



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



EMANUEL RICARDO SILVEIRA

**INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA ELÉTRICA APLICADA AO MONITORAMENTO DE
BARRAGENS E PREVENÇÃO DE ACIDENTES**

OURO PRETO
2021

EMANUEL RICARDO SILVEIRA

**INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA ELÉTRICA APLICADA AO MONITORAMENTO DE
BARRAGENS E PREVENÇÃO DE ACIDENTES**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Monitoramento de Barragens

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

OURO PRETO
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S587i Silveira, Emanuel Ricardo.
Investigação geofísica elétrica aplicada ao monitoramento de barragens e prevenção de acidentes. [manuscrito] / Emanuel Ricardo Silveira. - 2021.
64 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Barragens de rejeitos - Estabilidade. 2. Geofísica. 3. Liquefação. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.136

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dez dias do mês de março de 2021, às 13h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Emanuel Ricardo Silveira**, matrícula 13.2.1402, intitulado: **Investigação Geofísica Elétrica Aplicada ao Monitoramento de Barragens e Prevenção de Acidentes**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, Orientador, M.Sc. Paula de Mello Martins e Eng^o Civil Filipe Guarnieri Xavier. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro M.Sc. Paula de Mello Martins; segundo, Eng^o Civil Filipe Guarnieri Xavier e em último, o Dr. Hernani Mota de Lima. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 10, (dez) sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. Os demais membros que participaram por videoconferência se comprometem a enviar um parecer digital que conste a aprovação do discente, este, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 10 de março de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Membro: M.Sc. Paula de Mello Martins

Membro: Eng^o Civil Filipe Guarnieri Xavier

Discente: Emanuel Ricardo Silveira

*Dedico este trabalho ao meu pai, Lindolfo, e
minha mãe, Adalélia, por todo ensinamento e
confiança. Obrigado pelo amor e cuidado.*

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Adalélia, por todo amor, por sempre estar ao meu lado e pelo seu apoio.

Ao meu pai, Lindolfo, por tantos ensinamentos e pelo exemplo de perseverança.

À minha irmã, Gabriela, por ter sido uma motivação e pela devoção incondicional.

À minha avó, Josina, pelas suas orações.

Ao meu tio, Robson, por ter me ajudado no começo desta caminhada.

Ao meu primo, Vinícius, por ter me dado a mão no final desta empreitada.

Aos meus amigos de Ouro Preto, especialmente Érico e Vizinha por estarem ao meu lado e pelas descontrações nestes momentos finais.

Ao meu orientador, Professor Hernani, por ter me auxiliado na conclusão desta etapa.

Aos professores André e Vladmir pela oportunidade de integrar suas equipes de estudos.

À Paula e ao Filipe, por tão prontamente estarem dispostos a contribuir com este trabalho.

À Cassia, por ter me auxiliado para que este trabalho chegasse a sua forma final.

À Republica Vaticano, por ter sido um lugar de tanto aprendizado e amizade. Foi minha segunda casa e onde ganhei uma nova família. Obrigado a todos que moraram comigo e aos ex-alunos que sempre estiveram presentes.

A Deus, pela iluminação e companhia nesta jornada.

A todos que de uma forma ou outra me ajudaram neste trabalho.

RESUMO

A construção de barragens de rejeitos tem sido o método mais comum para dispor os resíduos provenientes do beneficiamento mineral. Este tipo de armazenamento possui uma série de particularidades que o difere de barragens de terra tradicionais, a principal diferença é a possibilidade de os maciços de sustentação serem formados pelos próprios rejeitos. Contudo, nos anos de 2015 e 2019, o Brasil testemunhou os dois maiores acidentes envolvendo barragens de rejeitos até então. O primeiro ocorreu em Mariana - MG e destruiu o subdistrito de Bento Rodrigues, assoreou o Rio Doce até sua foz no estado Espírito Santo e foi descrito como o maior desastre ambiental da mineração no país. A segunda tragédia, ocorrida em Brumadinho – MG, veio em meio ao descrédito do setor mineral. Além dos danos ambientais, o rompimento causou 259 mortes e 11 desaparecidos. Os mecanismos de ruptura indicados pelos especialistas foram, nas duas situações, liquefação estática. Este fenômeno ocorre em areias contrativas (pouco compactadas) e saturadas, sua causa é a falta de controle hídrico das barragens. Os sistemas de monitoramento usuais contam com uma série de instrumentos como indicadores de nível de água, inclinômetros, piezômetros entre outros. Porém, os dados obtidos destes aparelhos são locais e de difícil extrapolação no maciço. Este estudo se propõe a analisar a geofísica elétrica como um método auxiliar no monitoramento de barragens. Para validar a geoeletrica como alternativa complementar foram analisadas campanhas executadas em 3 barragens construídas por diferentes métodos de alteamentos. Posteriormente, foi verificado o potencial destas campanhas em monitorar situações de saturação, principal fator de ruptura. Foi possível observar que o emprego da metodologia forneceu seções descritivas de fácil visualização, além uma boa caracterização dos materiais e do nível de água em subsuperfície. Por fim, conclui pela recomendação da investigação geofísica no estudo de saturação e fluxo em barragens de rejeitos como forma de complementar aos procedimentos de monitoramento tradicionais.

Palavras-Chave: Barragens de Rejeitos, Investigação Geofísica, Saturação, Liquefação

ABSTRACT

The construction of tailings dams has been the most common method for disposing of waste from mineral processing. This type of storage has a number of peculiarities that differ from traditional earth dams, the main difference being the possibility that the support masses are formed by the tailings themselves. However, in the years 2015 and 2019, Brazil witnessed the two biggest accidents involving tailings dams so far. The first occurred in Mariana - MG and destroyed the sub-district of Bento Rodrigues, silted up the Rio Doce to its mouth in the state of Espírito Santo and was described as the biggest environmental mining disaster in the country. The second tragedy, which occurred in Brumadinho - MG, came amid the discredit of the mineral sector. In addition to environmental damage, the disruption caused 259 deaths and 11 missing. The rupture mechanisms indicated by the specialists were, in both situations, static liquefaction. This phenomenon occurs in contractive (poorly compacted) and saturated sands, its cause is the lack of water control in the dams. The usual monitoring systems have a series of instruments such as water level indicators, inclinometers, piezometers, among others. However, the data obtained from these devices are local and difficult to extrapolate in the massif. This study aims to analyze electrical geophysics as an auxiliary method for monitoring dams. To validate geoelectricity as a complementary alternative, campaigns carried out on 3 dams built by different elevation methods were analyzed. Subsequently, the potential of these campaigns to monitor saturation situations, the main disruption factor, was verified. It was possible to observe that the use of the methodology provided descriptive sections of easy visualization, besides a good characterization of the materials and the level of water in subsurface. Finally, he concludes by recommending geophysical research in the study of saturation and flow in tailings dams as a way of complementing traditional monitoring procedures.

Keywords: Tailings Dams, Geophysical Research, Saturation, Liquefaction

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Quantidade de rejeitos por bem mineral processado.....	18
Figura 2: Seção típica de Barragens de Terra.....	20
Figura 3: Seção típica de Barragens de Enrocamento.....	20
Figura 4: Alteamentos a jusante.....	22
Figura 5: Alteamentos a montante.....	23
Figura 6: Alteamentos por linha de centro.....	24
Figura 7: Alternância entre material depositado.....	26
Figura 8: Corpo linear atravessado por corrente elétrica.....	31
Figura 9: Distribuição de potenciais no semiespaço.....	32
Figura 10: Polarização Eletrônica.....	34
Figura 11: Polarização de Membrana.....	34
Figura 12: Polarização Induzida no domínio do tempo.....	35
Figura 13: Eletrodos em arranjo Dipolo-Dipolo.....	38
Figura 14: Arranjo de eletrodos em SEV.....	39
Figura 15: Esquema do projeto executivo da barragem da mina Osamu Utsumi.....	40
Figura 16: Vista aérea da barragem com indicação das linhas geofísicas, detalhe para a surgência observada a jusante.....	41
Figura 17: Equipamentos e trabalhos de aquisição na UTM.....	42
Figura 18: Vista frontal da Barragem BR.....	42
Figura 19: Seção ilustrativa da Barragem BR e materiais constituintes.....	43
Figura 20: Localização dos tapetes drenantes.....	43
Figura 21: Canal extravasor e saída de drenos.....	44
Figura 22: Localização das linhas principais e complementares de caminhamento elétrico...	44
Figura 23: Resistivímetro SuperSting utilizado.....	45
Figura 24: Aquisição de dados por GPR.....	46

Figura 25: Localização da Barragem B1, destaque para a localização dos indicadores de nível de água em azul e piezômetros em vermelho.....	47
Figura 26: Perfil da barragem com indicação dos drenos, fases construtivas e locais das linhas geofísicas executadas.....	47
Figura 27: Localização das linhas de aquisição dos dados.....	48
Figura 28: Eletrorresistividade da Seção 1.....	49
Figura 29: Eletrorresistividade da Seção 2.....	49
Figura 30: Eletrorresistividade da Seção 3.....	50
Figura 31: Eletrorresistividade da Seção 4.....	50
Figura 32: Eletrorresistividade da Seção 5.....	50
Figura 33: Exibição tridimensional dos valores de eletrorresistividade.....	51
Figura 34: Exibição tridimensional dos valores de eletrorresistividade.....	52
Figura 35: Localização das seções tipo e da instrumentação da Barragem Br.....	53
Figura 36: Resistividade na Linha 01.....	53
Figura 37: Cargabilidade na Linha 01.....	54
Figura 38: Imagem de GPR na linha 01.....	54
Figura 39: Resistividade na Linha 04.....	55
Figura 40: Cargabilidade na Linha 04.....	55
Figura 41: Imagem de GPR na Linha 04.....	55
Figura 42: Resistividade na Linha 07.....	56
Figura 43: Cargabilidade na Linha 07.....	56
Figura 44: Imagem de GPR na Linha 07.....	56
Figura 45: Superfície freática estimada por INA'sem comparação com superfície indicada pelos métodos geofísicos na pseudo-seção D-D'.....	57
Figura 46: Representação das seções na Barragem B1, destaque para as seções 01 e 06...58	58
Figura 47: Zonas anômalas próximas às ombreiras.....	59

Figura 48: Antigo vertedouro da estrutura.....59

Figura 49: Sobreposição das seções de geofísica ao vertedouro.....59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre métodos construtivos.....	25
Tabela 2: Valores de permeabilidade hidráulica para diferentes rejeitos.....	26
Tabela 3: Comprimento das linhas de aquisição.....	45
Tabela 4: Comprimento das linhas de aquisição por GPR.....	46

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVO.....	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	17
3.1	Disposição de Rejeitos.....	17
3.2	Barragens de Mineração.....	19
3.3	Operações de Barragens.....	25
3.4	Acidentes Recentes.....	28
3.5	Métodos Geofísicos Elétricos.....	29
3.5.1	Eletrorresistividade.....	31
3.5.2	Polarização Induzida.....	33
3.5.3	Eletromagnético.....	35
3.5.4	Potencial Espontâneo.....	36
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1	Sondagens Geofísicas.....	39
4.1.1	Barragem UTM, Poços de Caldas - MG.....	40
4.1.2	Barragem BR, Tapira - MG.....	42
4.1.3	Barragem B1, Cajati - SP.....	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
5.1	Barragem UTM.....	49
5.2	Barragem BR.....	52
5.3	Barragem B1.....	57
5.4	Discussões Finais.....	60
6.	CONCLUSÃO.....	61
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

Nos anos de 2015 e 2019 ocorreram dois graves acidentes envolvendo barragens no estado de Minas Gerais. O acidente de novembro de 2015 em Mariana deixou 19 mortos, destruiu o distrito de Bento Rodrigues, despejou lama nos afluentes do Rio Doce e chegou até sua foz no estado do Espírito Santo (LACAZ et al., 2017).

Em janeiro de 2019 aconteceu o rompimento da barragem da mina do Córrego do Feijão. As instalações da mina, refeitório e escritórios localizados a jusante foram completamente soterrados. Câmeras de monitoramento gravaram o momento do rompimento e as imagens circularam por todo o país, chocando a população.

Depois destes acidentes, barragens se tornaram sinônimo de insegurança e preocupação. A mineradora Vale S./A., antes considerada símbolo de competência na indústria nacional, passou a responder a inúmeros processos ambientais, civis e criminais. Suas finanças foram bloqueadas para indenização de vítimas e houve a interrupção do pagamento de dividendos devido aos processos e custos do legado negativo. Além de operar a barragem de Córrego do Feijão, a companhia brasileira é proprietária de 50% da Samarco (que operava a barragem de Fundão) enquanto a outra metade pertence à australiana BHP Billiton.

Em 2020 a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) foi atualizada e sancionada estabelecendo novas multas e penalidades bem como novas responsabilidades ambientais. O estado de Minas Gerais através da Lei 23.291 de 2019 e do Decreto 48.140 em 2021 atualizou a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB) em consonância com a legislação nacional. A PESB faz um delineamento mais específico dos termos relacionados às barragens de rejeitos e órgãos competentes para fiscalização. Ela também estabelece uma classificação mais precisa em função de categorias de risco e danos potenciais associados. Entretanto, além das medidas corretivas ou punitivas, é de extrema importância que os responsáveis pelo monitoramento consigam antever situações de risco.

Os acidentes ocorridos causaram perdas enormes às vidas e ao meio ambiente. Os relatórios fornecidos comprovaram que os instrumentos de monitoramento utilizados indicaram alta saturação local. Porém, não foram tomadas medidas para a evacuação da área afetada.

À vista de prever estas condições desfavoráveis, este estudo se propõe a avaliar a aplicação de métodos geofísicos para investigação indireta das estruturas

das barragens. Por meio de uma revisão teórica de aplicações práticas já efetuadas por outros pesquisadores, buscou-se identificar possíveis situações de causa de rompimento e fatores de instabilidade em barragens de rejeitos.

Após a apresentação dos conceitos de barragem, suas características particulares, propriedades mecânicas dos rejeitos e a contextualização dos acidentes, são trazidas as propriedades físicas eletromagnéticas que permitem o uso da geofísica. Ao final são apresentadas três campanhas geofísicas realizadas nos estados de Minas Gerias e São Paulo. As barragens investigadas foram construídas por diferentes métodos de alteamentos e comportam rejeitos de natureza variadas provenientes do beneficiamento de minério de urânio em Poços de Caldas - MG, e minério de fosfato localizado nos complexos de Tapira - MG e de Cajati - SP.

Os estudos permitiram a investigação dos embasamentos rochosos, identificação de caminhos preferenciais de fluxo, efetividade de drenos e verificação de horizontes de deposição de materiais nos alteamentos. Os resultados de cada estudo, julgados satisfatórios, sugerem a metodologia geofísica como uma valiosa ferramenta auxiliar no monitoramento de barragens. O método é uma alternativa econômica, rápida e eficiente de obtenção de dados e descrição dos maciços em subsuperfície.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo estudar, por meio de pesquisas já realizadas, o potencial de aplicação de campanhas geofísicas na identificação de zonas de saturação e fluxo em subsuperfície de barragens, atuando como metodologia complementar no monitoramento e na prevenção de acidentes envolvendo estas estruturas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordadas algumas características particulares de barragens de mineração e a metodologia sugerida para monitorá-las. A princípio é apresentado uma descrição dos rejeitos e posteriormente de barragens, a forma mais comum de dispô-los. Segue-se recapitulando os desafios da estocagem tradicional e analisando as propriedades elétricas que permitem o uso da geofísica como auxiliar no monitoramento destas estruturas.

3.1 Disposição de Rejeitos

O beneficiamento mineral produz uma quantidade significativa de materiais que não tem valor econômico e metais não recuperados que são descartados no processo. Com o aumento das demandas mundiais por produtos industrializados, depósitos com teores cada vez menores se tornam viáveis economicamente. Conseqüentemente, tem se uma proporção maior de material rejeitado, tornando a disposição destes volumes um desafio crescente para as mineradoras (SOARES, 2010).

A forma mais comum de disposição destes rejeitos é através de barramentos, onde o material é lançado como uma polpa. Além da estocagem dos rejeitos, a disposição em barragens deve visar o reaproveitamento de água e sua recirculação no beneficiamento.

Em uma descrição legal, o Art. 2º da Lei Nº 14.066 de 30 de setembro de 2020 define barragem como:

“(...) qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.”

Estas barragens também permitem a recuperação da água clarificada no lago. A reutilização preserva os aquíferos locais, sendo uma forma mais sustentável de utilização deste recurso. Para cumprir requisitos ambientais e operacionais na mina, os sistemas da barragem devem garantir que não haja contaminação ou vazamentos nas redondezas através de sistemas de fraturamentos rochosos do embasamento ou por fluxo interno no maciço estrutural (SOARES, 2010).

