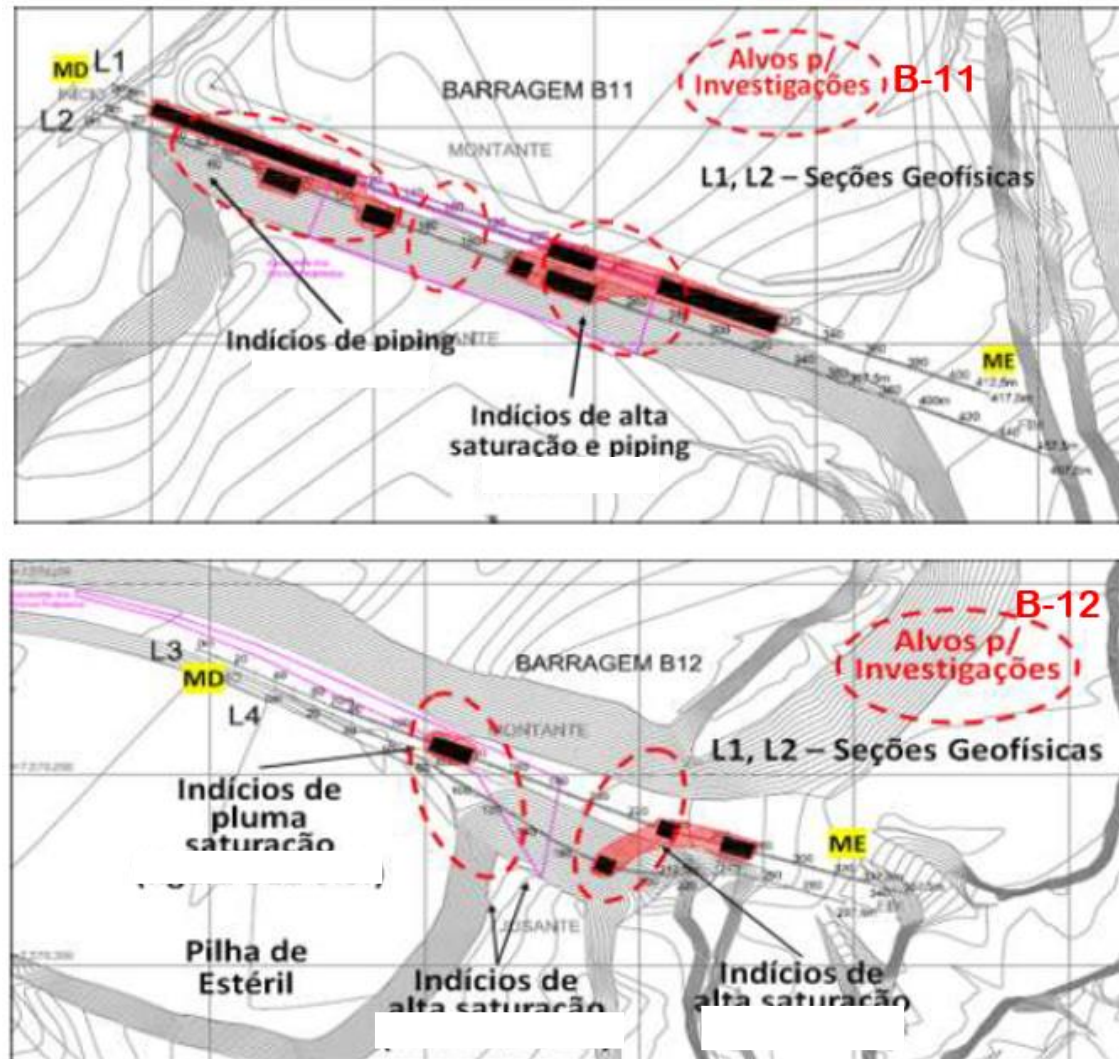
Fonte: Machado e Marchioreto (2016)

5.6 Resultados das Investigações Diretas

Em reunião conjunta entre Coppedê (2018) e os prestadores de serviço e equipe especializada da Mineração, incluindo o autor deste trabalho, foi decidido por utilizar as interpretações de geofísica, principalmente a integrada, e proposta a locação das sondagens diretas de investigação, para confirmação das anomalias encontradas.

A Figura 19 apresenta a integração das anomalias refletidas na superfície com a localização das sondagens.

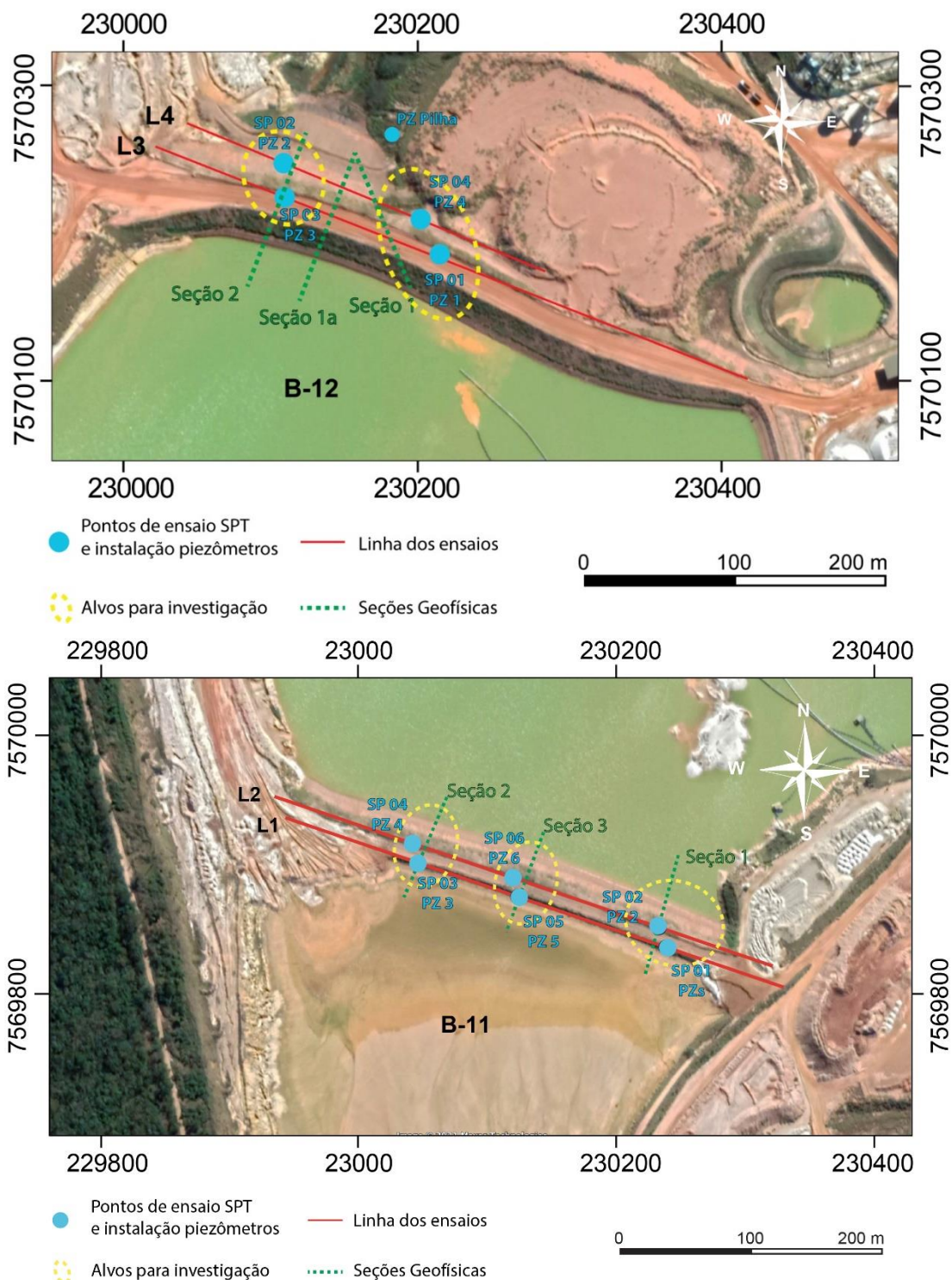
Figura 19 – Indicação de “alvos para investigações” das informações geofísicas, em plantas-sínteses nas barragens B-11 e B-12



Fonte: Coppedê (2018)

A Figura 20 refere-se ao posicionamento dos furos de sondagem, dos pontos referentes aos ensaios de SPT e dos piezômetros, cuja localização só foi possível após interpretação da geofísica.

Figura 20 – Localização dos furos de sondagem e execução dos ensaios de SPT e instalação de piezômetros, nas barragens B-11 e B-12



Fonte: elaborado pelo autor

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios de SPT, os quais permitiram reconstituir, de forma pontual, o comportamento do maciço no momento da sondagem.