Além disso, as barragens devem ser projetadas de modo que possam se tornar uma reserva potencial (caso se torne viável a exploração futura dos materiais em seu interior) ou visando o fechamento e a descaracterização da estrutura (SOARES, 2010).

No centro do estado de Minas Gerais o bem mineral de destaque é o ferro. Proveniente principalmente de Itabirito (formações ferríferas bandadas), aproximadamente 50% do material enviado para a usina de beneficiamento é rejeitado (Figura 1). Essas proporções variam de acordo com os teores de corte e a recuperação metálica de cada planta. Tanto os reservatórios de Mariana - MG quanto o de Brumadinho - MG armazenavam rejeitos do processamento de ferro. O consumo mundial deste metal, imprescindível na fabricação do aço, e os teores de corte menores influenciaram nas crescentes dimensões das atuais barragens de rejeitos de ferro.

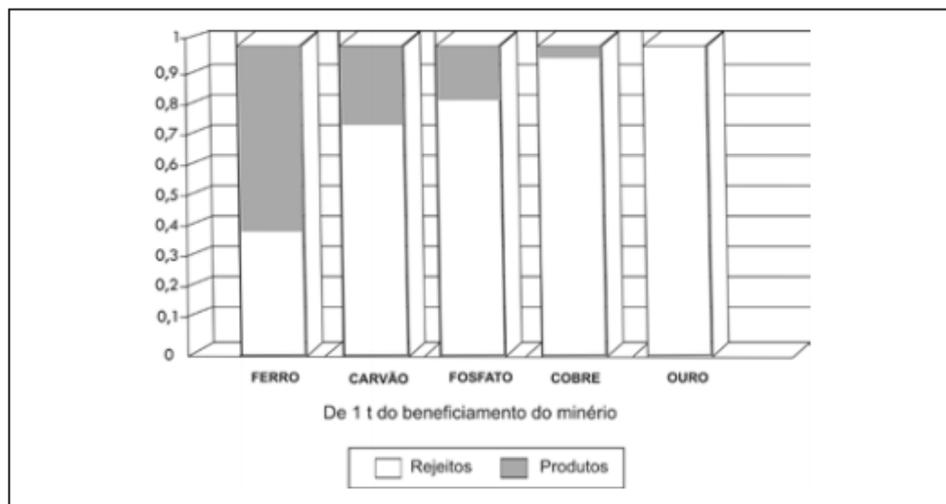


Figura 1: Quantidade de rejeitos por bem mineral processado
Fonte: SOARES (2010).

As barragens normalmente utilizam material de uma zona de empréstimo ou concreto na construção do maciço de contenção. Entretanto, para reduzir custos e em função do grande volume descartado a ser estocado, as barragens em mineração podem usar o próprio rejeito como material construtivo. Diversos fatores corroboram com esta adaptação do setor mineral, entre eles: escassez de material de empréstimo, velocidade de alteamento possibilitado, dificuldade no transporte de materiais de outras áreas e os custos envolvidos para estas operações.

3.2 Barragens de Mineração

As barragens podem ser construídas em diferentes tipos, utilizando diferentes materiais. Podem utilizar concreto, enrocamento, solos e, no caso da mineração, os próprios rejeitos. Este método elaborado dentro da indústria mineira permite que a estrutura seja alteada sucessivamente em contrapartida às barragens de terra, enrocamento e concreto que são levantadas em etapa única. Assim, a escolha do material construtivo depende dos objetivos do barramento, bem como da disponibilidade local destes materiais. Normalmente em barramentos destinados a armazenar grandes volumes de água, como em hidrelétricas, utiliza-se o concreto como material construtivo. Embora estas barragens sejam as mais resistentes e estancantes, os custos de britas, areias, ferragens e reagentes químicos inviabilizam sua implementação no setor mineral (CAMARERO, 2016).

Como na mineração os investimentos em barragens não refletem em aumento no valor do produto final opta-se, sempre que possível, pelo método de maior economicidade. Nesse sentido, normalmente são instaladas barragens de terra, de enrocamento ou de rejeitos nas minas. As barragens de terra são estruturas geotécnicas milenares, seus primeiros registros remontam ao Egito Antigo atingindo, já naquela época, até 12 metros de altura (ALMEIDA, 2010). Nesta construção, simplesmente retira-se material de uma zona de empréstimo e o assenta em pilha, formando um dique de contenção. O único processo de melhoramento às construções de terra antigas era a compactação feita por pisoteamento de animais ou pessoas (CAMARERO, 2016).

Com o desenvolvimento da geotecnia como ciência, das técnicas e dos conceitos de mecânica dos solos, começaram a existir projetos racionais para construção destas estruturas a partir do começo do Século XX (ARCILA, 2020). O caráter empírico, apesar de ainda presente em barramentos de pequeno porte, não é mais aceito nos projetos de barragens (MACHADO, 2007). Atualmente, as barragens de terra são compactadas mecanicamente e podem ser construídas com um único material (barragens homogêneas) ou utilizando um material de menor permeabilidade hidráulica no núcleo (barragens zonadas) (Figura 2). O centro com material mais fino tem a função de aumentar a estanqueidade da barragem, reduzindo o fluxo de água no interior do maciço. Ambos os tipos podem ser integrados com drenos e filtros internos (CAMARERO, 2016).

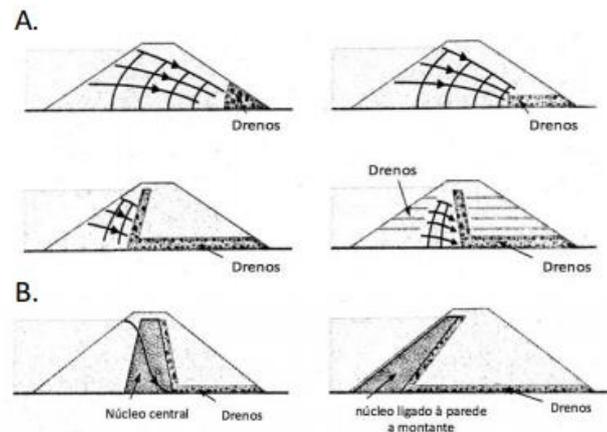


Figura 2: Seção típica de Barragens de Terra. A) homogêneas B) zonadas

Fonte: GONZALES de VALEJO *et al.* *apud* ARCILA (2020)

As barragens de enrocamento são mais recentes, surgindo em meados do Século XIX. Segundo Almeida (2010) foi nesta época, durante a corrida do ouro na Califórnia, que mineiros começaram a empregar blocos de rochas como material construtivo de barragens. Este fato foi estimulado pela disponibilidade local de blocos de desmonte e escassez de terras soltas. Atualmente, os fragmentos rochosos são empilhados utilizando-se de materiais mais finos para preencher espaços, posteriormente o conjunto é compactado mecanicamente principalmente com a utilização de rolos mecânicos (CHIOSSI *apud* ARCILA, 2020). Para realizar a compactação, o enrocamento deve ser umedecido, desta forma evita-se subsequentes recalques (ALMEIDA, 2010). Uma camada impermeável deve cobrir a face de montante do dique de contenção para frear a percolação no interior do maciço (Figura 3).

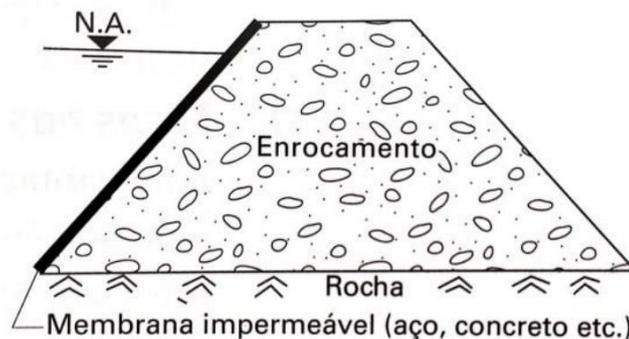


Figura 3: Seção típica de Barragens de Enrocamento

Fonte: CHIOSSI *apud* ARCILA (2020)

As barragens de rejeitos (ou aterros hidráulicos) são construídas em etapas sendo frequentes na mineração (THOMÉ, 2018). A partir de um dique inicial, deposita-se a polpa que formará uma praia. Este rejeito arrastado da praia forma uma berma capaz de conter novos materiais que são descartados pela planta de beneficiamento. Estas construções ganham altura conforme são enviados rejeitos para serem depositados, o custo final se estende por todo o período operativo da barragem. Além de dissolver o investimento, não há custos de transporte de materiais estruturais, pois a estrutura será formada pelos próprios rejeitos que já devem ser alocados (SILVA, 2010).

Em qualquer método, o projeto para instalação de uma barragem começa com a escolha do melhor local. Deve-se procurar um vale que seja capaz de comportar uma quantidade substancial de rejeitos. A preferência é por represamentos em fundos de vales estreitos. A construção acontece perpendicular ao talvegue podendo ser realizado em barramentos múltiplos. Esse tipo de disposição é relativamente econômico pois não exige muito material para construir o dique de contenção enquanto as faces do vale atuam como paredes naturais e a área ocupada pelo reservatório geralmente não cobre uma superfície muito extensa.

Os projetistas devem observar o impacto ambiental, tanto na construção quanto no chamado *dam break*, ou o estudo de ruptura da barragem. Neste estudo é observado a mancha de inundação, existência de populações a jusante, reservas ambientais, instalações industriais dentre outras considerações. Devem ser realizados estudos topográficos, hidrológicos e geológicos para dimensionamento e escolha do melhor local.

Após o cuidadoso critério e aprovação preliminar das licenças inicia-se a construção propriamente dita. Em barragens de terra e enrocamento uma equipe geotécnica especializada constrói todo o barramento antes de se dispor qualquer rejeito. Nos aterros hidráulicos, o processo começa com a preparação e construção do dique inicial. Somente este dique de partida utiliza material de empréstimo e é capaz de conter os primeiros anos de disposição (VICK, 1990). Quando este pequeno barramento inicial está quase cheio, começa o processo de alteamento da barragem. Ao contrário das barragens de terra tradicionais, os alteamentos seguem conforme o material é descartado e a partir daí podem ser realizados por equipamentos próprios da mina.

Estes alteamentos podem ser realizados por três métodos: montante, jusante e linha de centro. O método é escolhido de acordo com a finalidade da barragem, a facilidade construtiva e disponibilidade de materiais adequados para cada tipo. São nominadas de acordo com a direção de deslocamento da crista da barragem (SOARES, 2010). Em um contexto prático, pode haver uma mescla entre as formas de alteamento conforme as necessidades operacionais.

Para o método a Jusante, os alteamentos são executados na face do talude. É o método mais seguro pois os alteamentos se apoiam sobre um material competente previamente compactado. Pode ser construída com o emprego de material impermeabilizante na face do lago apresentando possibilidade de armazenar água e capacidade para receber qualquer tipo de rejeitos provenientes da planta (CHAVES 2015).

De acordo com Soares, (2010), a principal vantagem do método é o baixo risco de ruptura. Neste tipo de construção o maciço possui maior resistência ao cisalhamento e a sismos. A possibilidade de complementação dos drenos e extravasores durante a operação contribui para a segurança, a cada alteamento são anexados novos módulos à estrutura anterior (Figura 4). Como desvantagens tem-se o alto investimento inicial, a maior demanda de tempo em cada etapa e o alto gasto de material na construção. Este material deve vir de uma zona de empréstimo e possuir boa classificação geotécnica. Este tipo de barragem apresenta menos problemas justamente por se conhecer previamente todo o material constituinte da estrutura (CARDOZO et al., 2016).

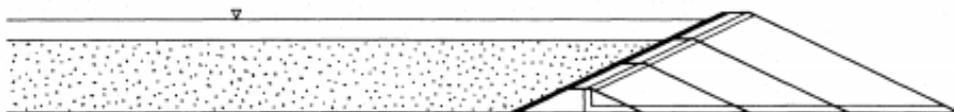


Figura 4: Alteamento a jusante
Fonte: adaptado de VICK (1990).

Para o alteamento a Montante, o dique inicial deve ter uma capacidade drenante muito alta, geralmente utilizando enrocamento de pé, galerias e tapetes que serão responsáveis por toda a drenagem futura da barragem. Os mecanismos de drenagem não poderão ser complementados futuramente (REZENDE, 2013).

Neste método, os alteamentos são executados utilizando o próprio material drenado da praia, assim, os alteamentos ficam sobre os próprios rejeitos de mineração

(CHAVES, 2012). Por este motivo, é o método menos seguro e mais susceptível à liquefação (CARDOZO et al., 2016). Como os alteamentos são realizados conforme o avanço de lavra, o valor da estrutura fica diluído no decorrer de sua operação. Esta é uma grande vantagem econômica e operacional que torna o método um dos mais aplicados.

A construção a montante não é capaz de armazenar os rejeitos totais. Estes rejeitos ocupam uma ampla faixa granulométrica e por isso, apresentam um comportamento muito complexo, difícil de ser descrito. Como o prisma de sustentação será formado pelo próprio material depositado, estes rejeitos totais devem ser classificados em espessadores ou hidrociclones, separando as lamas macias das areias competentes (CHAVES 2012).

Os dois rejeitos separados são lançados em áreas distintas. As lamas na parte posterior, no lago de decantação e as areias são espigotadas próximo à crista, formando a praia. A lagoa permite que as partículas finas se sedimentem e adensem enquanto a lâmina de água evita que poeiras sejam levantadas. O material formador da praia deve necessariamente possuir maior granulometria e assim, alta capacidade drenante (CHAVES, 2012).

Para realizar os alteamentos, esse rejeito arenoso localizado próximo aos pontos de lançamento é arrastado para a região da crista do talude por tratores. Esta nova berma é posteriormente compactada, formando um novo dique de alteamento. Conforme os alteamentos são executados, o eixo da barragem se desloca progressivamente para montante da estrutura permitindo disposição de mais material e consecutivos alteamentos (Figura 5). Esses alteamentos podem ser executados por equipamentos próprios da mina, corroborando com a economicidade e facilidade operacional do método.

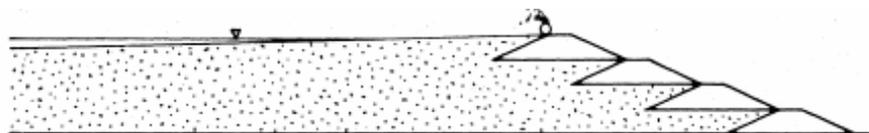


Figura 5: Alteamento a montante
Fonte: adaptado de VICK (1990).

As barragens construídas por este método apresentam grande dificuldade na caracterização geotécnica. Ao contrário de barragens a jusante que são homogêneas, as barragens a montante apresentam uma variabilidade muito grande e uma alternância entre os materiais constituintes. Isso acontece por que o produto enviado

pela planta de beneficiamento varia conforme diferentes frentes e teores minerais são lavrados. A dificuldade em caracterizar esse material reflete na incapacidade de gerar modelos matemáticos fiéis e de se realizar cálculos de fatores de segurança precisos (CARDOZO et al., 2016).

As barragens a montante são muito susceptíveis ao fluxo interno de água (*piping*) que pode carrear partículas e rapidamente causar rompimento de toda a estrutura. Estas estruturas apresentam grande extensão erodível na sua face, baixa resistência a carregamentos rápidos e a sismos (RESENDE, 2013). Para evitar a erosão pluvial do talude é feito o recobrimento da superfície com gramíneas ou outros materiais e são construídas canaletas de drenagem externas à estrutura do maciço (CHAVES, 2012).

O método de Alteamentos por Linha de Centro é o meio termo relativo entre os dois métodos anteriores, apresentando um equilíbrio entre suas vantagens. Apresenta um custo menor que a barragem de jusante e maior segurança que barragens a montante (CHAVES, 2012).

Enquanto os rejeitos são lançados a montante da barragem formando uma praia, os alteamentos são realizados a jusante da crista, conferindo maior estabilidade ao maciço. Isto não permite que coberturas superficiais sejam aplicadas na face do talude, fato que não representa grande desvantagem (SOARES, 2010).

Neste tipo de alteamento o sistema de drenagem pode ser sempre atualizado verticalmente (Figura 6). O material a jusante dos filtros internos permanece sempre drenado e mantém grande estabilidade (CARDOZO et al., 2016).

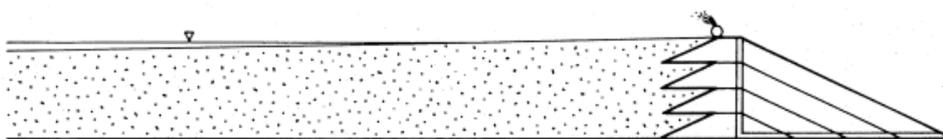


Figura 6: Alteamento por linha de centro

Fonte: adaptado VICK, (1990).

Na Tabela 1 podemos observar um comparativo de aplicações e detalhes de operação entre os diferentes métodos de alteamento. Ressalta-se que o projeto de uma barragem é único e a escolha a ser adotada vai depender dos objetivos de armazenamento pretendidos, bem como de limitações técnicas locais.

Tabela 1: Comparativo entre métodos construtivos

	Montante	Jusante	Linha de centro
Tipo de rejeito	Baixa densidade para que ocorra segregação	Qualquer tipo	Areias de lamas de baixa plasticidade
Descarga de rejeitos	Periférica	Independente	Periférica
Armazenamento de água	Não recomendável para grandes volumes	Bom	Aceitável
Resistência a abalos sísmicos	Baixa	Boa	Aceitável
Alteamentos	Ideal menos 10 m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Vantagens	Menor custo, utilizado onde há restrição de área	Maior segurança	Flexibilidade construtiva
Desvantagens	Baixa segurança suscetibilidade a liquefação e <i>piping</i>	Grande quantidade de material requerido proteção do talude a jusante apenas na configuração final	Necessidade de eficiente sistema de drenagem

Fonte: CARDOZO *et al.* (2016).

3.3 Operações de barragens

Alguns fatores devem sempre ser respeitados na operação de uma barragem, principalmente as de rejeitos e alteadas a montante. São eles: compactação ótima dos diques de alteamento, respeito do comprimento mínimo de praia, separação física entre areias e lama, atenção quanto à velocidade de carregamento de barragens e estado dos elementos de drenagem.

O material ciclonado nas plantas de beneficiamento é lançado a partir da crista da barragem através de plugues (*spigots*) (SOARES, 2010). Estes plugues são movimentados pelo comprimento da crista de modo que se depositem uniformemente. Devido às propriedades de segregação hidráulica, os grãos maiores se depositam próximos à zona de lançamento enquanto o material mais fino e leve é transportado por distancias maiores chegando até o lago de sedimentação.

As areias que constituem a praia possuem uma capacidade de drenagem maior que as lamas e é fundamental para barragens a montante que estes materiais não se misturem. A drenagem fica comprometida quando a largura de praia não é respeitada. Quando há o avanço do lago, formam-se laminações de argila em meio às areias. Como o coeficiente de permeabilidade hidráulica é menor para materiais finos, nestas laminações o fluxo descendente de água é obstruído e região fica mais propensa à saturação. A sobreposição de materiais é mostrada na Figura 7 e valores de permeabilidade para alguns rejeitos na Tabela 2.

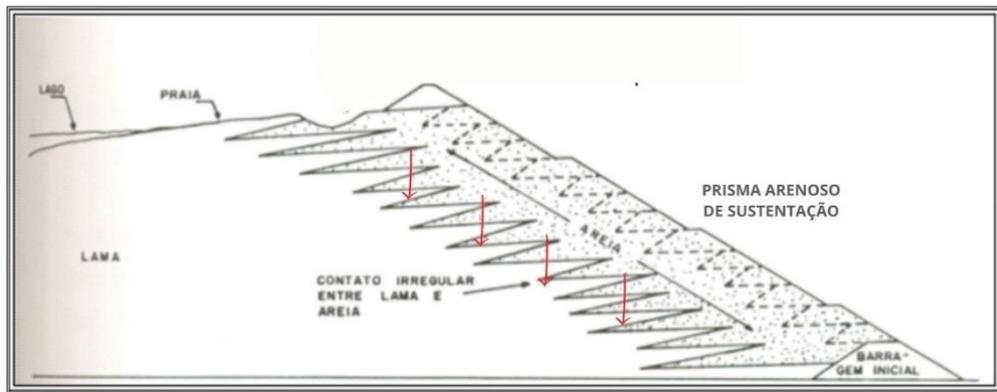


Figura 7: Alternância entre material depositado

Fonte: modificado de MACHADO (2007)

Tabela 2: Valores de permeabilidade hidráulica para diferentes rejeitos

Tipo de Rejeito	Permeabilidade (k) (cm/s)
Cliconado grosso, limpo, com menos de 15% abaixo de 74 μm .	10^{-2} a 10^{-3}
Espigotado, com até 30% abaixo de 74 μm .	10^{-3} a 5×10^{-4}
Lamas não plásticas ou de baixa plasticidade.	10^{-5} a 10^{-7}
Lamas de alta plasticidade.	10^{-4} a 10^{-8}

Fonte: SOARES (2010)

O comprimento mínimo da praia é determinado pelo ângulo de repouso do material, este depende da porcentagem de sólidos na polpa enviada pela usina de beneficiamento e do tamanho dos grãos (SOARES, 2010).

Na prática, podem ser construídos dois diques, um para o material granular e outro para as lammas, evitando que partículas se misturem fisicamente. Desta forma, também se garante que os finos plásticos estarão sempre apoiados sobre as areias mais resistentes ao cisalhamento e não o contrário.

As estruturas de drenagem são imprescindíveis e devem estar em perfeito funcionamento. No método a montante, os dispositivos de drenagem só podem ser instalados no dique inicial, não sendo possível a complementação após o início dos lançamentos, por isso, as galerias e tapetes devem ser robustos e resistentes.

São estes sistemas que garantem que as freáticas não tocarão a superfície do talude. Quando isso acontece, a estrutura apresenta surgências de água e pode se romper (CHAVES, 2015).

O fenômeno de *piping* ocorre em qualquer ocasião que o nível de água se eleve demais e é caracterizado pela erosão interna com fluxo de água, carreando partículas descontroladamente. À medida que o fenômeno se intensifica, quantidades maiores de materiais são transportados, gerando a instabilidade da estrutura e podendo causar a ruptura total (SOARES, 2010).

Os alteamentos também devem respeitar uma taxa máxima de alteamento. Essa taxa é estabelecida de acordo com as características geotécnicas do rejeito e representam o quanto de carregamento cíclico o material pode suportar. Essas taxas de carregamentos são determinadas por ensaios geotécnicos e por parâmetros como tempo de drenagem necessário, adensamento, granulometria, índice de umidade, e vazios. As taxas usualmente são estabelecidas em metros de alteamento mensais.

Os diques de alteamento devem estar compactados em um nível ótimo. É a compactação que garante que o material não apresentará comportamento fofo ou tendência de contrair quando carregado. É a tendência do material a se contrair que transfere as tensões do carregamento para a água nos vazios. Quando a compactação é ótima, o carregamento cisalhante induz as partículas a se expandirem, combatendo o aumento de poropressões (tensão exercida pelo fluido).

Como as barragens costumam se localizar em zonas mais baixas que a planta de beneficiamento para que a polpa seja transportada gravitacionalmente, acabam recebendo sedimentos de toda a área da mina. Esses materiais são muito variados e pertencem a uma ampla faixa granulométrica. Além disso, na região dos contatos com as obreiras pode também ocorrer erosão de material para a praia de sedimentação. Assim, estes materiais finos devem ser removidos da praia antes da realização dos alteamentos.

A vida útil de uma barragem é da ordem de anos chegando a décadas e muitas estruturas acabam não possuindo um histórico e caracterização muito precisos. De fato, várias empresas participam da construção de uma barragem, sendo diferentes responsáveis por projetos, alteamentos e construções iniciais. Durante a execução é imprescindível a elaboração de documentos que descrevam claramente as operações cotidianas, pequenos reparos e alterações.

De um modo geral, todos estes fatores acabam influenciando no controle das freáticas da barragem, e por isso, falhas ou omissões em qualquer uma destas etapas pode comprometer a segurança da barragem no longo prazo causando acidentes.

3.4 Acidentes Recentes

Os acidentes envolvendo barragens geram danos em proporções catastróficas. Estas estruturas armazenam uma quantidade enorme de materiais que podem devastar as áreas a jusante, contaminar o meio ambiente e causar perdas de vidas (ARCILA, 2020).

No ano de 2015 o rompimento da Barragem do Fundão causou a morte de 19 pessoas, e gerou um impacto ambiental ainda não visto no Brasil. O rompimento da barragem do Córrego do Feijão resultou em 259 mortes e na devastação de toda reserva ambiental vizinha. Esforços nacionais e internacionais se somaram na busca por vítimas e corpos, havendo ainda 11 desaparecidos.

As causas destes acidentes estão relacionadas com a alta presença de água que causa a instabilidade do maciço. Tanto na barragem de Mariana quanto em Brumadinho foram verificadas surgências que foram de ineficazmente combatidas, evidenciando o caráter saturado dessas barragens (MORGENSTERN et al., 2016; ROBERTSON et al., 2019).

A alta presença de água acarreta o fenômeno de liquefação das estruturas. Este foi o mecanismo de ruptura indicado nos relatórios apresentados posteriormente aos dois rompimentos (MORGENSTERN, et al., 2016).

O fenômeno acontece quando as poropressões entre os grãos aumentam em um agregado de partículas não coeso que tende a se contrair. Nestas estruturas fofas, os grãos tendem a se deslocar uns em relação aos outros diminuído de volume. Quando são submetidos a um carregamento, os espaços intergranulares são pressionados e se a condição for saturada a água responde ao carregamento com uma pressão normal nos poros. A poropressão (μ) é esta tensão exercida pela água nos vazios e atua como força desestabilizadora. As estruturas granulares possuem uma resistência ao cisalhamento característica (T) devido ao atrito entre as partículas do arranjo, é esta resistência que tende a manter a estrutura estável. As tensões efetivas (T') determinam a resistência total do conjunto de grãos e fluidos relacionando forças estabilizadoras e desestabilizadoras. Os altos valores de poropressão diminuem a resistência efetiva ao cisalhamento do material podendo reduzi-la a zero, fazendo com que uma estrutura antes sólida escoe e flua como um líquido viscoso. (ROBERTSON et al., 2019). O princípio das tensões efetivas:

$$T' = T - \mu$$

É de extrema importância identificar estas zonas saturadas nos prismas de sustentação para evitar o aumento da poropressão da água. Em Brumadinho, a saturação foi tardiamente verificada e houve uma tentativa de instalar drenos horizontais profundos (DHP) para abaixar o nível da freática. Posteriormente, uma série de sondagens foi feita para caracterizar o maciço de contenção. Foi durante uma destas perfurações que a barragem se rompeu. Ressalta-se a urgência com que esta situação deve ser diagnosticada e que ações invasivas podem funcionar como gatilhos em uma situação saturada crítica.

Embora exista uma série de equipamentos de monitoramento, como piezômetros e indicadores de níveis de água, nem sempre estes aparelhos estão funcionando ou a verificação não é suficientemente frequente. A utilização de equipamentos com sensores eletrônicos permite o controle contínuo dos parâmetros em intervalos curtos de tempo da ordem de minutos. Deve ser instalado um *data-logger* capaz de registrar os dados e elaborar históricos para interpretação temporal das condições. O uso destas tecnologias assim como a contratação de pessoal técnico especializado tem um custo elevado. Nesse sentido a geofísica se apresenta como alternativa viável apresentando vantagens tanto financeiramente quanto em tempo gasto na obtenção de dados e em abrangência da zona amostrada (ARCILA, 2020).

3.5 Métodos Geofísicos Elétricos

Para monitorar as barragens temos uma variedade de aparelhos e equipamentos de aferição direta: marcos topográficos, INA's, piezômetros, etc. Entretanto estes equipamentos fornecem uma descrição pontual das condições das barragens. A fim de obter seções descritivas mais amplas podemos realizar investigações geofísicas como método complementar.

A geofísica investiga as diferentes propriedades físicas dos materiais terrestres, algumas das propriedades analisadas são: gravimetria, magnetometria, resistência elétrica, sísmica dentre outras. Uma propriedade bem documentada e útil na obtenção de dados relativos à presença de água são as propriedades elétricas.

A aplicação da metodologia geoeletrica se baseia em estudos das propriedades elétricas e magnéticas dos materiais da subsuperfície analisando parâmetros como a facilidade de condução de corrente, potencial elétrico espontâneo, potencial elétrico induzido e susceptibilidade magnética (BRAGA, 2006).

Os resultados das sondagens são seções que apresentam os valores de susceptibilidade eletromagnéticas para cada coordenada (x, y). Os métodos são muito utilizados para profundidades rasas (até 100 m) e apresentam alta precisão neste domínio.

No estudo de Barragens, a geofísica pode ser utilizada para identificar as zonas de saturação, bem como os teores de água, níveis freáticos e caminhos de fluxo preferenciais. Através dos métodos elétricos podemos identificar eficientemente estas regiões saturadas pois estes locais apresentarão resistência elétrica consideravelmente menor que os materiais secos.

Podemos obter uma imagem que permite compreender a distribuição de zonas de baixa resistência no interior do maciço traçando linhas nas várias cotas da barragem. Associando estas seções, podemos ter uma ideia melhor através de uma perspectiva simples da presença de água em todo o maciço

Estudos geofísicos já vem sendo realizados no Brasil, Síria, Estados Unidos (CAMARERO, 2016), Noruega (MAINALI, 2006), e tem se mostrado eficientes em realizar a caracterização destas estruturas. A geofísica contribui agregando dados e informações aos que já se tem, aumentando a precisão dos trabalhos geotécnicos. É uma alternativa barata que é capaz de caracterizar rapidamente uma estrutura (CAMARERO, 2016).

A grande vantagem da geofísica elétrica é que ela pode gerar imagens de todo interior da barragem numa correspondência de superfícies. Quando essas seções são associadas e sobrepostas podemos obter uma superfície em três dimensões do subsolo. Através do contraste entre as propriedades podemos estabelecer o contato entre os diferentes materiais e sua umidade.

Podemos ainda utilizar os equipamentos de monitoramento direto presentes na barragem para parametrizar ou para verificar se os dados inferidos estão corretos validando as campanhas realizadas.

As propriedades eletromagnéticas são: Eletrorresistividade, Polarização induzida (IP), Eletromagnético e Potencial Espontâneo (SP).

3.5.1 Eletroresistividade

O objetivo desta aquisição é estimar a resistência dos solos próximos pela introdução de uma corrente artificial (SAMOUE *et al.*) A resistividade é uma propriedade inversa à condutibilidade elétrica. O método explora a dificuldade que os diferentes materiais possuem em conduzir corrente elétrica (CAMARERO, 2016).

Os valores de resistência elétrica são obtidos através da lei de Ohm, que postula a voltagem apresentada por um corpo atravessado por uma corrente elétrica. Fisicamente, a diferença de potencial (V) observada entre dois extremos será diretamente proporcional à corrente (I) a que está submetido (Figura 8). Esta constante de proporcionalidade (R) é denominada resistência.

$$V = R \cdot I$$

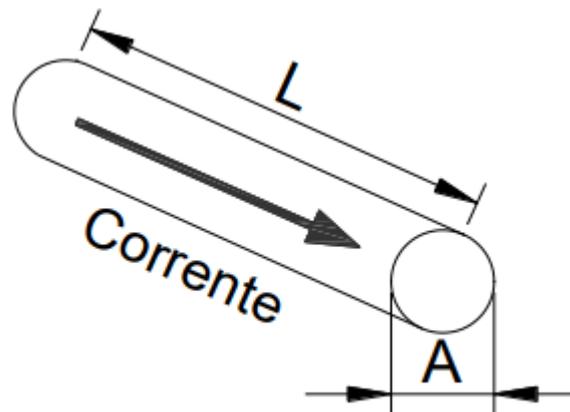


Figura 8: Corpo linear atravessado por corrente elétrica
Fonte: modificado de HALLIDAY *et al.* (2009)

Porém, em um corpo tridimensional, a resistência será proporcional ao comprimento (L) e inversamente proporcional à área da seção transversal (A). Obteremos por fim um coeficiente de resistência adimensional (ρ) através da equação:

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

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

Substituindo na Lei de Ohm teremos a diferença de potencial dada por:

$$V = \rho \cdot \frac{L}{A} \cdot I$$

Considerando uma medida de campo onde a distância será um raio r e a área $2\pi r^2$ a resistência R será:

$$R = \rho \cdot \frac{r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r}$$

A voltagem e a resistividade serão:

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

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

Para um arranjo hipotético de um semiespaço em superfície como o da Figura 9, os potenciais nos eletrodos M e N serão respectivamente:

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

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

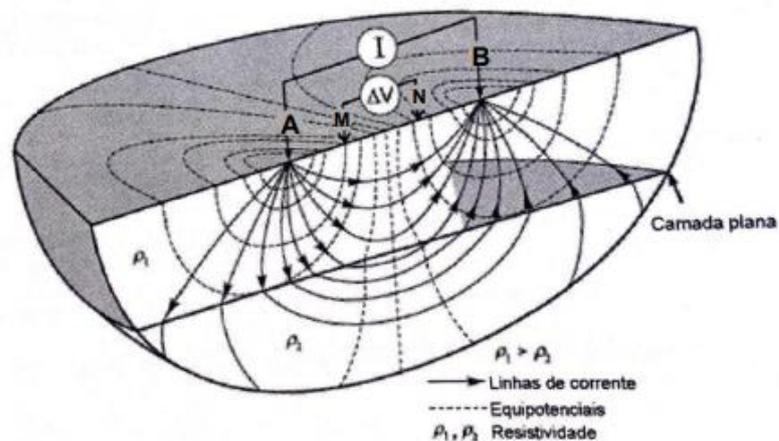


Figura 9: Distribuição de potenciais no semiespaço
Fonte: KNÖDEL *et al.* Apud. CAMARERO, (2016).