Tabela 3 – Resultados da sondagem SPT na barragem B-11

B-11	SP-01			SP-02			SP-03			SP-04			SP-05			SP-06		
	Golpes / Penetração			Golpes / Penetração			Golpes / Penetração			Golpes / Penetração			Golpes / Penetração			Golpes / Penetração		
Profundidade inicial (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
1	4/15	2/15	4/15	2/15	6/15	2/15	2/15	6/15	3/15	31/15	21/15	2/15	3/17	6/15	31/15	1/15	1/15	3/15
2	2/15	3/15	3/15	1/15	3/15	2/15	2/15	2/15	2/15	4/15	3/15	4/15	4/15	21/15	21/15	1/15	1/15	5/15
3	1/15	4/15	2/15	1/15	2/15	2/15	4/15	6/15	4/15	2/15	5/15	6/15	3/15	3/15	6/15	5/15	5/15	7/15
4	2/15	3/15	4/15	4/15	8/15	5/15	2/15	6/15	5/15	7/15	11/15	11/15	5/15	4/15	4/15	5/15	7/15	8/15
5	4/15	4/15	5/15	4/15	11/15	13/15	1/15	2/15	4/15	7/15	10/15	7/15	2/15	6/15	6/15	8/15	11/15	16/15
6	7/15	12/14	20/15	7/15	16/15	26/15	6/15	9/15	15/15	11/15	11/15	15/15	4/15	7/15	11/15	10/15	16/15	17/15
7	9/15	10/15	14/15	11/15	22/15	10/3	51/15	10/15	19/15	8/15	5/15	5/15	12/15	22/13		10/15	22/15	10/5
8	1/15	8/15	8/15	12/15	26/15	10/3	11/15	14/15	16/15	9/15	10/15	15/15	10/15	7/15	7/15	11/15	25/15	10/3
9	3/15	4/15	5/15	7/15	30/15	10/3	7/15	15/12	-	2/15	7/15	10/15	13/15	17/15	19/15	13/15	30/13	-
10	2/15	2/15	2/15	6/15	11/15	14/15	8/15	15/13	-	6/15	51/15	4/15	7/15	8/15	5/15	3/15	7/15	6/15
11	1/15	2/15	3/15	4/15	6/15	11/15	6/15	11/15	10/15	2/15	3/15	5/15	2/15	3/15	2/15	11/15	30/8	-
12	1/15	2/15	2/15	4/15	22/15	20/15	1/20	2/10	2/15	10/15	9/15	5/15	1/15	5/15	7/15		-	-
13	1/15	1/15	1/15	30/15	30/15	-	2/15	5/17	4/13	4/15	1/15	1/15	2/15	6/15	4/15		-	-
14	7/15	17/15	-	-	-	-	3/20	4/10	5/15	-	-	-	4/15	5/15	6/15		-	-
15	-	-	-	-	-	-	3/15	6/15	13/15	-	-	-	3/15	6/15	10/15		-	-

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4 – Resultados da sondagem SPT na barragem B-12

B-12	SP-01			SP-02			SP-03			SP-04		
	Golpes / Penetração			Golpes / Penetração			Golpes / Penetração			Golpes / Penetração		
Profundidade inicial (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
1	4/15	8/15	8/15	3/15	11/15	8/15	22/15	19/15	13/15	8/15	8/15	8/15
2	6/15	10/15	12/15	7/15	9/15	6/15	6/15	12/15	16/15	3/15	6/15	4/15
3	8/15	11/15	12/15	3/15	5/15	7/15	5/15	11/15	11/15	3/15	3/15	6/15
4	6/15	10/15	11/15	4/15	7/15	4/15	7/15	12/15	14/15	1/15	1/15	1/15
5	5/15	10/15	15/15	7/15	8/15	9/15	7/15	10/15	10/15	5/15	9/15	7/15
6	7/15	9/15	7/15	7/15	7/15	5/15	4/15	9/15	9/15	6/15	8/15	6/15
7	6/15	6/15	7/15	4/15	30/9	-	5/15	10/15	11/15	2/15	2/15	3/15
8	6/15	8/15	8/15	-	-	-	10/15	12/15	11/15	2/15	2/15	1/15
9	7/15	5/15	8/15	-	-	-	6/15	10/15	14/15	1/15	11/15	1/15
10	7/15	4/15	15/15	-	-	-	8/15	9/15	11/15	2/15	1/15	1/15
11	5/15	10/15	8/15	-	-	-	6/15	7/15	8/15	1/15	1/15	1/15
12	4/15	8/15	12/15	-	-	-	6/15	4/15	3/15	2/15	30/17	-
13	7/15	8/15	7/15	-	-	-	4/15	12/15	13/15	-	-	-
14	2/19	2/18	2/18	-	-	-	5/15	15/15	10/15	-	-	-
15	1/45	-	-	-	-	-	15/17	-	-	-	-	-
16	2/15	2/15	2/15	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor

5.7 Integração dos Resultados Diretos e Indiretos

Na aplicação da metodologia de Tratamento Digital dos Dados Geotécnicos, foram avaliados os resultados obtidos com os serviços de investigações nas áreas-alvo.

Essa avaliação integrada possibilitou estabelecer uma correlação entre os resultados de SPT, resistividade, resistência e, assim, identificar diferentes unidades geotécnicas. Essa integração também possibilitou a identificação de diferentes etapas de construção dessas barragens e seus respectivos filtros, assim como o limite entre a fundação, que é de arenito da Formação Piramboia, e o aterro compactado.

Algumas discrepâncias em pontos isolados entre os resultados da geofísica e os ensaios de SPT e sondagem referem-se a pontos de baixa resistência, mas com altos valores de SPT, devido a cascalhos de antigas pistas de trânsito de veículos e/ou má seleção na área de empréstimo do material da construção. A grande maioria das anomalias geofísicas foi confirmada pela sondagem direta.

A interpretação das seções foi realizada de forma geral e não pontos isolados. Dessa forma, as sondagens foram úteis para balizar os resultados encontrados na geofísica, mas a interpretação foi analisada como um todo.

A seguir, é apresentado o Quadro 2, com a interpretação pontual das sondagens frente aos resultados da geofísica que norteiam a interpretação.

Quadro 2 – Interpretação pontual das sondagens frente aos resultados da geofísica que norteiam a interpretação

Linha	Progressiva	Anomalia Resistividade	Anomalia Resistência MASW	SPT	Interpretação	Observação
LL1	80	Início muito seco com gradação a úmido no final do furo e presença de água na fundação	Iniciando com baixas resistividades, mostra pequena inversão em 650 metros, com valores mais resistentes próximo e dentro da fundação	Baixo (média de 8) até 650 metros, passando por uma camada mais resistiva até 647 metros, voltando a ficar muito baixo próximo à fundação	As mudanças de resistividade indicam o contato dos alteamentos com material muito compactado na superfície de contato e uma antiga rampa de construção da barragem no contato com a fundação	Valores de SPT mais elevados que os valores Masw devido a presença de cascalhos presentes no contato da barragem com o alteamento (identificado na sondagem por <i>Hollow</i>)
L L1	160	Início muito seco com gradação a úmido no final do furo e presença de água na fundação	Evidência nítida de inversão em 650 metros, retorno a níveis mais baixos e subindo novamente próximo à fundação	Baixo (média de 8) até 650 metros, passando por uma camada mais resistiva até 647 metros, voltando a ficar baixo próximo à fundação	As mudanças de resistividade indicam o contato dos alteamentos com material muito compactado na superfície de contato e uma antiga rampa de construção da barragem no contato com a fundação	Valores de Masw refletem bem a sondagem SPT e a resistividade não indica pontos de umidade no meio da barragem, apenas próximo a fundação (aquífero)
L L1	245	Início muito seco com gradação a úmido no final do furo, e presença de água na fundação	Evidência nítida de inversão em 650 metros, retorno a níveis mais baixos e subindo novamente próximo à fundação	Baixo (média de 8) até 650 metros, passando por uma camada mais resistiva até 647 metros, voltando a ficar baixo próximo à fundação	As mudanças de resistividade indicam o contato dos alteamentos com material muito compactado na superfície de contato e uma antiga rampa de construção da barragem no contato com a fundação	Valores de Masw refletem bem a sondagem SPT e a resistividade não indica pontos de umidade no meio da barragem, apenas próximo a fundação (aquífero)
L L2	90	Gradação de seco na superfície, para úmido no fundo e uma camada anômala de baixa resistividade em 647 metros	Anomalia mais resistente em 645 metros	Aumento de resistência à penetração com a profundidade, até 642 metros, onde se observa uma queda abrupta	Aumento da resistência, conforme a mudança das fases de alteamento da B-11 até a entrada no filtro horizontal na cota 642 metros	Presença de seixos e camada muito compactadas frente ao SPT de 643 metros até 646 metros
L2	165	Gradação de seco na superfície para úmido no fundo e na fundação	Anomalia mais resistente em 645 metros	Aumento de resistência a penetração com a profundidade, até 642 metros, onde se observa uma queda abrupta	Aumento da resistência, conforme a mudança das fases de alteamento da B-11 até a entrada no filtro horizontal na cota 642 metros	Anomalia entre os resultados do Masw com os de SPT

Linha	Progressiva	Anomalia Resistividade	Anomalia Resistência MASW	SPT	Interpretação	Observação
L2	250	Gradação de seco na superfície para úmido no fundo e uma camada anômala de baixa resistividade em 647 metros	Anomalia mais resistente em 645 metros	Aumento de resistência a penetração com a profundidade, até 642 metros, onde se observa uma queda abrupta	Aumento da resistência, conforme a mudança das fases de alteamento da B-11 até a entrada no filtro horizontal na cota 642 metros	Anomalia entre os resultados do Masw com os de SPT
L3	130	Predomínio de material seco com leve tendência de umidade na cota 640 metros e material com água na base da barragem	Perfil com média resistência com anomalias de baixa resistência na cota 640 metros e na base da barragem	Pontualmente baixo na cota 640 metros e na base da barragem	Filtro horizontal no meio da barragem e base com fluxo de água de baixo (lençol freático) para o filtro de base	Anomalias de eletrorresistividade e resistência refletem bem os resultados da sondagem direta
L3	210	Material seco em todo perfil	Perfil com média resistência com anomalias de baixa resistência na cota 640 metros	Pontualmente baixo na cota 640 metros	Existência de um dreno horizontal na cota 640 metros	Anomalias de eletrorresistividade e resistência refletem bem os resultados da sondagem direta
L4	105	Anomalia de baixa resistividade na cota 640 metros e na base	Anomalia de baixa resistividade na cota 640 metros e muito baixa na base	Perfil de baixa resistência à penetração com ponto muito baixo na cota 640 metros e no contato com a fundação	Existência de um dreno horizontal na cota 640 metros e um filtro de contato entre a barragem e a pilha de estéril a jusante	O filtro horizontal da cota 640 metros está seco, mas é percebido no perfil Masw, já o dreno lateral de contato, além de ser percebido no perfil Masw, ainda tem indícios de água no perfil elétrico
L4	178	Anomalia de baixa resistividade na cota 640 metros	Anomalia de baixa resistência na cota 640 metros	Pontualmente baixo na cota 640 metros e impenetrável na base da barragem	Existência de um dreno horizontal na cota 640 metros	O filtro horizontal da cota 640 metros está seco. mas é percebido no perfil Masw