A diferença entre eles ΔV será:

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

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

Com a voltagem obtida pelos eletrodos, podemos calcular a Resistência Aparente (ρ_a) do material que é o objetivo da análise. A resistência aparente é dada por:

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

Onde:

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

Dizemos aparente pois o valor corresponde ao que seria a resistência de um material homogêneo na subsuperfície. Na prática não temos materiais homogêneos e por isso devemos associar vários eletrodos e realizar uma inversão dos valores obtidos, após a diferenciação destes vetores sobrepostos conseguimos identificar cada material.

3.5.2 Polarização Induzida

Já a polarização induzida (IP), analisa a propriedade que os materiais possuem de atuar como um capacitor, ou seja, armazenar carga por um período de tempo. Quando submetido a uma corrente elétrica, o material adquire voltagem, apresentando diferença de potencial (BRAGA, 2006). Quando é cessada a corrente, os materiais ainda se mantêm eletrizados por um determinado tempo. A maior capacidade de reter um potencial elétrico depende das características deste material e varia de acordo com sua composição. Este fenômeno observado é a polarização induzida por corrente artificial. Este tipo de análise é feito mantendo a diferença de potencial fixa, variando a frequência ou tempo submetido. Essa variação de potencial tem valores muito baixos, e é o comportamento da curva de descarga do potencial no tempo o objeto principal destes estudos.

De acordo com Braga (2006), as origens da polarização induzida são atribuídas a dois fatores. A primeira é chamada polarização eletrônica ou metálica, ela acontece quando uma partícula metálica está em um meio submetido a uma corrente elétrica (Figura 10). Enquanto as cargas se deslocam no meio, os materiais metálicos polarizam suas extremidades no sentido que a corrente elétrica se desloca. As cargas internas se movem transferindo a corrente através do corpo. Quando a diferença de potencial é finalizada as cargas se reorganizam em seu estado inicial neutralizando

novamente o corpo. Esta neutralização leva um intervalo de tempo para acontecer. A polarização eletrônica será menor quanto maior ou mais contínuo for o corpo metálico.

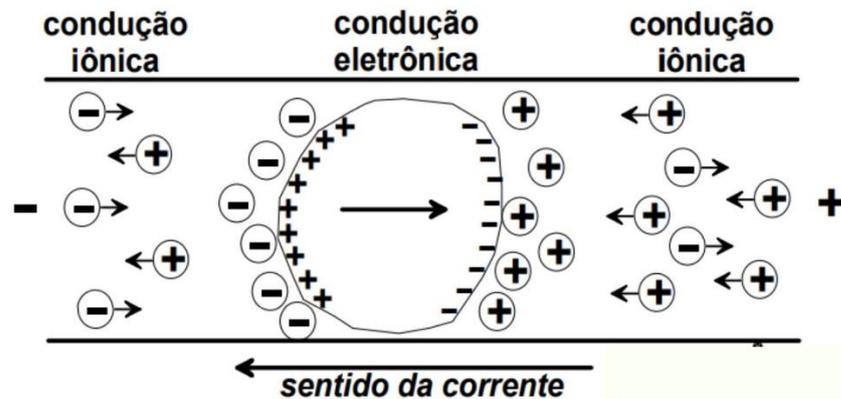


Figura 10: Polarização Eletrônica

Fonte: BRAGA (2006).

Uma segunda forma é denominada polarização de membrana (Figura 11). Este tipo de polarização ocorre em meios saturados com presença de minerais muito finos (normalmente argilas). Estes minerais carregam-se negativamente e atraem íons positivos para sua proximidade. Quando o meio é submetido a uma corrente elétrica estes ânions de argila permitem a passagem de cargas positivas enquanto as negativas são bloqueadas, concentrando-as em determinadas regiões e gerando zonas de deficiência de cargas. Após o final da corrente elétrica, as concentrações de carga demoram um certo tempo para se neutralizar. A quantidade de tempo necessária vai depender da quantidade de argilas e de íons presentes.

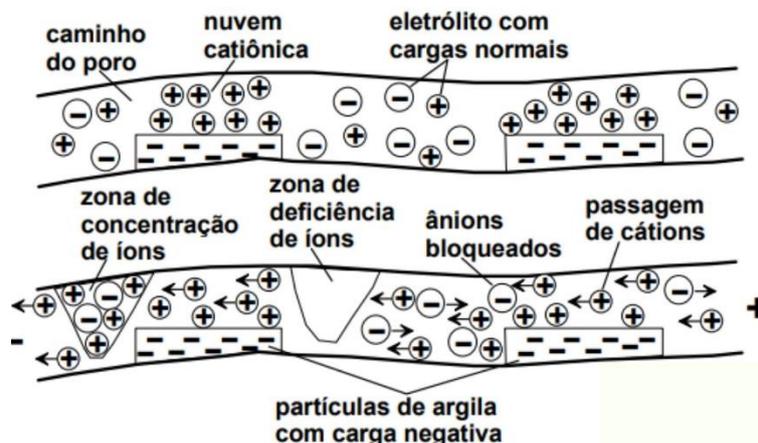


Figura 11: Polarização de Membrana

Fonte: BRAGA (2006).

Algumas considerações são feitas por Braga (2006), a partir de resultados empíricos aplicados aos estudos de hidrogeologia. A primeira é que areias apresentam valores muito baixos de polarização, principalmente silicosas. A natureza das argilas determina fortemente nos valores de polarização para este tipo de material. Quando temos materiais não homogêneos formados por várias granulometrias, as voltagens observadas são bem maiores que em materiais puramente finos. A polarização normalmente tem comportamento inverso ao da condutibilidade, portanto matérias menos condutores apresentam maiores valores de IP.

Como citado anteriormente, os valores de polarização variam no tempo. Quando submetemos um material na terra a uma diferença de potencial (chamada primária) o material se polarizará e terá uma diferença de potencial própria. Esta diferença de potencial atinge um valor máximo de acordo com suas características eletrônicas e quando a corrente é cortada ele leva um intervalo de tempo para se descarregar até chegar ao valor inicial igual a zero. A curva formada pela voltagem em função do tempo gasto para se descarregar é característica de cada material. A área sob a curva é a cargabilidade (M) e é medida em Volts pelo intervalo de tempo (Figura 12).

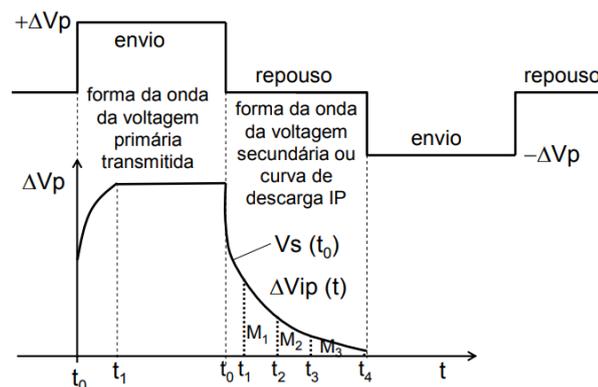


Figura 12: Polarização Induzida no domínio do tempo

Fonte: BRAGA (2006).

3.5.3 Eletromagnético

Os métodos eletromagnéticos utilizam-se de duas propriedades dos materiais: indução e magnetização. Uma antena submetida a uma corrente elétrica emite pulsos

eletromagnéticos que quando atinge os materiais em profundidade geram correntes elétricas que induzem novos pulsos eletromagnéticos.

Denominamos Corrente Primária a corrente elétrica que passa pelo fio emissor (antena), esta corrente gera um Campo Eletromagnético Primário nas proximidades enquanto a percorre. Em subsuperfície o campo eletromagnético gerado pela antenna induz no material uma Corrente Secundária e este, um subsequente Campo Secundário. Este fenômeno é conhecido como indução eletromagnética e as variações entre os dois campos se devem à influência dos materiais e devido à condução da corrente secundária. Quando realizamos um levantamento eletromagnético estamos, na verdade, obtendo o campo magnético resultante. Este campo é basicamente a diferença entre os campos primário e o secundário. Os campos eletromagnéticos secundários vão indicar a maior ou menor susceptibilidade magnética dos materiais.

Os campos eletromagnéticos possuem uma faixa muito grande de frequências. A escolha da frequência vai depender da profundidade que se deseja investigar. A profundidade será inversamente proporcional à frequência das ondas emitidas, ou seja, quanto mais altas as frequências, menor o poder de penetração, porém maior será a definição das imagens obtidas.

A utilização do GPR (*ground penetration radar*) visa obter imagens de alta qualidade em baixas profundidades para isso utiliza-se uma antenna capaz de gerar ondas de alta frequência (VHF – *very high frequency* entre 10 e 1000 MHz) e baixa penetração. As imagens obtidas e processadas pelo computador são capazes de mostrar com clareza feições em profundidades até 40 metros, revelando os contrastes de permissividade dielétrica e estabelecendo horizontes entre elas. Essa propriedade pode variar com a presença de água ou grau de compactação do material, daí seu uso em investigação de barragens.

3.5.4 Potencial Espontâneo

Outro método elétrico é o Potencial Espontâneo ou *self potential* (SP), através dele é possível observar as interações que ocorrem naturalmente entre os materiais dos solos, os fluidos e íons presentes em seus vazios. É dito espontâneo pois não utiliza correntes artificiais, apenas eletrodos de captação. As diferenças de potencial observadas devem-se a uma série de processos eletroquímicos naturais, movimentos

de íons presentes nos fluidos do subsolo, diferenças em gradientes geotérmicos, fluxo de água subterrânea e às correntes magneto telúricas.

As diferenças de potenciais geradas espontaneamente variam pelas ordens de milivolts e podem ser maiores ou menores dependendo dos materiais no subsolo. Minerais como magnetita, grafita ou outros bons condutores apresentarão voltagens maiores, assim como matérias com grande presença de fluidos em seus poros. (MAINALI 2006)

Uma das causas em estudo destes potenciais é o campo magnético externo da Terra, este induz uma série de correntes de baixa intensidade na superfície terrestre – as correntes telúricas. Estes materiais submetidos a correntes apresentam diferenças de potenciais ponto a ponto. Estas diferenças podem ser observadas pela simples colocação de eletrodos no solo. A diferença de potencial observada possui dois valores associados, um fixo em uma única direção devido aos processos químicos, elétricos e fluxo de fluidos e outro muito pequeno e intermitente variando temporalmente devido à indução das correntes telúricas pelo campo magnético gravitacional terrestre.

Uma fonte muito importante de diferença de potencial natural é o movimento de água subterrânea. A água saturada por sais (cátions) se desloca através do solo e de fraturas nas rochas. A região de origem fica com um déficit de cargas positivas surgindo uma diferença de potencial natural em direção à zona de percolação da água. Nesse sentido o método é muito eficiente na identificação de fluxos (MAINLI 2006).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Adotou-se para este estudo três campanhas geofísicas realizadas em diferentes barragens. Depois da verificação dos resultados obtidos em cada trabalho foram feitas considerações a respeito da capacidade de investigação e sua possível aplicação num contexto dos acidentes ocorridos nas cidades de Mariana e de Brumadinho caracterizados pela alta saturação.

Para obter os dados elétricos, necessários na investigação do objetivo desta pesquisa, uma técnica adotada é a do Caminhamento Elétrico (CE) com arranjo dipolo-dipolo (Figura 13). Este arranjo visa obtenção dos dados em lateralidade. São utilizados dois eletrodos AB que introduzem corrente no solo enquanto outros dois eletrodos MN fazem a medição da voltagem gerada. A grande vantagem desta configuração é que o centro de investigação se desloca lateralmente sem que se precise mover ou reposicionar os eletrodos. A profundidade teórica do alcance é metade da distância entre os eletrodos emissores e receptores.

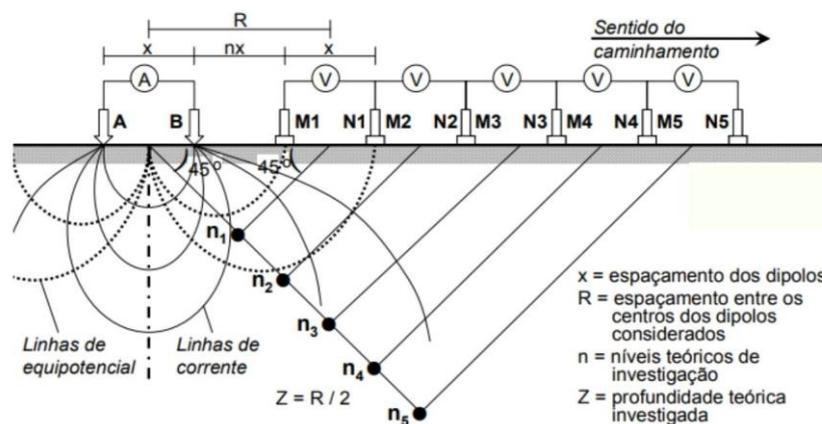


Figura 13: Eletrodos em arranjo Dipolo-Dipolo

Fonte: BRAGA (2006).

Outra técnica utilizada é a tomografia elétrica, ou sondagem elétrica vertical (SEV) (Figura 14). Os eletrodos podem seguir o arranjo de Schlumberger, nele os eletrodos receptores (MN) ficam fixos e posicionados no centro de aquisição enquanto os eletrodos emissores de corrente (AB) ficam nas extremidades. Os eletrodos AB são afastados em razões iguais permitindo ganho de profundidade vertical na investigação. A profundidade teórica de alcance será aproximadamente um quarto do afastamento dos eletrodos. Os dados coletados nas campanhas são uma sobreposição de vetores de resistências ou polarização através de um plano. Estes

dados devem ser interpretados através de softwares que utilizam métodos de inversões de quadrados para atribuir valores a blocos em verticalidade na linha investigada (ARCILA, 2020).

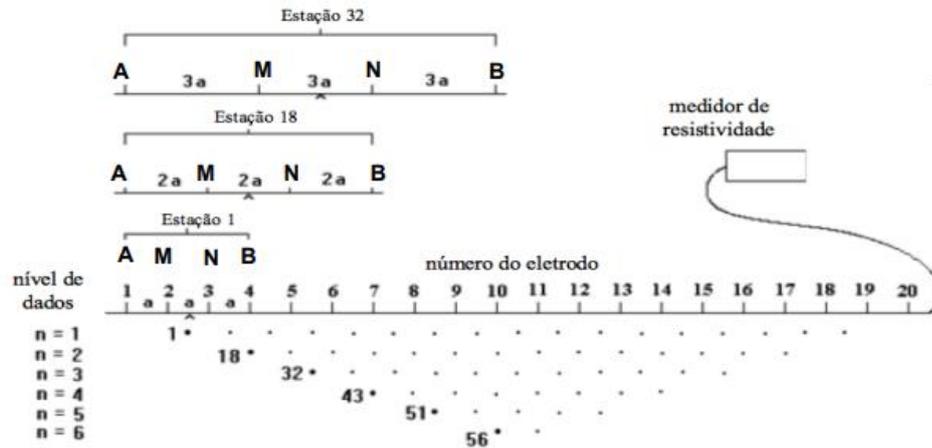


Figura 14: Arranjo de eletrodos em SEV
Fonte: Loke *apud*. ARCILA (2020)

Esta interpretação inicial é feita em duas dimensões e fornece imagens de seções das superfícies amostradas. Os resultados podem ser exibidos em cores, normalmente em escalas logarítmicas. Usualmente, as cores mais frias representam zonas menos resistivas, indicando a presença de água, enquanto zonas mais quentes indicam maiores resistividades e, portanto, materiais mais secos.

As imagens podem ser integradas através da associação de consecutivas seções. Os valores dos blocos são extrapolados e os máximos e mínimos são eliminados obtendo uma superfície mais suave (*flat*). Através dessa associação pode-se construir um modelo de blocos tridimensional que permite a fácil visualização das resistências em diversos pontos. Utilizando esta metodologia, os estudos abaixo apresentam seções 2D e um modelo 3D das sondagens elétricas de barragens.

4.1 Sondagens Geofísicas

O primeiro estudo considerado foi uma dissertação da Unesp realizado no município de Poços de Caldas e descreve uma barragem projetada para conter rejeitos do processamento de urânio. Os dois estudos seguintes foram realizados por acadêmicos da UFRJ em barragens para armazenar lama resultante do processamento de minério de fosfato, sendo uma em Tapira - MG e a outra em Cajati

- SP. Este capítulo contém as características e os detalhes das barragens analisadas e da obtenção dos dados das campanhas.

4.1.1 Barragem UTM, Poços de Caldas - MG

A investigação realizada na Unidade de Tratamento de Minérios (UTM) pertencente às Indústrias Nucleares Brasileiras (INB) tinha como objetivo estudar zonas de fluxo no interior da estrutura e diagnosticar as causas de surgências observadas em uma área a jusante da barragem.

A barragem recebe os rejeitos do minério de urânio proveniente da mina Osamu Utsumi localizada no município de Poços de Caldas no estado de Minas Gerais. Durante suas operações, a usina processava o minério através de etapas de cominuição e concentração a fim de obter uma polpa chamada Yellow Cake, responsável por alimentar reatores nucleares. As grandes quantidades de rejeitos eram então alcalinizadas com carbonato de cálcio e óxido de cálcio e então lançados na barragem com teores abaixo de 170 PPM de U_3O_8 . (OLIVEIRA, 2010).

A barragem para armazenamento destes rejeitos foi construída utilizando enrocamento e solo com dois horizontes de deposição a jusante atingindo uma altura de 42 m (Figura 15). O sistema de monitoramento conta com 20 piezômetros do tipo Casagrande e 23 piezômetros pneumáticos. O sistema de drenagem conta com um filtro e um dreno vertical ligado a um tapete na zona inferior do maciço.

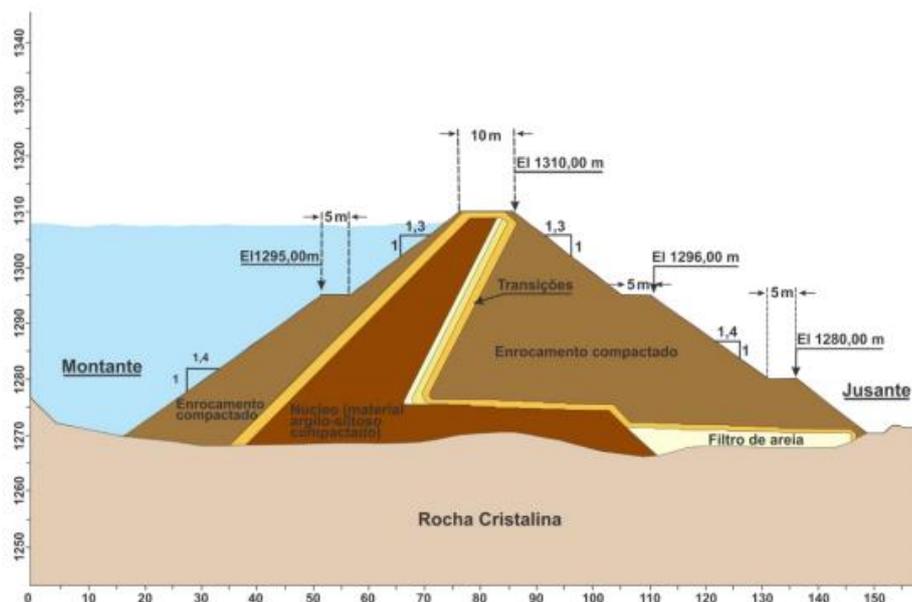


Figura 15: Esquema do projeto executivo da barragem da mina Osamu Utsumi
Fonte: ARCILA (2020).

Na região a jusante da barragem existem reservatórios para tratar os efluentes e reduzir a quantidade de material radioativo por precipitação podendo finalmente descartar a água no meio ambiente.

Ao final deste processo existe a garantia que o meio ambiente não será contaminado. Foi justamente pela preocupação suscitada devido à surgência na região que a campanha geofísica foi realizada.

A aquisição dos dados ocorreu em meados de 2020 e foi feita em cinco linhas com espaçamento entre eletrodos de 6 m. O alcance total da investigação foi estimado em 70 m de profundidade

As campanhas para obtenção de dados de resistividade foram realizadas a partir da crista da barragem (Figura 16). As 3 primeiras com comprimento de 114 m estavam localizadas no talude superior. As linhas 4 e 5 com 230 m foram realizadas nos dois níveis inferiores a jusante. A técnica de obtenção das resistividades em profundidade foi a tomografia elétrica com eletrodos em arranjo Schlumberger.



Figura 16: Vista aérea da barragem com indicação das linhas geofísicas, detalhe para a surgência observada a jusante

Fonte: ARCILA (2020).

O equipamento utilizado foi o suco ABEM Terrameter LS de 84 canais e potência de 250W capaz de obter dados de resistividade, potencial espontâneo e potencial induzido (Figura 17).



Figura 17: Equipamentos e trabalhos de aquisição na UTM

Fonte: ARCILA (2020). A) Conexão dos eletrodos metálicos. B) Aquisição de dados no patamar da barragem C) Resistivímetro ABEM Terrameter LS

A interpretação dos valores de resistividade ou potencial é feita pelo software Res2dinv (2D) que faz a inversão dos valores obtendo gráficos de resistividade em função de sua profundidade. O software interpreta os valores bidimensionais através da elaboração de um modelo de blocos, atribuído valores a estes por uma regra de mínimos quadrados (LOKE apud ARCILA, 2020). O modelo em 2D foi trabalhado no programa Oasis Montaj Geosoft que realizou a interpolação das seções elaborando um modelo de blocos tridimensional (3D).

4.1.2 Barragem BR, Tapira - MG

Localizada no sudeste de Minas Gerais, a Barragem BR do complexo de mineração Tapira é operada pela Mosaic Fertilizantes S./A. e recebe os rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de fosfato, a apatita (Figura 18). Além de conter os rejeitos, a estrutura permite o armazenamento e subsequente reaproveitamento de água, bem como a extravasão de água pluvial em excesso (RODRIGUES, 2018).



Figura 18: Vista frontal da Barragem BR

Fonte: RODRIGUES (2018).

A campanha geofísica realizada no local tinha por objetivo complementar os sistemas existentes de monitoramento da barragem e constituía pesquisa para um trabalho final do curso de Geologia da UFRJ. Foram realizadas campanhas de obtenção de dados relativos à resistividade, à capacidade de polarização induzida da estrutura assim como a utilização do GPR.

A estrutura da barragem estudada foi alteada por linha de centro em dois alteamentos atingindo 61 m de altura (cota 1200 m) em 1989 (Figura 19). Os alteamentos utilizaram areia de magnetita compactada mecanicamente a jusante enquanto os rejeitos eram lançados hidráulicamente a montante formando uma praia de sedimentação. Em 2019 uma berma de reforço foi feita utilizando enrocamento, posteriormente foi coberta com uma camada de magnetita até a cota de 1160 m. O sistema de drenagem interna contava com dois tapetes drenantes (Figura 20) e drenos laterais (Figura 21); um extravasor em forma de canaleta sob a encosta do lado direito complementa o sistema.

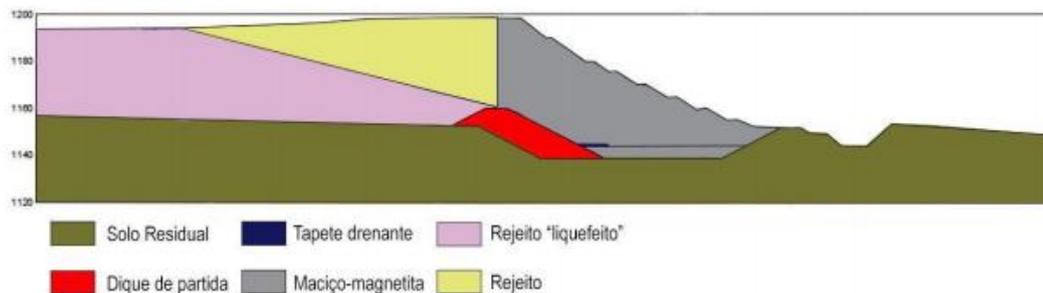


Figura 19: Seção ilustrativa da Barragem BR e materiais constituintes
Fonte: RODRIGUES (2018).

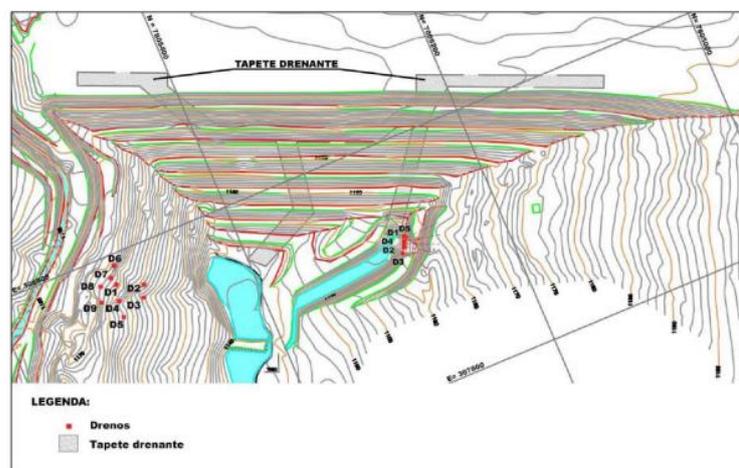


Figura 20: Localização dos tapetes drenantes
Fonte: RODRIGUES (2018).

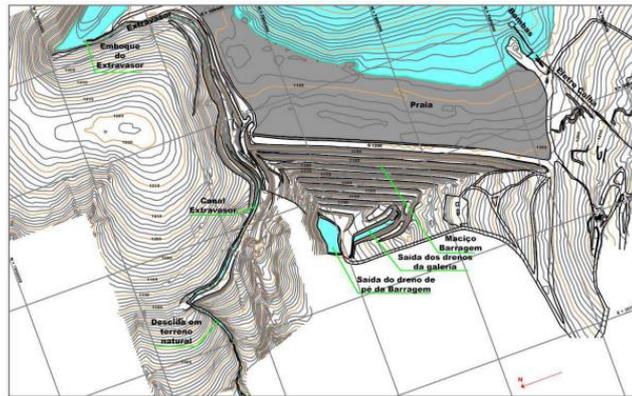


Figura 21: Canal extravasor e saída dos drenos
Fonte: RODRIGUES (2018).

O sistema de monitoramento da barragem conta com 1 piezômetro, 14 indicadores de nível de água, 3 medidores de vazão, 11 marcos topográficos, medidor de nível no represamento, 1 pluviômetro e 1 evaporímetro (RODRIGUES, 2018).

A aquisição dos dados de resistividade e polarização foram feitos através da técnica de caminhamento elétrico com espaçamento de 3 m entre os eletrodos em arranjo dipolo-dipolo. Foram realizadas 10 linhas de aquisição, as nove primeiras sobre o maciço e a décima (L10) sobre a ombreira direita. A posição das linhas está indicada na Figura 22 e os respectivos comprimentos na Tabela 3.

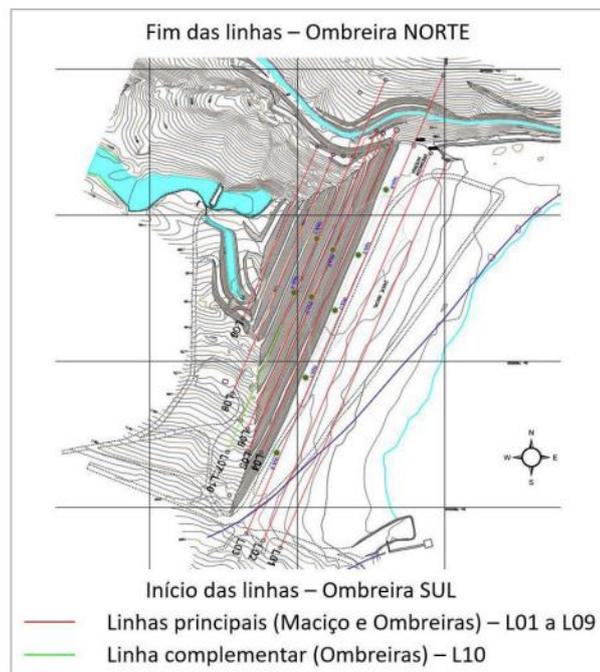


Figura 22: Localização das linhas principais e complementares do caminhamento elétrico
Fonte: RODRIGUES (2018).

Tabela 3: Comprimento das linhas de aquisição

Nome da linha	CE/IP Comprimento (m)
L-01	585,00
L-02	583,00
L-03	691,00
L-04	479,00
L-05	475,00
L-06	447,00
L-07	516,00
L-08	365,00
L-09	265,00
L-10	188,00

Fonte: RODRIGUES (2018).

O equipamento utilizado foi o resistímetro SuperSting R8 com 64 canais capaz de coletar os dados de resistência e cargabilidade (IP) (Figura 23). Os eletrodos foram umedecidos para facilitar a inserção no barramento e melhorar as leituras obtidas



Figura 23: Resistímetro SuperSting utilizado
Fonte: RODRIGUES (2018).

Além da campanha de resistividade e cargabilidade, a sondagem com GPR (*Ground Penetration Radar*) foi feita sobre as mesmas linhas anteriores (Figura 24). Devido às limitações do aparelho, as ombreiras não foram amostradas. O equipamento utilizado foi o SIR3000 do fabricante GSSI, com a antena de 100 MHz que foi escolhida foi ensaios prévios (RODRIGUES, 2018). Os comprimentos das linhas são apresentados na Tabela 4.



Figura 24: Aquisição de dados por GPR
Fonte: RODRIGUES (2018).

Tabela 4: Comprimento das linhas de aquisição por GPR

Nome da linha	GPR Comprimento (m)
L-01	585,00
L-02	583,00
L-03	578,00
L-04	479,00
L-05	475,00
L-06	409,00
L-07	394,00
L-08	365,00
L-09	265,00
L-10	188,00

Fonte: RODRIGUES (2018).

4.1.3 Barragem B1, Cajati - SP

A campanha geofísica realizada na Barragem B1 foi resultado de uma parceria entre o Centro de Pesquisas em Geofísica Aplicada (CPGA) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Mosaic Fertilizantes. O resultado final foi publicado no Anuário do Instituto de Geociências da universidade.

A Barragem B1 do Complexo de Mineração de Cajati se localiza no sul do município de Cajati no estado de São Paulo. A barragem também é operada pela Mosaic Fertilizantes S./A. e recebe os rejeitos do beneficiamento de minérios de fosfato. A barragem foi construída a partir de 1973 e seus alteamentos foram executados de forma mista, mesclando alteamentos a montante a jusante, resultando em uma estrutura complexa (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019).

A barragem é monitorada constantemente por equipamentos de aferição direta, sendo: 1 piezômetro do tipo Casagrande, 6 piezômetros elétricos, 13 indicadores de

nível de água (INA's), 9 marcos topográficos superficiais, 1 régua graduada no reservatório e um pluviômetro. A localização da barragem e a posição de alguns equipamentos de monitoramento podem ser vistos na Figura 25 (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019).



Figura 25: Localização da Barragem B1, destaque para a localização dos indicadores de nível de água em azul e piezômetros em vermelho
Fonte: ALBUQUERQUE *et al.* (2019).

A Figura 26 mostra um esquema de construção da barragem e a localização das cotas de investigação geofísica. Os cinco primeiros alteamentos foram realizados a jusante; o sexto, sétimo e oitavo a montante. Um nono alteamento está sendo construído pelo método de jusante. Destaque para os materiais, a zona de deposição de lamas de apatita e drenos internos na figura.

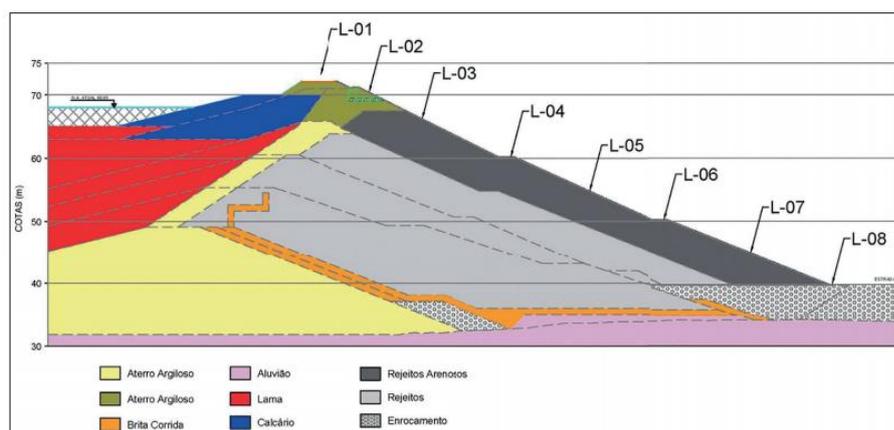


Figura 26: Perfil da barragem com indicação dos drenos, fases construtivas e locais das linhas geofísicas executadas
Fonte: ALBUQUERQUE *et al.* (2019).