Fonte: elaborado pelo autor

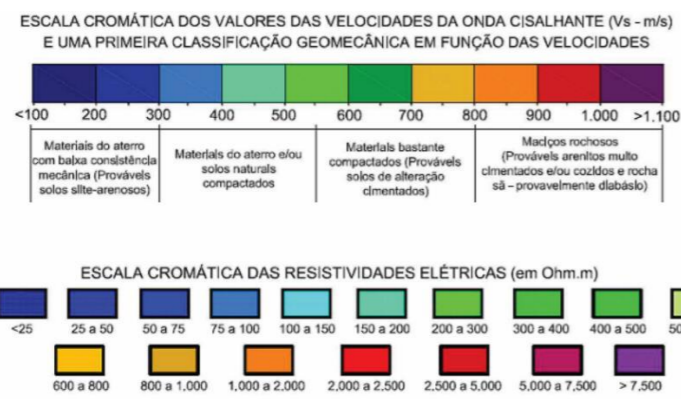
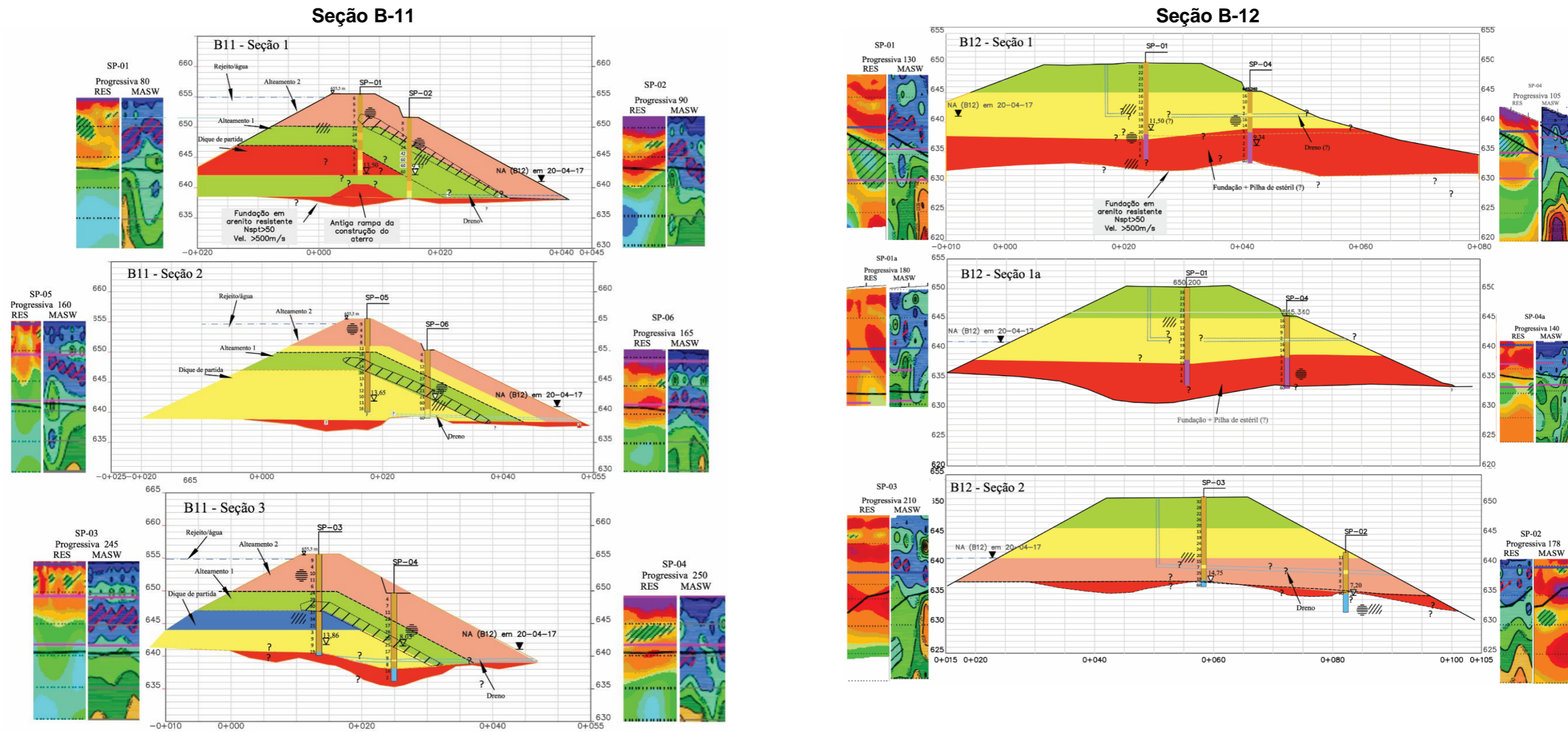
Com todas essas informações, foi possível criar seções geotécnicas transversais e longitudinais ao eixo das barragens, extrapolando, assim, lateralmente, as informações entre cada seção, usando como guia as seções geofísicas a ponto de reconstituir a situação do aterro das barragens no momento das investigações e possíveis pontos de atenção.

Os pontos de sondagem foram fundamentais para equiparar os resultados obtidos e interpretar os resultados da geofísica. Apesar disso, os resultados podem sofrer algumas variações pontuais, tanto no sentido de exatidão no ponto de mudança, quanto na continuidade de camadas, devido ao fato de a amostragem geofísica ser por pontos e interpretação matemática entre eles. Um exemplo pode ser observado na L3 e na L4 B-12, onde foi interpretado um filtro horizontal na cota 640 metros, que aparecem descontinuados nos perfis, devido à interferência de vários pontos vizinhos. O mesmo acontece na B-11, onde as anomalias estão condicionadas pelos dois alteamentos com superfícies de diferentes compactações e horizontes com pedregulhos, mas registram descontinuidades nos perfis geofísicos, em função da interpretação de pontos.

Deve-se também considerar que os resultados da resistência à penetração (SPT) podem ter resultados alterados pela presença de materiais mais grosseiros, como seixos, em meio à matriz de empréstimo, ou mesmo, de antigas estradas sobre as divisas das fases de alteamento.

Nesse sentido, foram elaboradas Seções Geotécnicas Transversais, ligando os furos de sondagem da crista e de jusante, e Seções Geotécnicas Longitudinais sob as linhas de geofísica, conforme apresentado nas Figuras 21 a 23.

Figura 21 – Seções geotécnicas transversais da barragem B-11 e B-12



LEGENDA SONDAENS

- Areia fina siltosa marrom - Aterro
- Areia media a grossa, siltosa, c/pedregulhos marrom - Aterro/Drenos(?)
- Areia media a grossa, siltosa, amarela a marrom - Drenos
- Areia media a grossa, siltosa com pedregulhos amarela a marrom
- Areia fina a média, siltosa com pedregulhos, marrom amarelada.
- Anomalia de eletroresistividade
- Anomalia de velocidade sísmica
- Anomalia combinada sísmica e resistividade
- Zona de influência da anomalia

SP-04 Estaca 250 RES MASW

Setorização -Nspt

- < 4
- 4 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- > 30

Recorte das seções de imageamento eletroresistivo e sísmica (MASW) na (MASW) posição de interseção entre a linha geofísica e a posição das sondagens, com indicação das estacas das linhas geofísicas e número da sondagens

Fonte: Mio apud Coppedê (2018)

Figura 22 – Seções longitudinais da barragem B-11 sob as linhas de geofísica

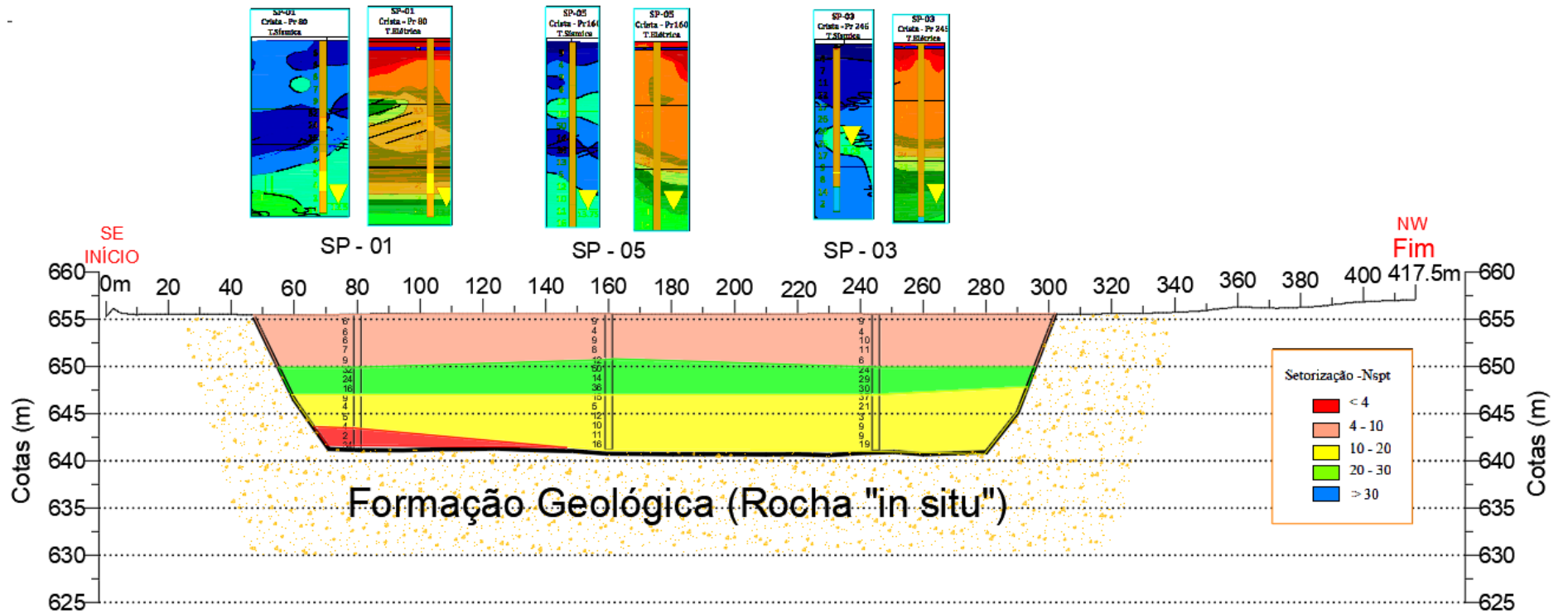
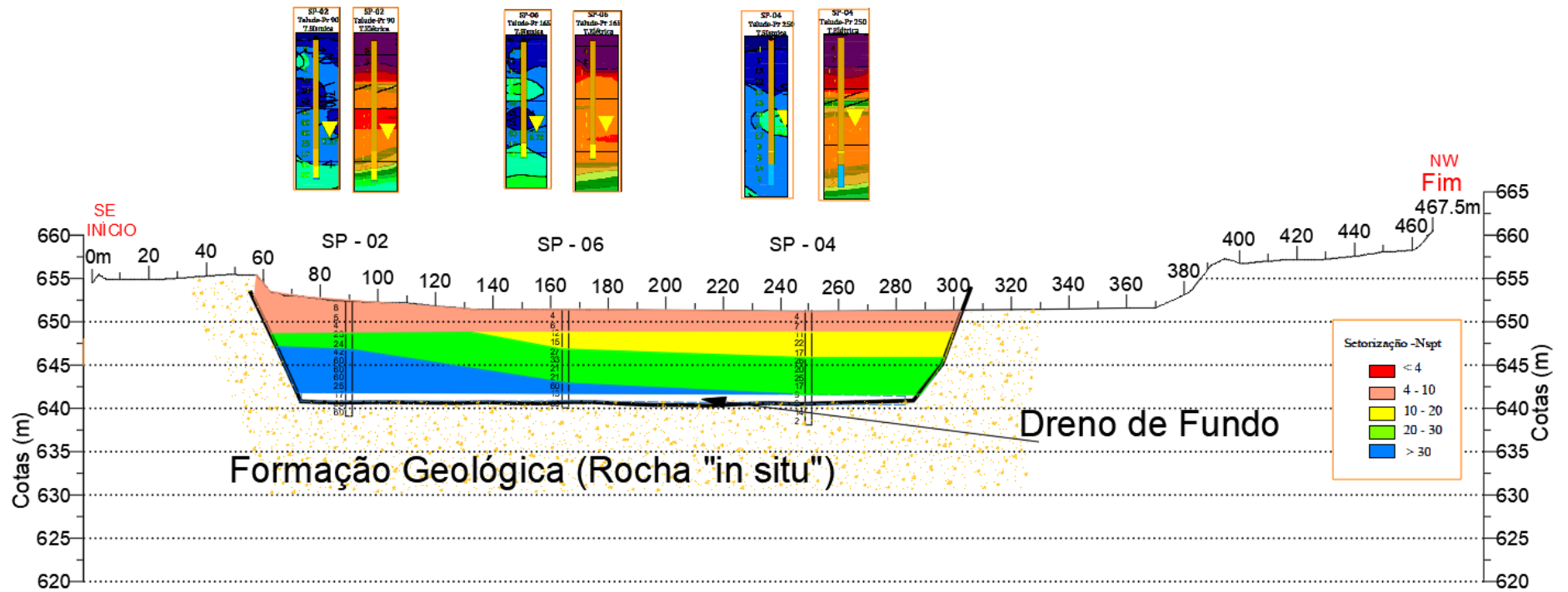
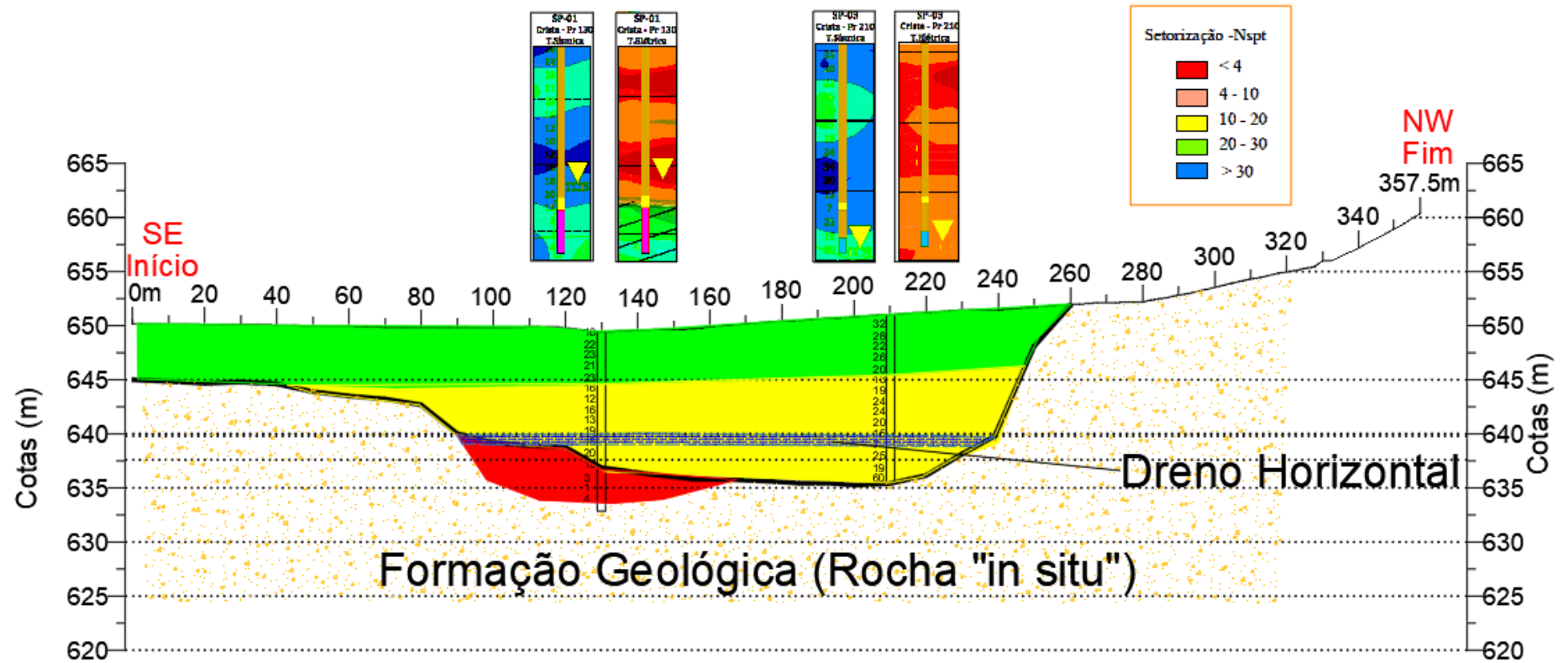


Figura 22 – Cont.



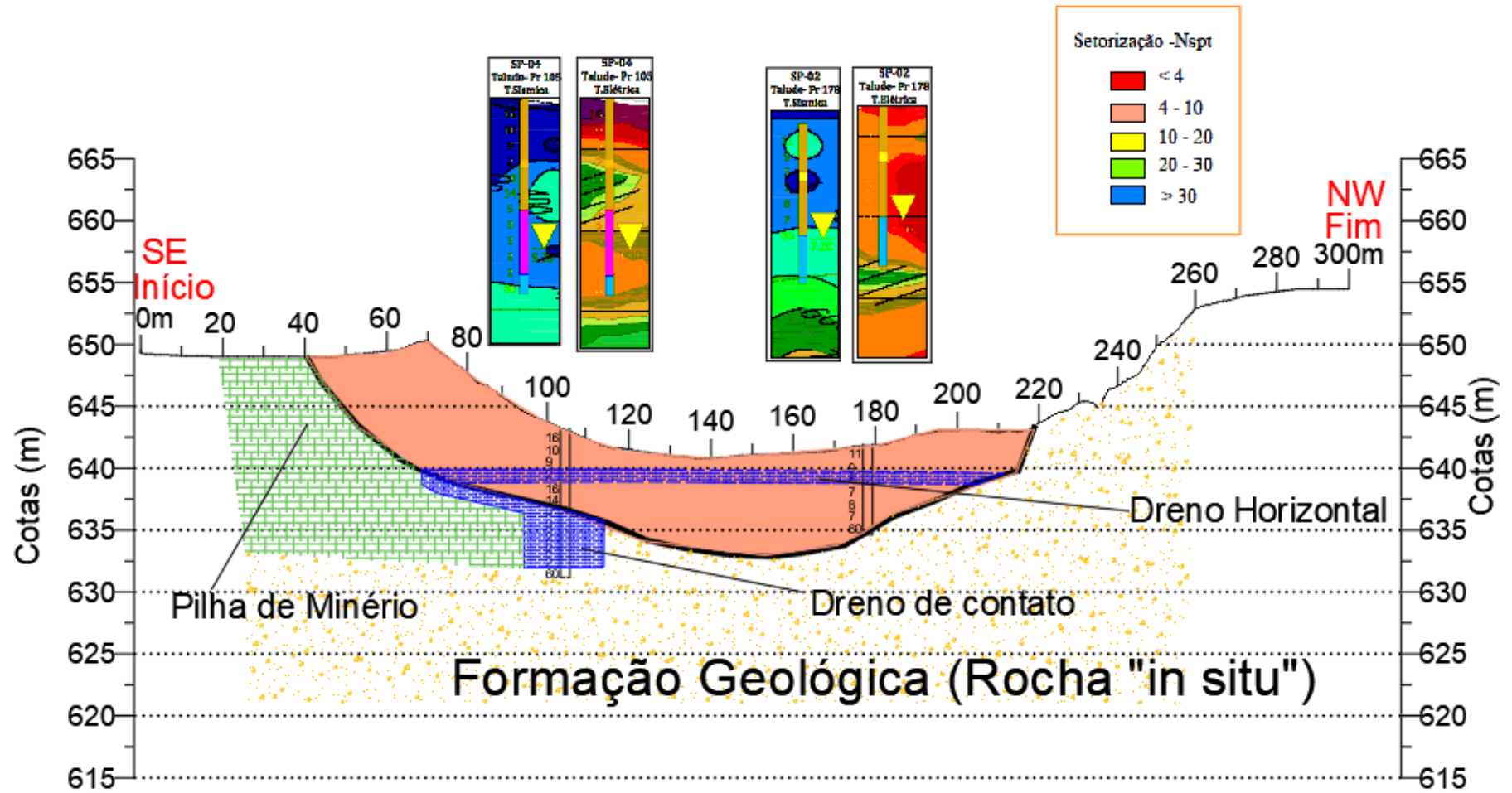
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 23 – Seções longitudinais da barragem B-12 sob as linhas de geofísica



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 23 – Cont.