A sondagem geofísica da barragem foi feita com o objetivo de divulgar e tornar a aplicação do método mais visível neste tipo de investigação no cenário nacional. As

interpretações dos dados foram realizadas pelo Centro de Pesquisas Geológicas Aplicadas da UFRJ e pela equipe técnica da Mosaic que administra e opera a barragem.

Na aquisição foram coletados dados de batimetria do lago e de eletrorresistividade do material constituinte do maciço por caminhamento elétrico. O presente trabalho se ateve aos resultados de eletrorresistividade do estudo. Através de testes prévios, optou-se pela utilização do arranjo dipolo-dipolo pois produziu menos ruídos e teve uma melhor resolução vertical (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019).

No total, foram mais de 3300 metros de dados coletados alcançando uma profundidade entre 30 a 40 metros através de 14 linhas de coletas com espaçamento entre eletrodos de 3 metros. Inicialmente foram utilizadas 8 seções percorrendo todo o maciço. Após uma análise previa dos dados, foi verificada a persistência de uma anomalia próxima à ombreira esquerda da barragem. Para realizar o detalhamento desta área foram coletados dados em mais 6 linhas (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019).

O equipamento utilizado foi o SAS 400 da ABEM e o software da inversão 2D foi o Res2DInv versão 3.59 da Geotomo. As oito primeiras linhas de caminhamento elétrico realizado estão representadas na Figura 27 em cor rosa e em azul as seis seguintes.

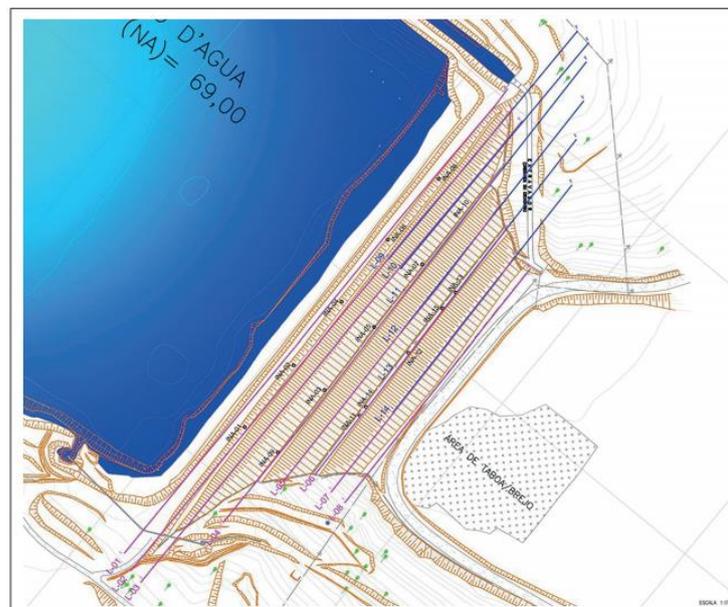


Figura 27: Localização das linhas de aquisição de dados
Fonte: ALBUQUERQUE *et al.* (2019).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das três campanhas geofísicas são demonstrados neste capítulo bem como as respectivas interpretações e principais conclusões de cada pesquisa.

5.1 Barragem UTM

A apresentação dos dados em imagens segue uma escala logarítmica. As cores mais frias representam locais com menores resistências (5 a 20 Ohms), indicando a presença de água. Os locais com cores mais quentes representam locais mais resistivos (300 a 600 Ohms) e indicam áreas secas. Nas Figuras 28 a 32 estão representadas as seções das Linhas 1 a 5. As cotas são exibidas bem como os valores de resistência correspondentes.

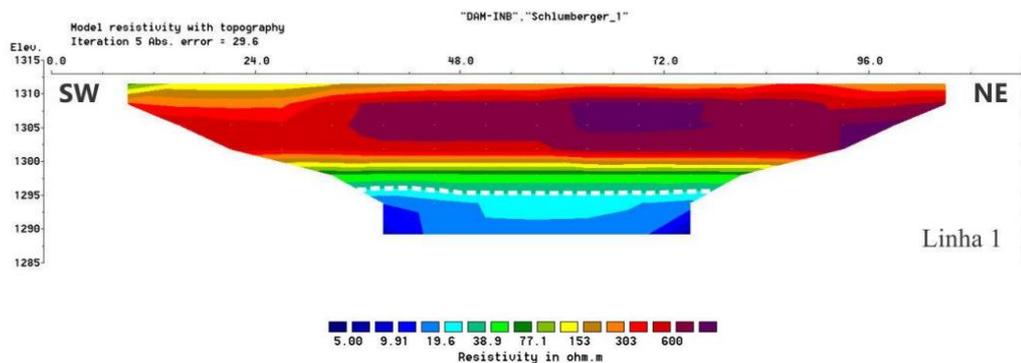


Figura 28: Eletrorresistividade da seção 1
Fonte: ARCILA (2020).

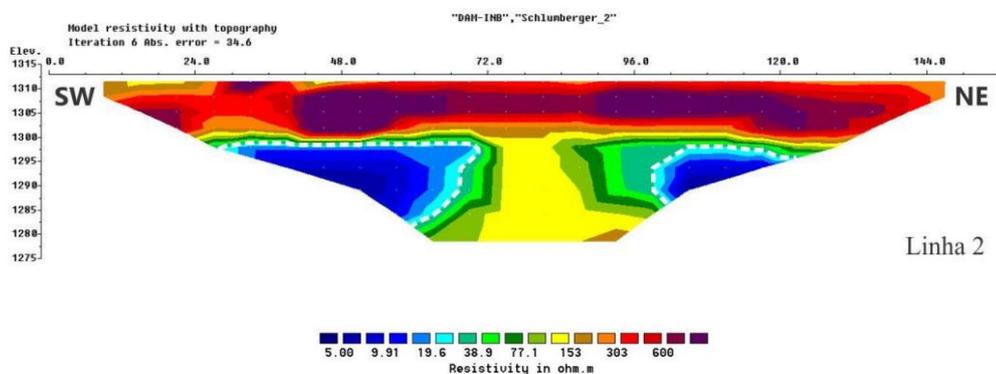


Figura 29: Eletrorresistividade da seção 2
Fonte: ARCILA (2020).

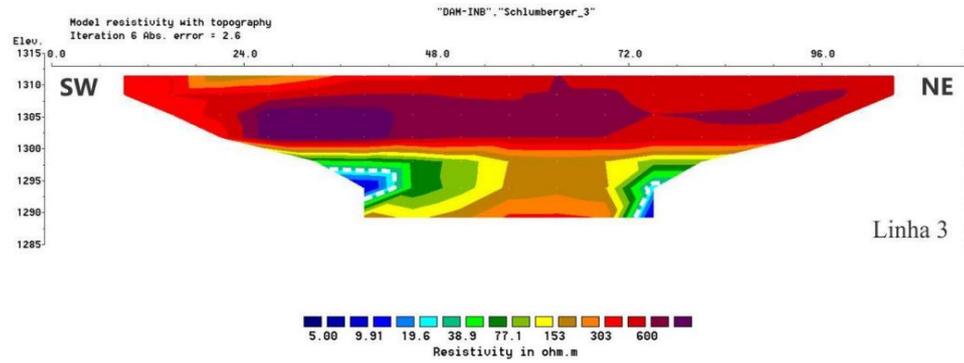


Figura 30: Eletrorresistividade da seção 3
Fonte: ARCILA (2020).

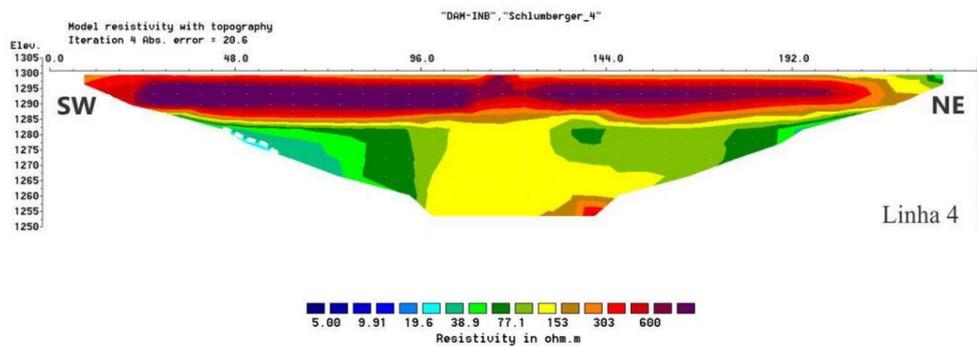


Figura 31: Eletrorresistividade da seção 4
Fonte: ARCILA (2020).

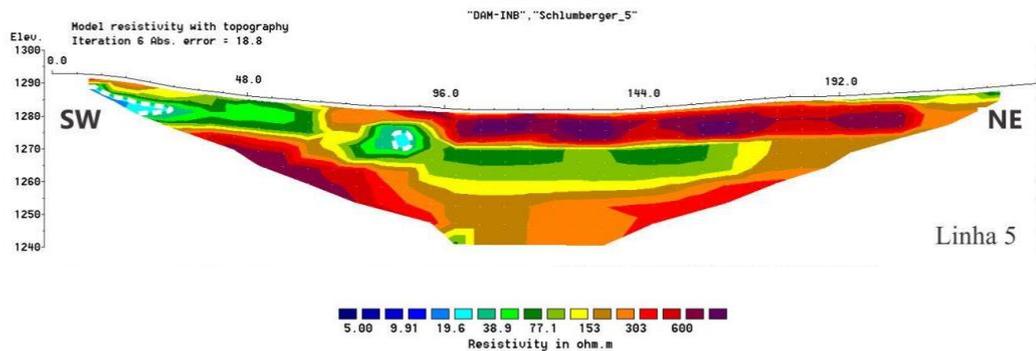


Figura 32: Eletrorresistividade da seção 5
Fonte: ARCILA (2020).

Entre as linhas 1 e 3, realizadas sobre a crista da barragem, é possível notar uma continuidade de valores baixos indicando uma zona de baixa resistividade em sua parte inferior e provavelmente uma área saturada. Com a finalidade de possibilitar

uma melhor análise das interações entre as seções, um modelo tridimensional foi elaborado (Figura 33).

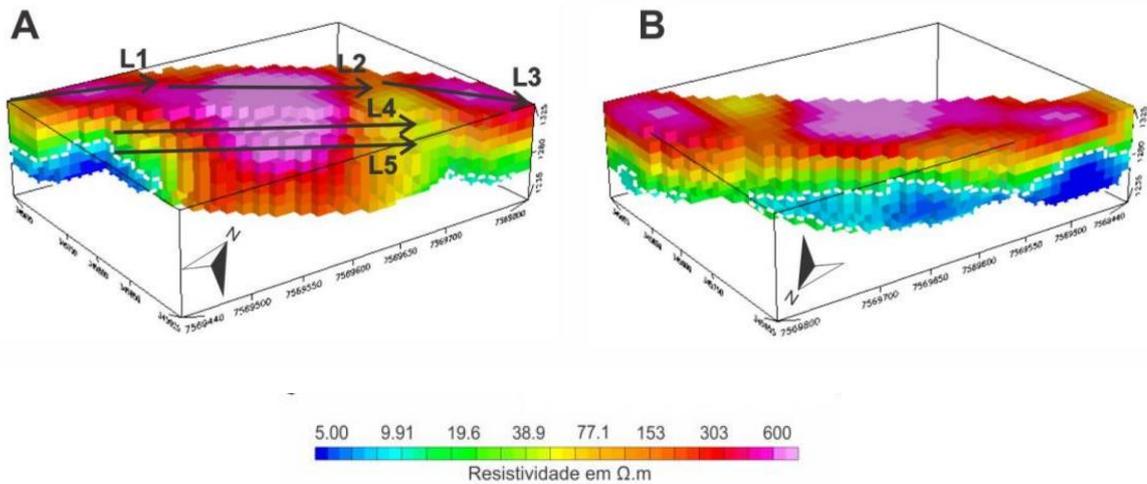


Figura 33: Exibição tridimensional dos valores de eletrorresistividade A) Perspectiva frontal da barragem, B) Perspectiva posterior da barragem
Fonte: ARCILA (2020)

Estes resultados indicam um fluxo de água de montante para jusante, principalmente próximo às ombreiras. A menor resistência nesta região sugere que é através do embasamento que a água está fluindo. Utilizando o modelo de blocos, varias seções foram obtidas horizontalmente a cada 10 metros de profundidade (Figura 34). Fica claro que, com o aumento da profundidade, os valores de saturação crescem em direção à obreira direita (sentido NE/SW) o que condiz com a área onde a surgência é observada. Após associação desses dados com os estudos geológicos do local foi verificado que o sistema de faturamento do embasamento seguia a esta direção (NE/SW). As seções em diversos níveis mostram o tapete drenante e os limites dele (linhas brancas) indicam também os limites do maciço da barragem, fora dele as resistências correspondem ao embasamento. Na Figura 34 D e E pode-se observar zonas de baixa resistência no interior da estrutura da barragem, entretanto, a jusante do tapete é verificada uma região mais resistiva. Isto indica que o barramento se encontra seco depois do tapete e que a estrutura drenante está funcionando eficientemente.

O levantamento confirmou que eram as fraturas do embasamento rochoso que estavam permitindo o fluxo de água, servindo como caminho preferencial. Observa-

se também que a estrutura não possui zonas anômalas no interior do maciço de alteamento da barragem, principalmente depois das estruturas drenantes.

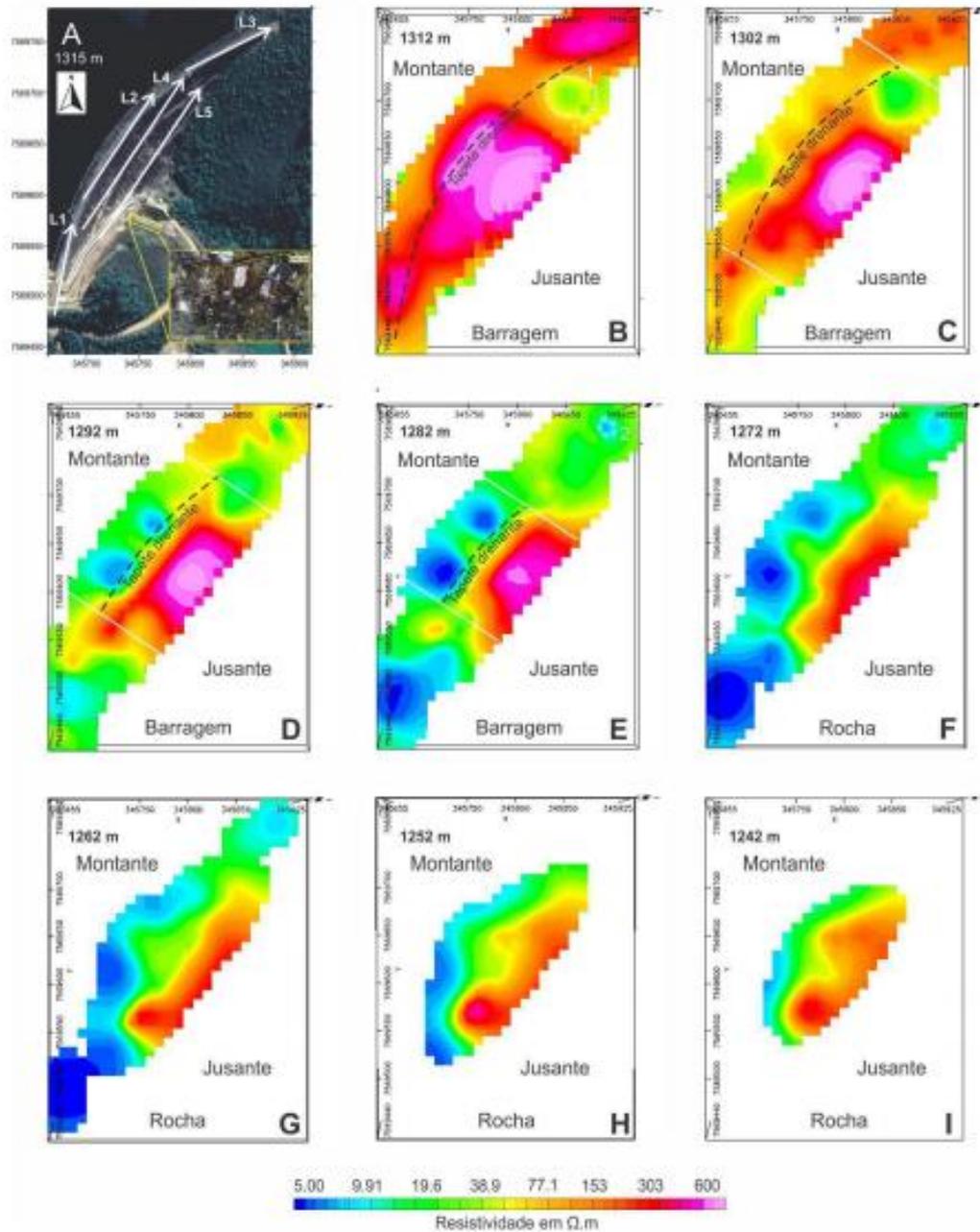


Figura 34: Seções horizontais a partir do modelo tridimensional
Fonte: ARCILA (2020)

5.2 Barragem BR

No estudo em questão, os pesquisadores utilizaram 3 das 10 linhas de dados para análise. Os dados obtidos foram comparados com as aferições diretas fornecidas por indicadores de nível de água instalados no local. A comparação das freáticas

fornechas diretamente e as inferidas pela geofísica foi feita utilizando seções tipos (Figura 35). A Seção-Tipo D-D esta ilustrada abaixo e foi a escolhida para comparação dos dados na pesquisa por possuir a maior disponibilidade de equipamentos diretos instalados linearmente bem como por estar mais centralizada na barragem.