Fonte: elaborado pelo autor

Em 2021, foi realizada nova campanha de geofísica nas mesmas posições da campanha de 2016 e, apesar das progressivas (distância do início da linha até o ponto amostrado) não serem exatamente no mesmo local, pelo fato das linhas mais alongadas na segunda campanha, é possível estabelecer correlações com base no traçado original do terreno de fundação e, dessa forma, fazer uma análise das alterações.

As barragens passaram por obras e é possível verificar algumas mudanças significativas.

Observando a Seção elétrica SIG L1 (Figura 24), a porção entre as cotas 650 e 655, inicialmente com a resistividade mais baixa, indicando possível presença de água, passa a mais resistiva na campanha de 2021, mostrando que a umidade foi deslocada. Analisando o embasamento, ainda é possível verificar a presença do lençol freático e o que se repete pelas demais seções, como observado nas Figuras 24 e 25.

Entretanto, algumas localidades ainda apresentam tais feições (taludes de jusante) e consistem em locais com maior probabilidade de ocorrência de materiais úmidos/saturados. Representam, portanto, as posições que podem favorecer a percolação de fluidos em subsuperfície (possíveis caminhos preferenciais).

Na campanha de 2021, também foi possível fazer as plantas-sínteses das anomalias geofísicas comparadas (Figuras 26 e 27), reforçando, assim, a obtenção de resultados satisfatórios na interação entre os dois métodos.

Figura 24 – Comparativo das seções geoeletricas das campanhas de 2016 e 2021 da Barragem B-11

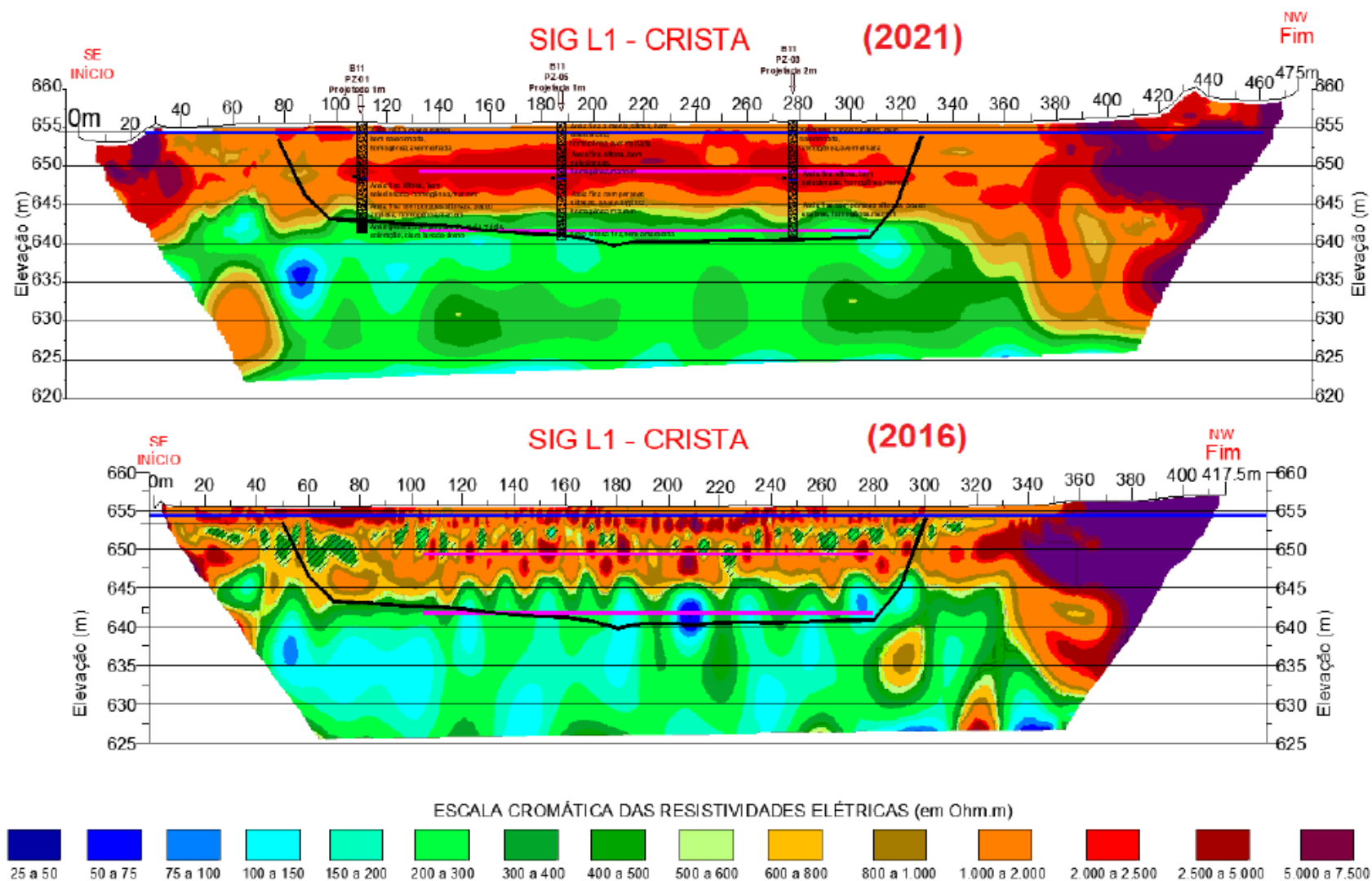
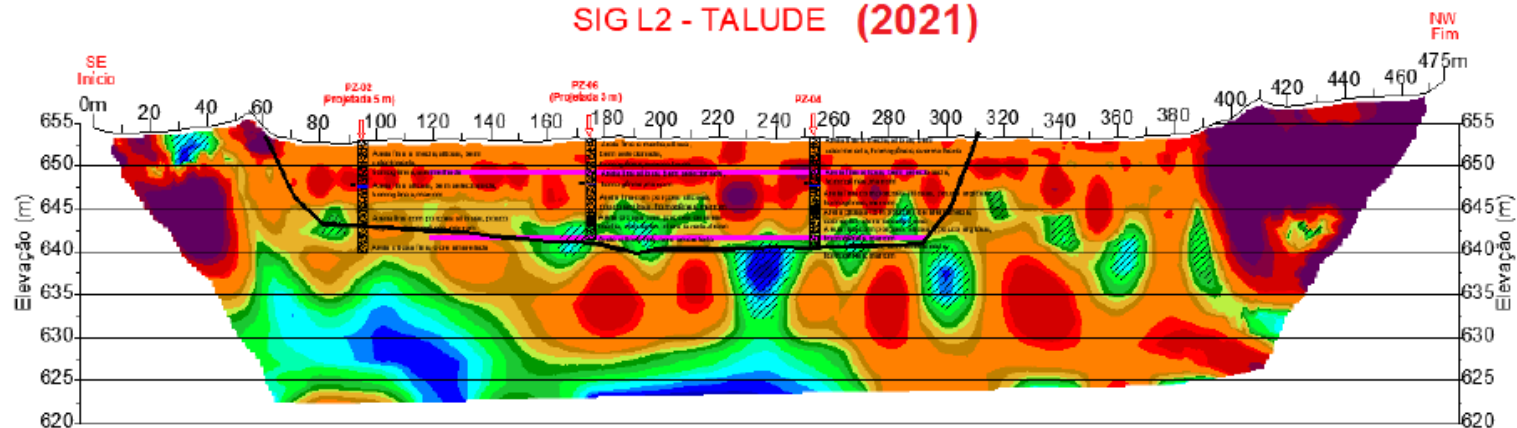
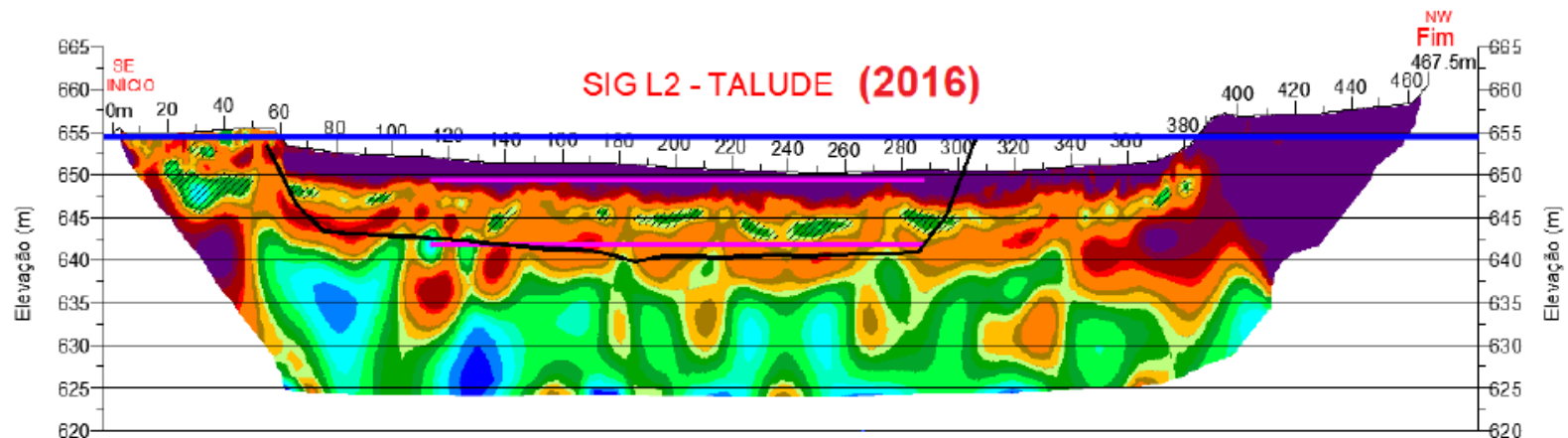


Figura 24 – Cont.