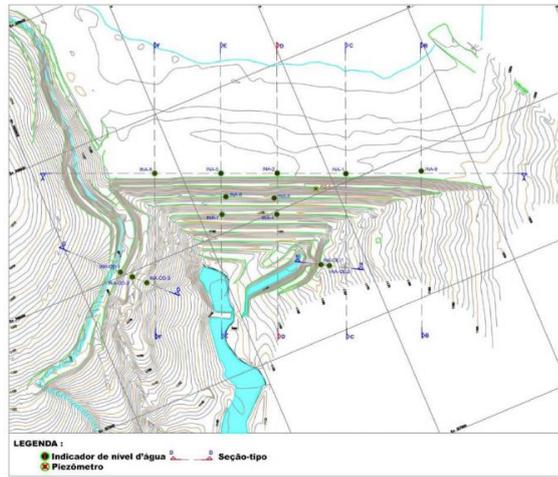


Figura 35: Localizações das seções tipo e da instrumentação da Barragem BR
Fonte: RODRIGUES (2018).

Os dados de resistividade e de cargabilidade (potenciais induzidos) foram interpretados, correlacionando as baixas resistências à presença de água e as zonas de alta cargabilidade com as áreas mais úmidas ou com maior presença de material argiloso. As escalas de cores adotadas podem ser observadas, sendo definidas: ZBR – zonas de baixa resistividade, ZIR – zonas de resistividade intermediária, ZAR – zonas de alta resistividade e ZBC – zona de baixa cargabilidade, ZIC – zona de cargabilidade intermediária, ZAC – zonas de alta cargabilidade. As seções de eletrorresistividade (Figura 36), cargabilidade (Figura 37) a partir da Linhas 01 são exibidas abaixo.

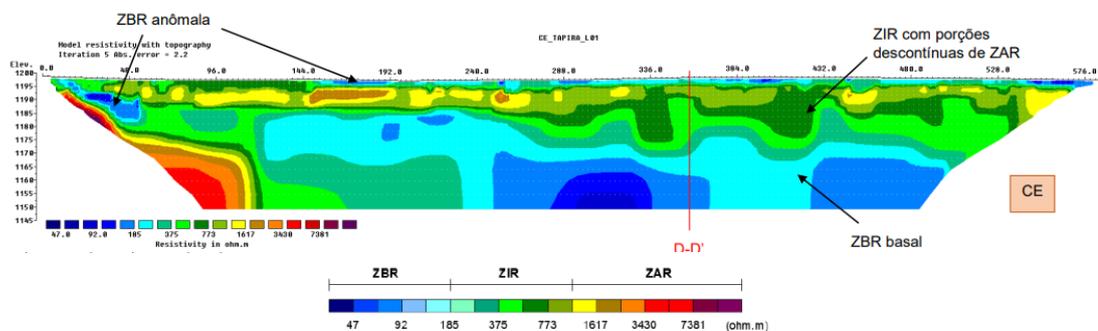


Figura 36: Resistividade na Linha 01
Fonte: RODRIGUES (2018).

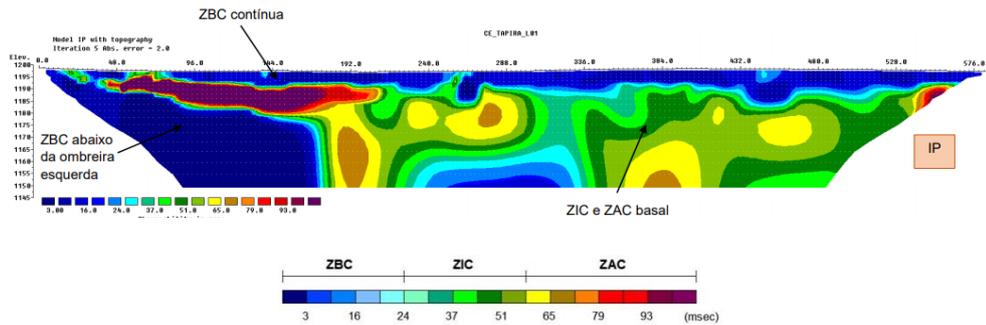


Figura 37: Cargabilidade na Linha 01
Fonte: RODRIGUES (2018).

Nesta seção realizada sobre a praia de rejeitos, os valores de baixa resistência são relacionados à maior umidade do material natural neste local. As áreas de menor cargabilidade são relacionadas à maior presença de material fino. As imagens da seção fornecidas pelo GPR (Figura 38) mostram uma mudança nos padrões refletivos próximos à superfície. Esta mudança indica provavelmente que este material foi depositado mais recentemente (RODRIGUES, 2018).

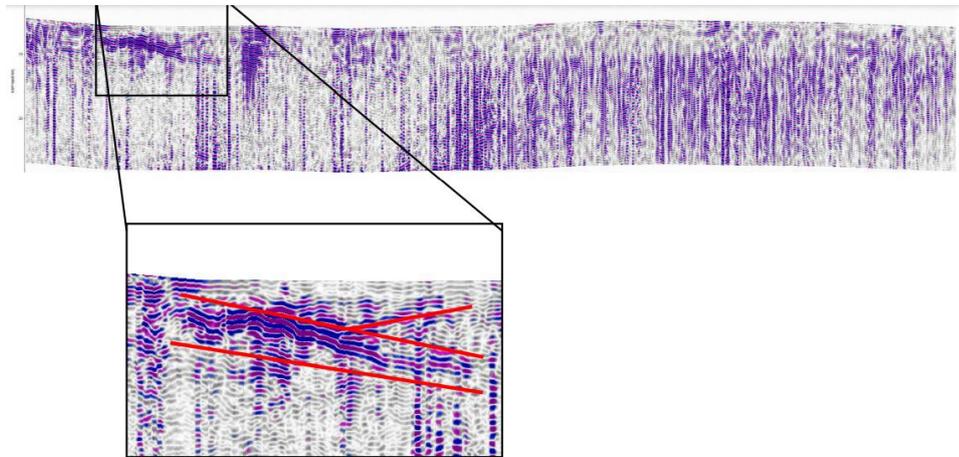


Figura 38: Imagem obtida pelo GPR na Linha 01 (destaque para a mudança de padrões próximo à superfície)
Fonte: RODRIGUES (2018).

Caracterizada por zonas de intermediária resistência (Figura 39), a Linha 04 teve a anomalia próxima à obreira direita ligada ao fato de ser o local onde haviam os drenos laterais. As seções de cargabilidade com altos valores caindo a níveis mais baixos na parte inferior (Figura 40) permitiram inferir que se tratam da gradação do material. A região úmida está mais baixa nessa seção e foi marcado o ponto superior de contato na seção-tipo D-D' (RODRIGUES, 2018).

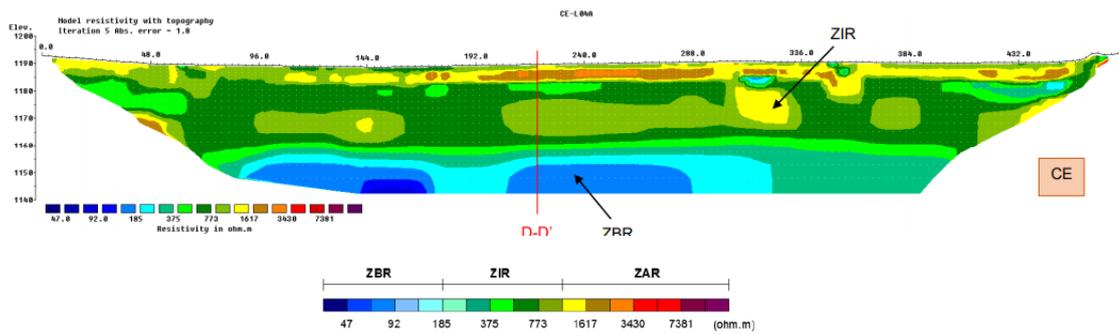


Figura 39: Resistividade da Linha 04
Fonte: RODRIGUES (2018).

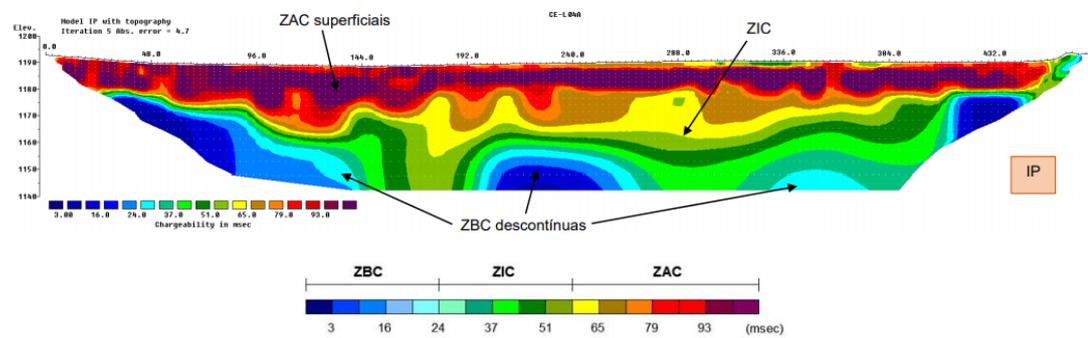


Figura 40: Cargabilidade da Linha 04
Fonte: RODRIGUES (2018).

A imagem do GPR (Figura 41) se mostra mais homogênea nesta seção, porém, ainda apresenta dois horizontes refletivos.

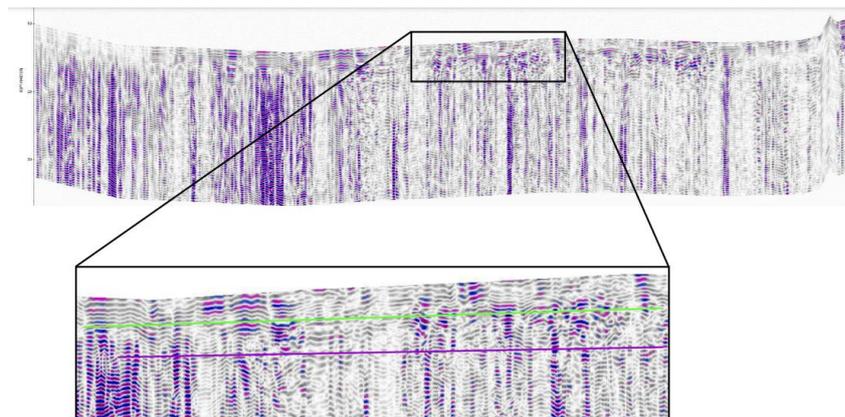


Figura 41: Imagem de GPR na linha 04, destaque para os padrões em diferentes horizontes
Fonte: RODRIGUES (2018).

Os valores de resistência (Figura 42) e de cargabilidade (Figura 43) da Linha 07 indicam uma zona mais saturada na região próxima à superfície da seção devido

à baixa resistência, seu contato em D-D' também foi marcado. Próximo ao extravasor, os valores de resistência são altos, conclui-se que não há vazamento na estrutura.

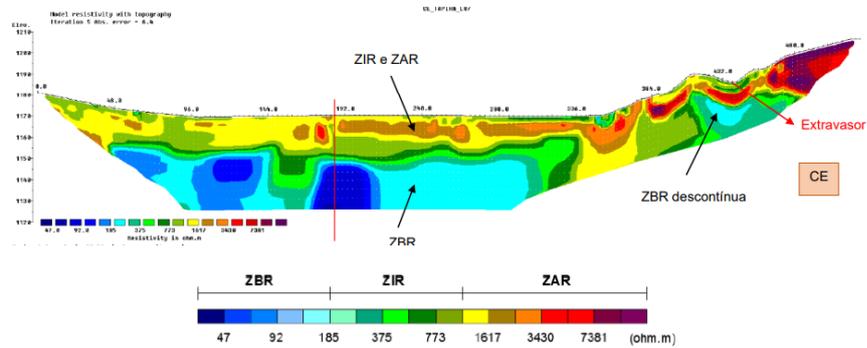


Figura 42: Resistividade na Linha 07
Fonte: RODRIGUES (2018).

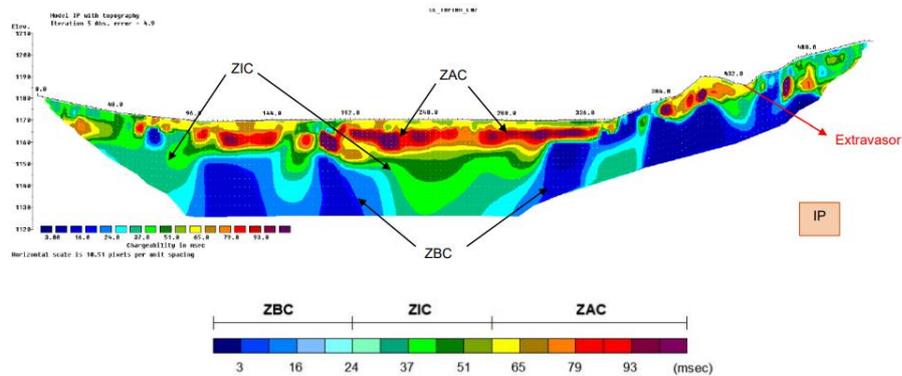


Figura 43: Cargabilidade na Linha 07
Fonte: RODRIGUES (2018).

Na última seção do GPR (Figura 44) pode se verificar três horizontes refletivos. Cada padrão indica maiores níveis de compactação do material e o maior tempo de disposição.

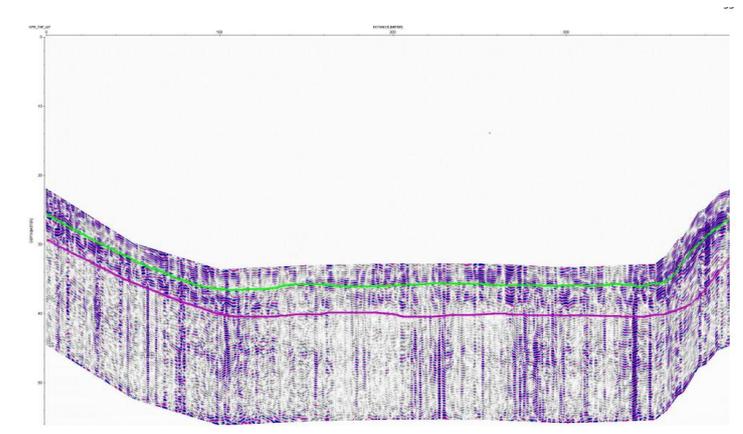


Figura 44: Imagem de GPR na Linha 07
Fonte: RODRIGUES (2018).

Considerando as seções, foram traçadas linhas freáticas a partir dos limites das zonas de baixas resistências (saturadas) pelo perfil da seção-tipo D-D. A freática indicada é muito próxima da freática mostrada pelos indicadores de nível de água instalados ao longo da Seção D-D' (Figura 45).