SIG L2 - TALUDE (2021)



SIG L2 - TALUDE (2016)



ESCALA CROMÁTICA DAS RESISTIVIDADES ELÉTRICAS (em Ohm.m)



Fonte: Machado e Marchioreto (2021)

Figura 25 – Comparativo das seções geoeletricas das campanhas de 2016 e 2021 da Barragem B-12

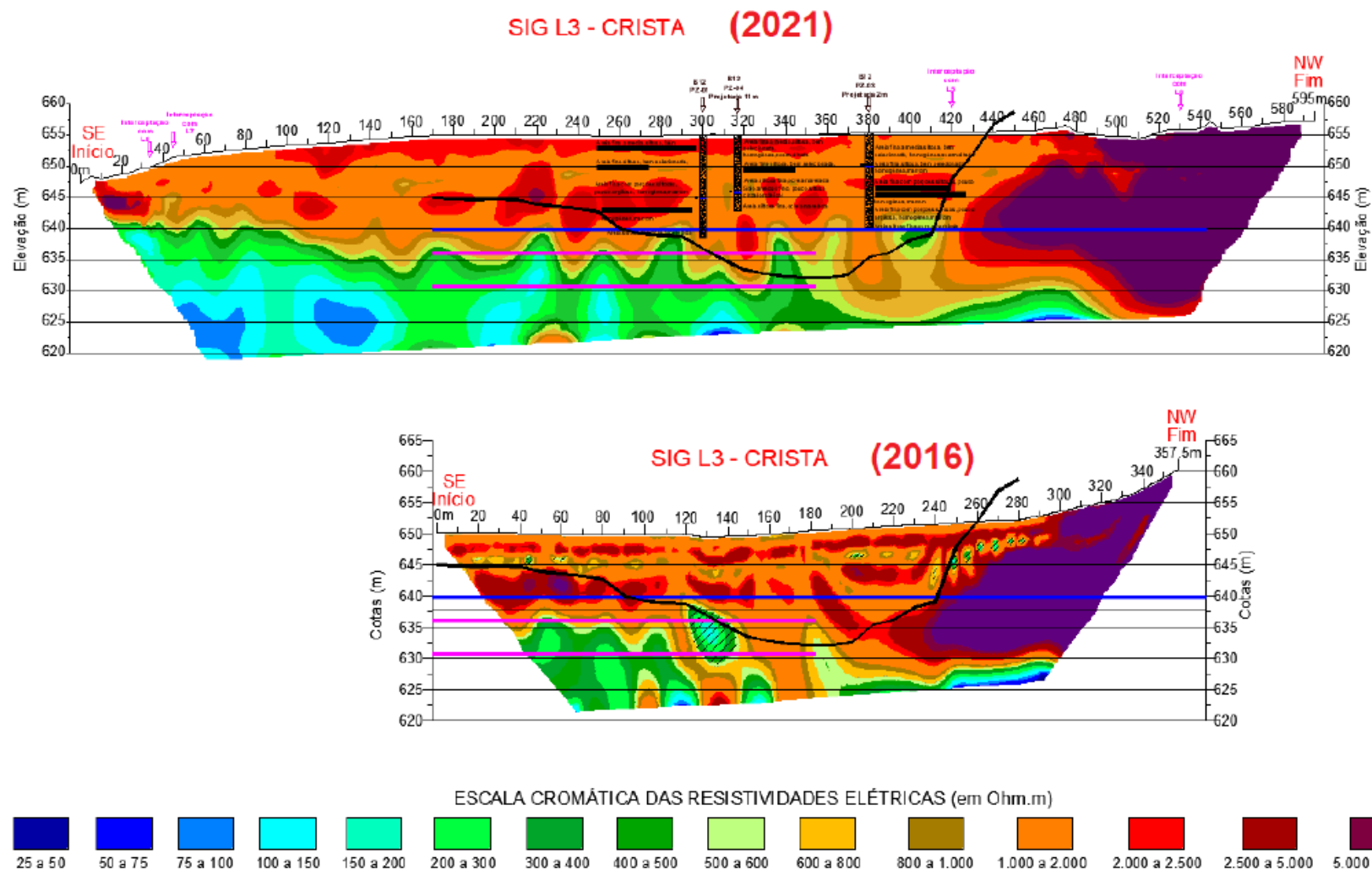
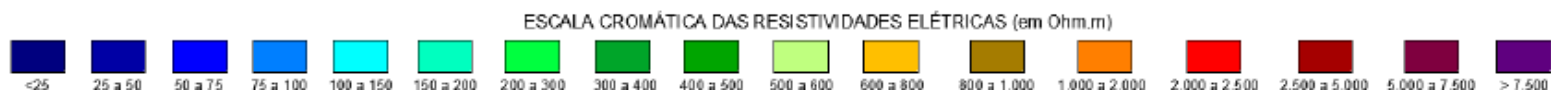
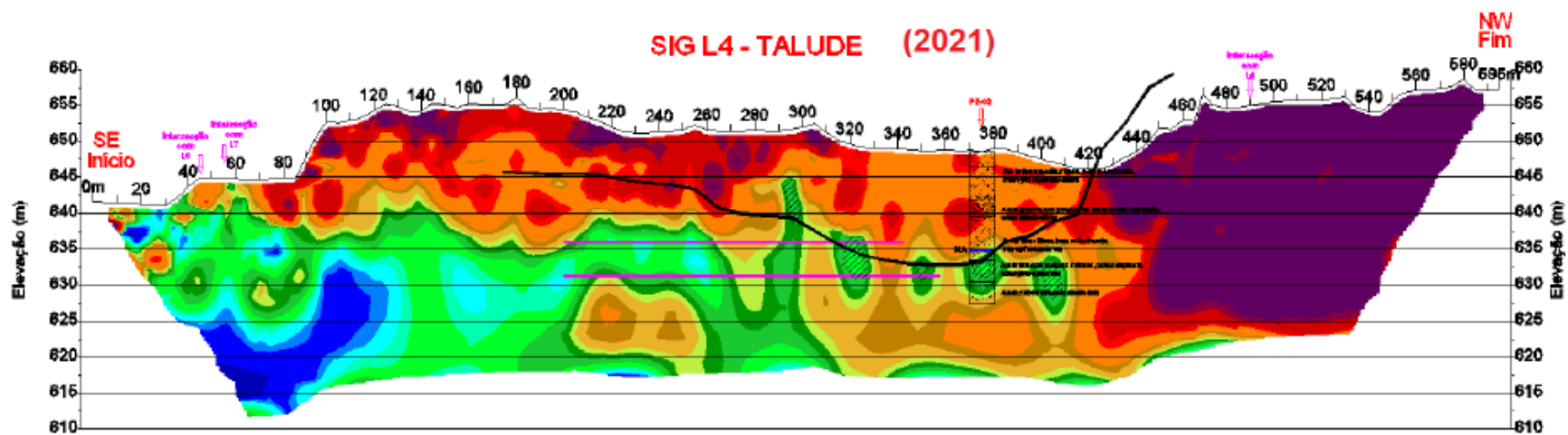
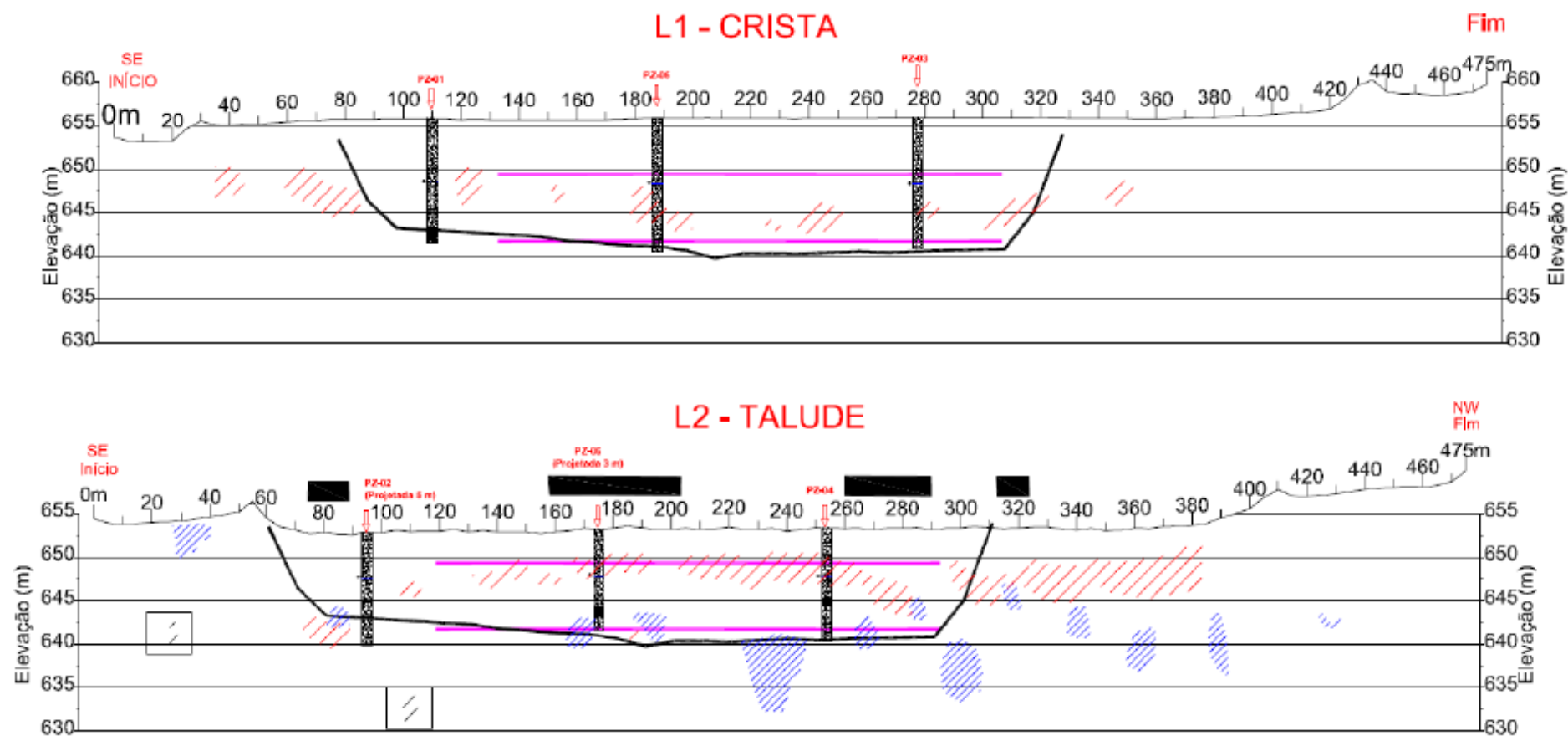


Figura 25 – Cont.



Fonte: Machado e Marchioreto (2021)

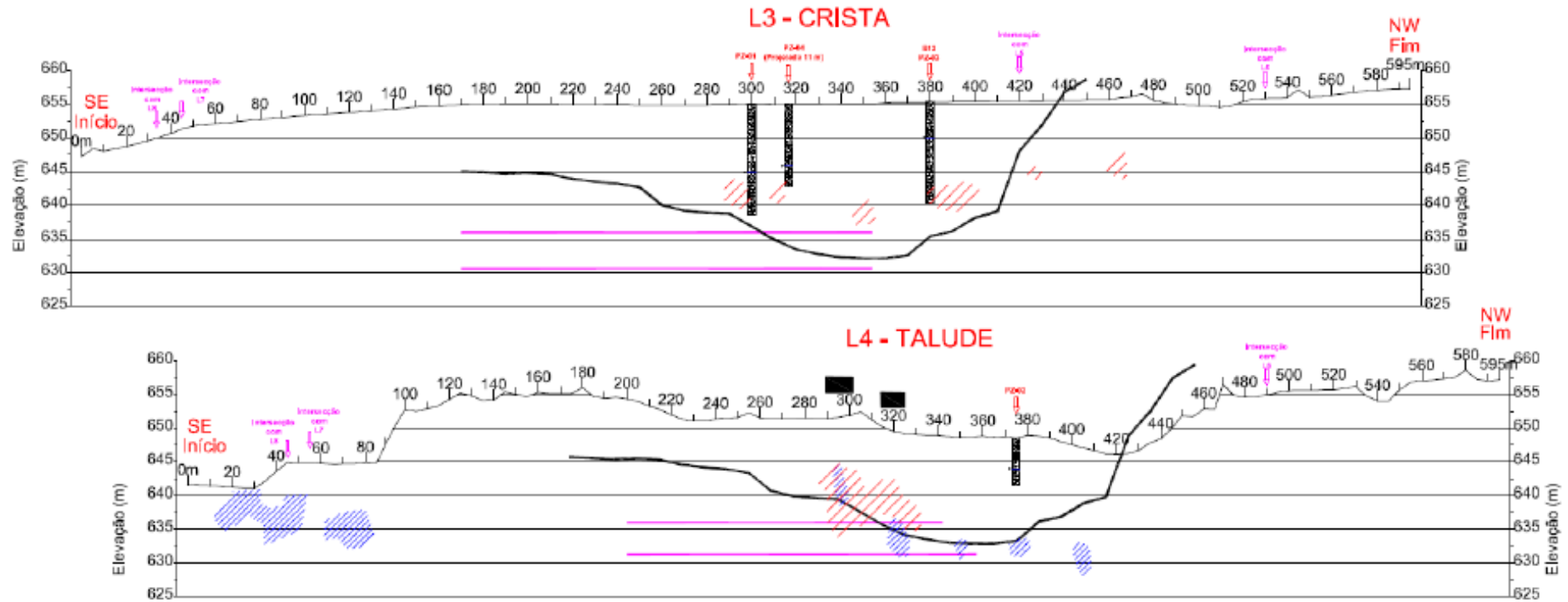
Figura 26 – Integração das informações do mapeamento geofísico, destacando as anomalias na área do barramento B-11



Anomalias de Imageamento Geolétrico (hachuras na cor azul) e anomalias MASW (hachuras na cor vermelha). As intersecções entre estas porções são representadas pelas linhas pretas sobre as progressivas e demarcaram locais recomendados para a realização de estudos complementares. Os retângulos delimitaram algumas anomalias MASW no interior dos maciços rochoso, locais também recomendados para estudos complementares.

Fonte: Machado e Marchioreto (2021)

Figura 27 – Integração das informações do mapeamento geofísico, destacando as anomalias na área do barramento B-11



Anomalias de Imageamento Geolétrico (hachuras na cor azul) e anomalias MASW (hachuras na cor vermelha). As intersecções entre estas porções são representadas pelas linhas pretas sobre as progressivas e demarcaram locais recomendados para a realização de estudos complementares. Os retângulos delimitaram algumas anomalias MASW no interior dos maciços rochoso, locais também recomendados para estudos complementares.

Fonte: Machado e Marchioreto (2021)

5.8 Interação e Comparativos

Camarero (2019) mostra que os resultados da eletrorresistividade, principalmente na visualização 3D, é uma excelente ferramenta para identificar fluxos internos em barragens de terra, mas recomenda a execução de sondagens diretas. Albuquerque *et al.* (2019) indicam que a Eletrorresistividade também é muito eficaz no monitoramento das barragens, demonstrando que os resultados são equivalentes e complementares às instrumentações, dando uma visão mais ampla do comportamento do maciço da barragem.

Oh e Sun (2008), em estudo comparativo, indicam que, de acordo com a interpretação, os valores de resistividade e SPT mostram algum padrão correlacionado como esperado. Ou seja, zonas com baixo valor de resistividade, geralmente exibem baixo valor de N e vice-versa. No entanto, podem ser obtidas algumas características distintivas da interpretação combinada, como em algumas regiões onde o valor da resistividade é um pouco alto, mas o valor do SPT é muito baixo.

No trabalho de Peter (2016), fica evidenciado que a conversão de dados do SPT para Resistência (V_s) é satisfatória, mas valores N baixos (isto é, ≤ 6) são muito insensíveis à previsão de V_s , onde há uma mudança significativa a cada contagem de golpes. Além disso, valores N superiores a 30 contagens de golpes produzem uma faixa estreita de V_s , gerando dados imprecisos. Esses dois métodos de teste são complementares e, embora o SPT seja o "Padrão de engenharia", os testes MASW de 20 a 30 podem ser coletados para cada perfuração.

Walid (2011) comparou vários métodos geofísicos, incluindo o levantamento eletromagnético de baixa frequência (EM), sondagens elétricas (ES) e a tomografia de resistividade elétrica (ERT), concluindo que a eletrorresistividade é o melhor método a ser usado para identificar fraturas preenchidas com água ou caminhos preferenciais de percolação.

Rocha (2019) também comparou eletrorresistividade, GPR (*ground penetrating radar*) e piezômetros, para sugerir um método de monitoramento, mostrando que os resultados da eletrorresistividade delinearam de forma precisa o nível freático, diferenciando áreas secas das úmidas ao longo do barramento. Já o GPR, apesar de

também apresentar bom resultado para delimitação de áreas úmidas, tem sua profundidade de investigação restrita.

Neste trabalho foi identificado que, apesar da eletrorresistividade e do Masw mostrarem alguma imprecisão nos contatos e descontinuidades em linhas de filtros (devido à interpolação matemática dos métodos analíticos), os resultados refletem, satisfatoriamente, a situação da barragem no momento das investigações e subsidia o programa de investigação direta, mostrando, claramente, pontos de interesse que merecem uma investigação pontual e detalhada.

5.9 Proposta Metodológica

Com base nas respostas e interpretações conciliadas, é possível implementar uma metodologia de investigação para todas as barragens de mineração construídas com material areno/argiloso.

A metodologia a seguir, tem os preceitos aplicados nessa dissertação e tem como objetivo padronizar os estudos de “As Is”.

1 – Levantamento do Histórico: primeiramente, é muito importante levantar toda a documentação da barragem, incluindo estudos, investigações, projetos e documentação fotográfica. Este levantamento é dificultado em barragens construídas antes de 2010, sendo necessária a interação com antigos funcionários e mesmo o exame de fotos da época da construção, para se entender como a barragem foi construída, além de análise de imagens aéreas antigas, de diferentes datas, para auxiliar na caracterização da evolução da barragem ou da própria obra de execução.