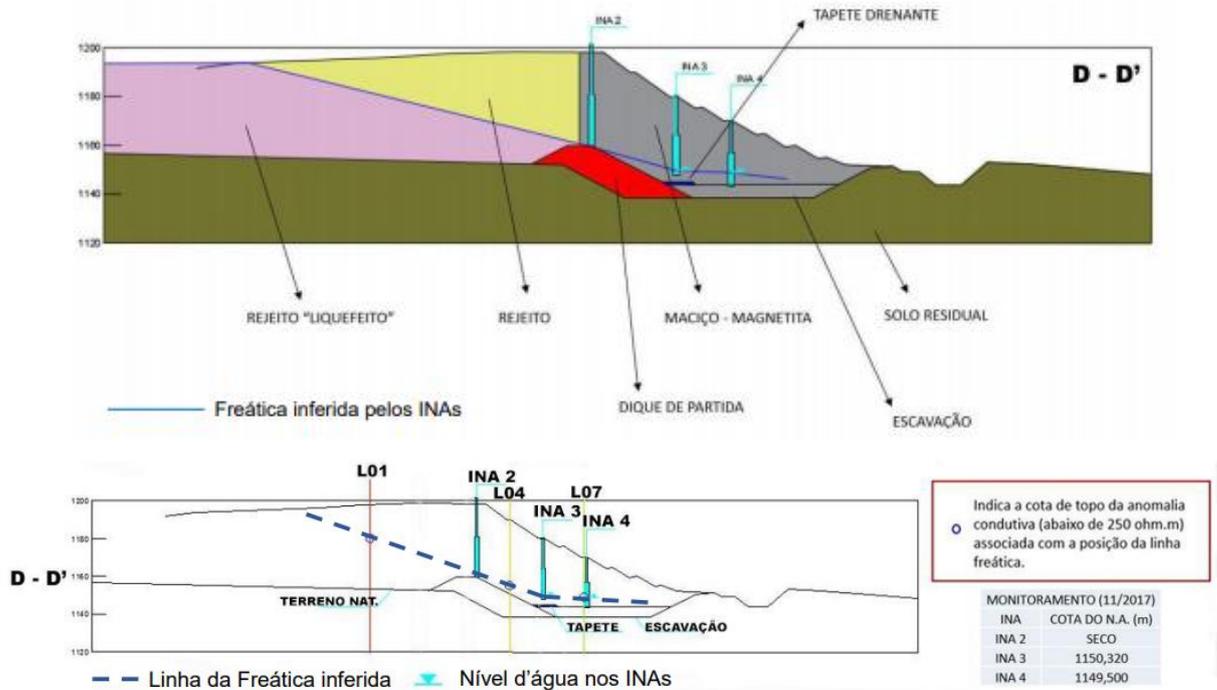


Figura 45: Superfície freática estimada por INA's em comparação com a superfície indicada pelos métodos geofísicos na pseudo-seção D-D'
Fonte: RODRIGUES (2018).

5.3 Barragem B1

Os dados, trabalhados em software e posteriormente analisados indicaram a presença de zonas de baixa resistividade nas proximidades das ombreiras das estruturas. As duas primeiras linhas realizadas indicam uma zona de baixa resistividade (abaixo de 84 Ohm.m) próximo à ombreira esquerda da crista. Segundo os projetos de engenharia, a região é formada principalmente por argilas, que são mais condutivas e normalmente mais saturadas (ALBUQUERQUE, 2019).

As seções seguintes apresentam transições que vão até a seção de número 6, onde a zona de baixa resistividade indicada é próximo aos níveis de água dos INA's do local e por isso indicam a freática. Na oitava linha a ZBR (zona de baixa resistência) é quase superficial, o que é condizente com a surgência de água e o brejo formado abaixo do pé da barragem. A seção de número 7 foi interpretada como anômala,

compreendendo a erro de operação, ruído ou influência externa e por foi isso descartada do conjunto de dados.

A interpretação dos dados foi feita em conjunto com a equipe técnica responsável pela operação da barragem a fim de identificar a correlação entre os dados construtivos e os resultados geofísicos. As oito primeiras seções incluindo a L07 anômala são exibidas na Figura 46 e estão sobrepostas a uma construção 3D da barragem. Há um destaque para a L01 e L06 que mostram uma anomalia na região próxima à ombreira esquerda da barragem.

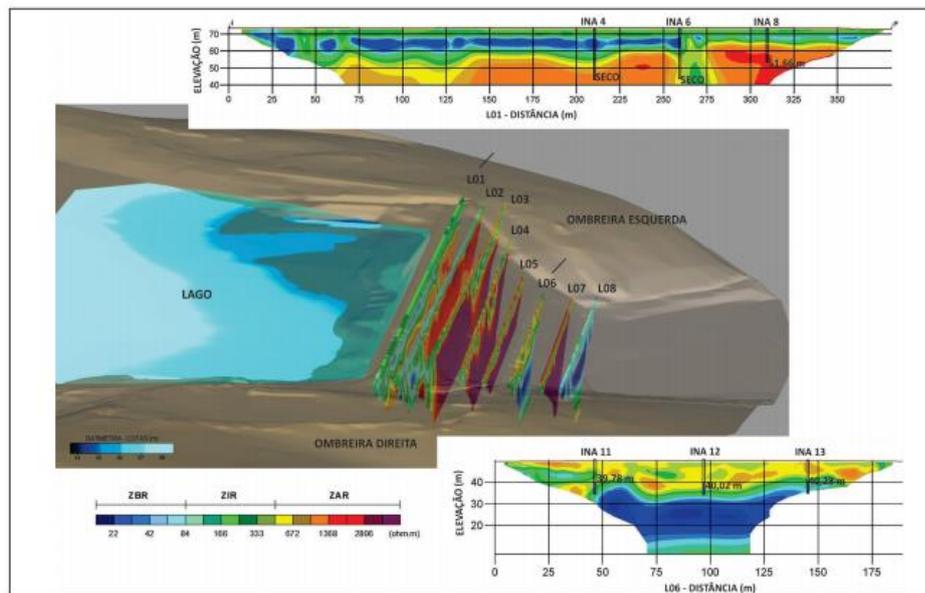


Figura 46: Representação das seções na Barragem B1, destaque para as seções 01 e 06

Fonte: ALBUQUERQUE *et al.* (2019).

A fim de investigar mais precisamente a anomalia próxima à ombreira esquerda da barragem, seis seções adicionais foram realizadas. Os resultados adicionais são exibidos na Figura 47 e detalham a anomalia que persistiu neste local específico. Após consultarem os históricos da barragem foi verificada a existência de um vertedouro antigo que foi preenchido com material drenante e brita (Figura 48). O extravasor continuou a conduzir água e servia como caminho preferencial dentro da estrutura da barragem, atuando como um dreno, conduzindo a umidade a uma caixa de coleta a jusante. Isso ficou evidente pelos resultados de baixa resistência identificada no local (Figura 49) (ALBUQUERQUE, 2019).

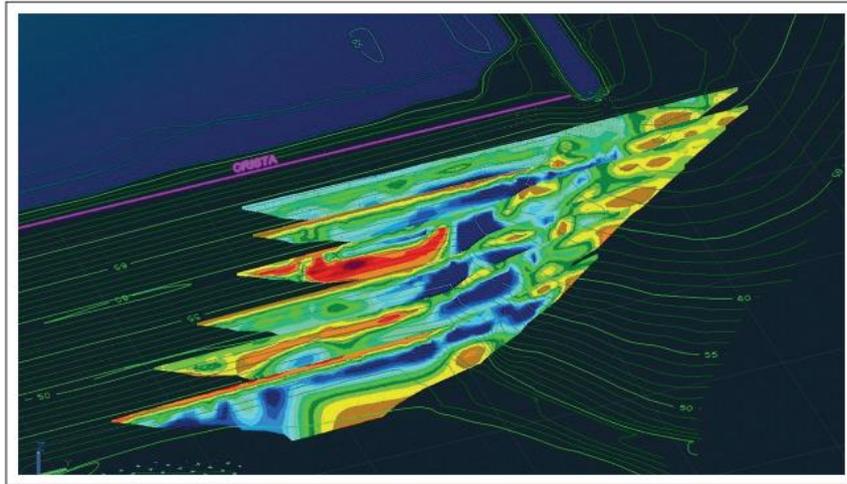


Figura 47: Zonas anômalas próximas à ombreira
Fonte: ALBUQUERQUE *et al.* (2019).

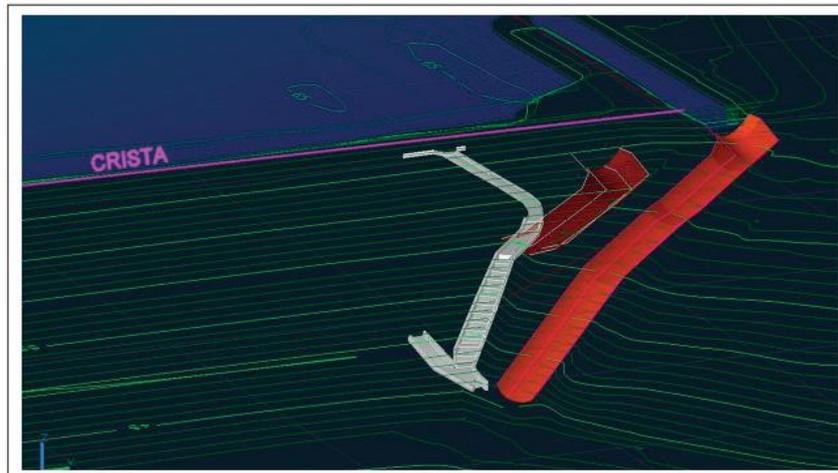


Figura 48: Antigo vertedouro da estrutura
Fonte: ALBUQUERQUE *et al.* (2019).

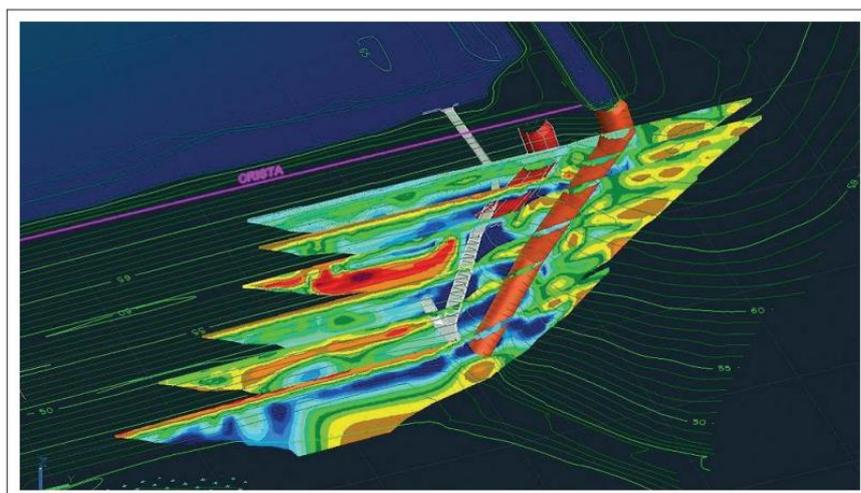


Figura 49: Sobreposição das seções de resistividade ao vertedouro
Fonte: ALBUQUERQUE *et al.* (2019).

5.4 Discussões Finais

O maior problema em barragens é justamente a identificação de zonas de saturação. Estas zonas comprometem a estrutura do maciço podendo gerar instabilidades que podem causar o rompimento completo da barragem. São estas zonas com alta presença de água onde as poropressões aumentam significativamente se forem submetidas a carregamentos. Os acidentes ocorridos em Mariana e em Brumadinho tiveram como principais causas a falta de controle operacional das freáticas das barragens.

Neste sentido, os estudos apresentados apresentam uma contribuição valiosa no monitoramento das áreas saturadas e com fluxos de água. Na campanha realizada em Poços de Caldas foi possível investigar o embasamento rochoso abaixo da barragem, seus fluxos preferenciais e direção de percolação. Também foi possível verificar a efetividade do tapete drenante. A identificação das feições geológicas permite evitar contaminações de áreas próximas e aumento da segurança local bem como estudar zonas mais profundas que os próprios maciços das barragens evitando rupturas por falhas no embasamento.

O estudo realizado em Tapira foi capaz de determinar com considerável precisão a superfície freática e esta foi confirmada pelos níveis de água indicados pelos equipamentos de medição direta. Isto permite inferir que para pontos que não possuam INA's, os valores indicados pela geofísica também serão confiáveis. Nas imagens de GPR foi possível identificar os diferentes horizontes de compactação do material dos alteamentos. O conhecimento de compactação do material e horizonte de deposições é importante pois determina se apresentará comportamento expansivo ou contrativo (fofo) quando submetido a carregamentos.

Na barragem B1 de Cajati além dos níveis de água estarem condizentes com os indicados pelos INA's e a presença do brejo a jusante, foi possível identificar a existência de um antigo extravasor no interior do talude. Este resultado é muito importante, principalmente porque em barragens antigas os históricos de construção e operação são, muitas vezes, pouco detalhados ou incompletos. Além de todas estas possibilidades, o método tem como principais vantagens a sua rápida realização, baixo custo relativo, e não ser invasivo como sondagens diretas e perfurações, que podem desestabilizar as barragens saturadas.

6. CONCLUSÃO

Portanto, este estudo sugere que a investigação geofísica pode e deve ser aplicada ao monitoramento de barragens. A metodologia se mostrou pertinente nos mais variados sentidos e objetos de estudo referentes à presença e fluxo de água nos maciços e embasamento. A utilização deste método complementando os dados de medição direta permite que as barragens sejam descritas com maior precisão e com isso situações de acidentes como os ocorridos em Minas Gerais sejam evitados com mais efetividade.

Além disto, novas alternativas de disposição devem ser pensadas. Países como Austrália, por exemplo, estendem suas fases de beneficiamento até a etapa de filtragem, refletindo também a escassez do recurso no país. Esta etapa de processamento ainda é pouco presente no Brasil, mas estas novas tecnologias possibilitarão aumento de segurança em termos de estabilidade e mais sustentabilidade com reaproveitamento cada vez maior de água.

Também é falado entre o meio técnico especializado a utilidade de cursos específicos de graduação ou especializações voltados diretamente para barragens. Os profissionais da área devem ter um conhecimento amplo das disciplinas de beneficiamento e mecânica dos solos. É necessário que se tenha foco em inovações tanto em processamento, filtragem e secagem do rejeito quanto em avanços geotécnicos como uso de aglutinantes, geotêxteis, *geobags* entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCILA, E. J. A. Diagnóstico geofísico para identificação de zonas de fluxo em uma barragem de contenção de rejeitos de mineração de urânio. 2020.

ALBUQUERQUE, R. et al. Caracterização de barragens de rejeito usando geofísica rasa: aplicação na barragem B1 de cajati, são paulo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 567-579, 2019.

ALMEIDA, M. M. de. Estudo tensão deformação de barragem de terra e enrocamento. 2010

BRAGA, A. C. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Rio Claro: 2006.

BRASIL. Lei Nº 14.066. de 30 setembro de 2020

CAMARERO, P. L. Análise de integridade física de barragens de terra a partir da integração do método geofísico da eletrorresistividade com ensaios geotécnicos. 2016.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração—uma revisão. **Holos**, v. 8, p. 77-85, 2016.

CHAVES, A. P. Manuseio de sólidos granulados: Coleção Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. **Oficina de Textos**. v.5, 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**: Volume 3 Eletromagnetismo. 8 Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

LACAZ, F. A. C.; PORTO, M. F. S.; PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista brasileira de saúde ocupacional**, v. 42, 2017.

MACHADO, W. G. F. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2007.

MAINALI, G. **Monitoring of tailings dams with geophysical methods**. Tese de Doutorado. Luleå tekniska universitet. 2006.

MORGENSTERN, N. R. et al. Relatório sobre as causas imediatas da ruptura da barragem de Fundão. Mariana, MG:[sn], 2016.

OLIVEIRA, A. P. Estimativa simultânea de parâmetros hidráulicos e de transporte em estêreis de mineração de urânio / Alexandre Pereira de Oliveira. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

REZENDE, V. A. Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante. 2013.

ROBERTSON P. K.; MELO; L.; WILLIAMS D.; WARD WILSON G. Relatório córrego do feijão. 2019.

RODRIGUES, C. T. Geofísica aplicada à investigação da barragem de rejeito BR, do complexo de mineração de Tapira, Minas Gerais. 2018.

SAMOUE LIANA. A.; COUSINA I.; TABBAGHC A.; BRUANDD A.; RICHARDE G. Electrical resistivity survey in soil science: a review 2004.

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

SOARES, Lindolfo. Barragem de Rejeitos. 2010.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**, v. 18, n. 34, p. 49-65, 2018.

VICK, Steven G. Planning, design, and analysis of tailings dams. 1990.