Inspeção visual com caminhamento sobre a barragem e levantamento dos possíveis indicativos: mesmo quando não é possível visualizar a saída do dreno vertical, trincas escondidas sob a gramínea ou mesmo *pipings*, existem sinais como, por exemplo, mudança repentina ou faixas de alteração na coloração da grama, que fornecem indícios de possíveis zonas mais saturadas próximas a superfície. É muito importante estar atento a essas alterações e indícios e lançá-los em um mapa prévio da barragem.

No final desta etapa, deve-se montar um modelo conceitual geológico-geotécnico esperado, e ser investigado para sua confirmação ou se precisa ser ajustado após as investigações.

2 – Plano de Investigação: é estabelecido ao final da fase anterior, definindo os métodos e técnicas de investigação geológico-geotécnica que serão utilizados, número de ensaios e sondagens, considerando eixo, ombreira, fundação e filtro da barragem, que constituem pontos fundamentais a serem estudados e avaliados.

3 – Levantamento Geofísico: linhas de eletrorresistividade (ER), caminhamento elétrico com Arranjo Dipolo-Dipolo associados a sísmicas Masw em linhas paralelas e sobrepostas ao eixo da barragem ajudam a identificar possíveis anomalias e até superfícies de alteamento, assim como a interpretação da junção dos dois métodos indica os pontos exatos onde devem ser feitas as investigações diretas, de modo a se obter melhor assertividade quando feito o comparativo e a interpretação dos perfis.

4 – Sondagem Direta: com base na interpretação das seções geofísicas, deve-se local as sondagens diretas com *Hollow*, pois não necessita de água para sua execução, aliado a ensaios de SPT a cada metro perfurado executados no centro da haste sobre os locais de diferentes condições e com anomalias geofísicas (locais com indício de água e locais com ausência; locais com alta resistividade e locais de baixa resistividade ou mesmo em locais com suspeita de anomalias). Desta forma, é possível comprovar os resultados obtidos nas linhas de geofísica na exata posição e extrapolá-los para todo o ensaio.

5 – Interpretação das Seções: Construção das seções paralelas e perpendiculares ao eixo da barragem com interpretação dos dados geofísicos aliados aos resultados diretos interpretando, assim, cada resultado geológico-geotécnico, estabelecendo as unidades com base na resistência das camadas e gerando um modelo tridimensional da barragem.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os métodos da eletrorresistividade e resistência sísmica *Masw* apresentam algumas particularidades quando aplicados em barragens de terra. As linhas de divisas de inversões de velocidade ou umidade não são exatas e a continuidade lateral de camadas (como, por exemplo, um filtro horizontal) podem sofrer interferências de pontos próximos, devido aos cálculos matemáticos aplicados pelo *software* de integração. Como estas anomalias se mostraram bem marcadas, não é difícil interpretar que algumas descontinuidades são, na realidade, superfícies contínuas.

Outro ponto a ser observado é que camadas ou níveis com grandes seixos não aparecem na sísmica, mas podem influenciar os ensaios de SPT.

Apesar disso, de forma geral, o uso integrado dos dois métodos geofísicos é ideal na identificação de alvos em subsuperfície para a realização de ensaios diretos. Com a interpretação do resultado, é possível reconstruir a forma como a barragem foi construída e como está se comportando no momento das investigações, sendo possível identificar pontos de fragilidade ou até início de *piping*.

Nos trabalhos anteriores, fica evidente que métodos geofísicos são eficazes nas investigações de barragens e até no monitoramento. Este trabalho mostra que a integração entre eletrorresistividade, sísmica e ensaios geotécnicos diretos é o melhor formato para o estudo de como a barragem está “*As Is*” e, por consequência, embasar programas e estudos de estabilidade de taludes.

Desta forma, este trabalho permitiu propor procedimentos metodológicos de investigação geotécnica de barragens de rejeito de mineração para elaboração de “*As Is*”, integrando resultados de dados de sondagens e geofísica.

Também foram consideradas positivas as principais aplicações de métodos de investigação direta e indireta na caracterização de barragens de rejeito e avaliadas do mesmo modo as condições geotécnicas de maciços de barragens de rejeito pela integração de dados de investigação direta (sondagem com *Hollow*, SPT e ensaios geotécnicos) e geofísica (eletrorresistividade SEV e sísmica MASW).

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR 6484**: Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/2743/abnt-nbr6484-solo-sondagem-de-simples-reconhecimento-com-spt-metodo-de-ensaio>. Acesso em: 15 ago. 2020

ALBUQUERQUE, R. *et al.* Characterization of Tailing Dams Using Shallow Geophysics: Application in the Cajati B1 Dam, São Paulo. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, p. 567-579, 2019.

AL FARES, W. Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdã, v. 75, n. 3, p. 464-471, 2011.

BRAGA, A. C. O. **Métodos Geométricos Aplicados na Caracterização Geológica e Geotécnica**: formações Rio Claro e Corumbataí no Município de Rio Claro – SP. 1997. 169 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

BRASIL. **Lei 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 nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 02 ago. 2020.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília: Presidência da República, 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm. Acesso em: 02 ago. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - Agência Nacional de Mineração. **Portaria DNPM nº 70.389, de 17 de maio de 2017.** Segurança de Barragens. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/documentos/portaria-dnpm-n-70389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens/view>. Acesso em: 02 ago. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 4, de 15 de fevereiro de 2019.** Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019a. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056. Acesso em: 03 ago. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 13, de 08 de agosto de 2019.** Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>. Acesso em: 02 ago. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022.** que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>. Acesso em: 22 fev. 2022

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012.** Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012a. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/1922-resolucao-n-143-de-10-de-julho-de-2012/file>. Acesso em: 03 ago. 2020

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução CNRH nº 144, de 10 de julho de 2012.** Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012b.

Disponível em:

[BRASIL. **Projeto de Lei da Câmara nº 168, de 2009.** 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 e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília: Câmara dos Deputados, 2009.](https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7234#:~:text=DE%20RECURSOS%20H%C3%8DDRICOS,RESOLU%C3%87%C3%83O%20N%C2%BA%20144%2C%20DE%2010%20DE%20JULHO%20DE%2012,Barragens%2C%20em%20atendimento%20ao%20art. Acesso em: 03 ago. 2020.</p>
</div>
<div data-bbox=)

Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/93108>. Acesso em: 02 ago. 2020.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 1.181, 03 de junho de 2003.** Estabelece diretrizes para verificação da segurança de barragens de cursos de água para quaisquer fins e para aterros de contenção de resíduos líquidos industriais. Brasília: Câmara dos Deputados, 2003. Disponível em:

<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=11828>. Acesso em: 02 ago. 2020.

CAMARERO, P. L. *et al.* Analysis of the Physical Integrity of Earth Dams from Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, Alemanha, v. 176, n. 12, p. 5363-5375, 2019.

COPPEDÊ, A. **Assessoria a Projetos e Obras de Reforço das Barragens B-11 e B-12.** Relatório Final das Investigações Geotécnicas. São Paulo: G&MA - Geologia e Meio Ambiente - Assessoria e Consultoria Ltda., 2018.

DAL MORO, G. VS and VP Vertical Profiling via Joint Inversion of Rayleigh Waves and Refraction Travel Times by means of Bi-Objective Evolutionary Algorithm. **Geophysics**, Houston, v. 66, p. 15-24, 2008.

DOURADO, J. C. *et al.* Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v.19, n. 1, p. 19-32, 2001.

HUTCHINSON, P. J.; BEIRD, M. H. A Comparison of Surface - and Standard Penetration Test-Derived Shear-Wave Velocity. **Environmental & Engineering Geoscience**, Estados Unidos, v. 22, n. 1, p. 27-36, 2016.

MACHADO, R.; MARCHIORETO, A. Levantamento Geofísico pelos Métodos Eletroresistivos (Imageamento Geométrico) e Sísmico (MASW) para Subsídio aos Estudos Geotécnicos nas Áreas das Barragens B-11 e B-12 - Região de Descalvado – SP. Relatórios Técnicos, 2016.

MACHADO, R.; MARCHIORETO, A. Levantamento Geofísico pelos Métodos Eletroresistivo (Imageamento Geométrico) e Sísmico (MASW) para Subsídio aos Estudos Geotécnicos nas Áreas das Barragens B-11 e B-12 - Região de Descalvado – SP. Relatórios Técnicos, 2021.

MARRANO, A.; IYOMASA, W. S.; MIYASHIRO, N. J. In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (ed.). **Geologia de Engenharia e Ambiental**. São Paulo: ABGE, 2018. v. 2, p. 279-289.

MIO, G. **Seções Geotécnicas Transversais e Longitudinais das barragens B-11 e B-12**. São Carlos: E-GEO Gerenciamento da Informação Geoambiental Ltda., 2018.

OH, S.; SUN, C. G. Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam. **Environmental Geology**, Suíça, v. 54, n. 1, p. 31-42, 2008.

ORELLANA, E. **Prospeccion geolectrica en corriente continua**. Madri: Paraninfo, 1972.

RICHART, F. E.; WOODS, R. D.; HALL, J. R. **Vibrations of Soils and Foundations**. Estados Unidos: Prentice-Hall, 1970. 414 p.

ROCHA, D. C. G; BRAGA, M. A. S; RODRIGUES, C. T. Geophysical Methods for BR Tailings Dam Research and Monitoring in the Mineral Complex of Tapira – Minas Gerais, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 3, 2019.

SOUZA, G. **Ensaio de Penetração Padronizados (SPT) e Instalação de Poços de Monitoramento do N.A**. Paulínia: CWS Ambiental Ltda., 2018.

SOUZA, L. A. P.; GANDOLFO, O. C. B. In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (Ed.). **Geologia de Engenharia e Ambiental**. v. 2. São Paulo: ABGE, 2018. p. 313-326.

SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. Métodos de Investigação. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

TAMBORIM, C. **Acompanhamento Técnico de Obra (ATO)**. Leme: AMANA Geologia Engenharia e Meio Ambiente S/S Ltda., 2018.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 877 p.

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