

YURI MESTNIK

ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS EM BARRAGENS:

**AVALIAÇÃO DE ENSAIOS GEOFÍSICOS DE
ELETORRESISTIVIDADE E POTENCIAL ESPONTÂNEO NA
IDENTIFICAÇÃO DE CAMINHOS PREFERENCIAIS DE ÁGUA EM
UMA BARRAGEM DE TERRA NO MATO GROSSO DO SUL.**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental; Escola Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. David de Carvalho

Salvador
2024

ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS EM BARRAGENS: AVALIAÇÃO DE ENSAIOS GEOFÍSICOS DE ELETORRESISTIVIDADE E POTENCIAL ESPONTÂNEO NA IDENTIFICAÇÃO DE CAMINHOS PREFERENCIAIS DE ÁGUA EM UMA BARRAGEM DE TERRA NO MATO GROSSO DO SUL.

Yuri Mestnik

Resumo

Trata-se da avaliação de um estudo geofísico envolvendo ensaio dos tipos eletorresistividade e de potencial espontâneo, realizados simultaneamente, em uma barragem de terra para acúmulo de água, usado com o intuito de identificação de anomalias no corpo da barragem e/ou caminhos preferenciais de percolação no maciço. Buscou-se relacionar os resultados obtidos nos ensaios com a situação real em campo, de forma a validar esses ensaios como fontes não destrutivas de informações em barragens de terra.

Palavras-chave: ensaio geofísico, potencial espontâneo, eletorresistividade.

Abstract

It is the evaluation of a geophysical study involving electrical resistivity and spontaneous potential tests, carried out simultaneously, on an earth dam for water storage, used to identify anomalies in the body of the dam and/or preferential percolation pathways in the mass. The aim was to relate the results obtained to the real field situation, in order to validate these tests as non-destructive sources of information in earth dams.

Keywords: geophysical survey, spontaneous potential, electrical resistivity.

1 INTRODUÇÃO

Diante da necessidade constante da humanidade no uso de água e da sazonalidade dos ciclos da natureza, barragens assumem um importante papel para o desenvolvimento da humanidade, capazes tanto de fornecer água como servir de contenção e depósito de materiais frutos da atividade humana. Centenas de milhares de barragens estão presentes ao redor do planeta e, especificamente no Brasil, muitas delas não apresentam uma manutenção e um monitoramento adequados (ANA; FISHER, CAMP, KRZHIZHANOVSKAYA; JANSEN; MELLO; 2023, 2016, 1983, 2021), impondo a necessidade métodos rápidos de verificação que busquem dar um diagnóstico da sua condição, da sua integridade e da sua capacidade de atender adequadamente ao propósito que a originou.

A identificação preventiva de anomalias pode evitar catástrofes. Métodos de investigação baratos e com respostas rápidas, como ensaios geofísicos, são um promissor caminho para identificação de patologias em barragens. Investigação geofísica, como o caminhamento elétrico e potencial espontâneo abordados aqui, podem ser aplicados em barragens e são capazes de elucidar o conhecimento da integridade dessas estruturas.

1.1 OBJETIVO

A realização de ensaios geofísicos para a verificação da relação entre zonas de baixa resistividade de um ensaio de caminhamento elétrico e de potencial espontâneo podem indicar a presença de zonas de umidade em barragens de terra ou caminhos preferenciais de escoamento d'água, ajudando a prever anomalias e catástrofes. Este artigo busca abordar o a realização de ensaios de eletrorresistividade e de ensaios de potencial espontâneo como fonte de informações não destrutivas de presença de anomalias, umidades e caminhos preferenciais de água em barragens de terra, apresentando um caso prático de ensaio realizado com a situação real encontrada em campo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do universo dos barramentos existentes no país onde, conforme aponta o Relatório de Segurança de Barragens da ANA de 2022, milhares de barragens não têm informações suficientes para a avaliação de suas características básicas de enquadramento como: de altura

do maciço, capacidade do reservatório, dano potencial associado ou categoria de risco. Diante desta situação, métodos de investigação baratos e não destrutivos se tornam uma excelente fonte de informações que podem ajudar a identificar anomalias com capacidade de comprometer a integridade dessas estruturas.

O presente trabalho busca avaliar métodos de investigação geofísicos do tipo caminhamento elétrico e potencial espontâneo num caso prático de investigação como potencial forma de aquisição de dados, servindo de base para subsidiar estudos na aplicação do método em outras barragens, de forma a se obter informações da integridade dessas estruturas.

2 DESENVOLVIMENTO

Uma barragem, seja ela de terra, de concreto, de rocha ou mista trata-se de uma estrutura construída com a finalidade de acúmulo de água, que permite garantir o consumo humano e animal, para irrigação, lazer, turismo, geração de energia, indústria, navegação, controle de cheias, piscicultura, mineração, represamento; sua construção se faz importante, sobretudo, pela escassez de água nos períodos secos e pela consequente necessidade de armazenamento de água para a sobrevivência humana, tornando-se, ao longo dos tempos, importante vetor de crescimento da humanidade.

É possível encontrar ruínas das barragens antigas, com mais de 3.000 anos a. C., como a barragem de JAWA, na Jordânia ou a barragem de Saad al Kafara, em Helwan no Egito (2.900 anos a.C.). No Brasil, os primeiros registros de barragens datam da época do Império: por ordem de D. Pedro II, o Açude Cedro-Quixadá foi executado entre 1890 e 1906 no Ceará, após seu governo (PEREIRA, 2023).

Hoje em dia milhões de pessoas vivem a jusante de barragens, sendo os programas de segurança de imperativa importância para a manutenção da integridade das estruturas. Equipes multidisciplinares com engenheiros, geólogos, entre outros, são essenciais para a redução de incertezas e manutenção da segurança não apenas das estruturas de barramento, como também das populações que dependem dessas estruturas (JANSEN, 1983 p.89).

Ainda segundo Jansen (1983, p. 94) – existem mais de 150.000 barragens no mundo que apresentam perigos em caso de ruptura, numa estimativa aproximada de mais de dois mil colapsos em barragens desde o século XII, matando mais de 8.000 pessoas.

Mello (2021, p.72) afirma que acidentes e incidentes em barragens podem ser explicados por mais de uma maneira plausível, sendo comum a falta de informações necessárias para

esclarecer os mecanismos que os originaram impondo uma dificuldade de determinação com segurança a natureza e a sequência de agentes e fatos que originaram o acidente. Uma estatística a partir dos acidentes e incidentes registrados aponta que, de um universo de 185 casos, apenas 15 ocorreram durante a etapa construtiva da barragem, ou seja, sem água no reservatório; sendo os demais registros ocorridos durante o enchimento ou operação (com água no reservatório) ou acidentes em cascata, ocorridos a partir de uma sucessão de eventos (MELLO, 2021, p. 151).

Atualmente existem dezenas de milhares de barragens no Brasil. O Relatório de Segurança de Barragens da ANA de 2022 (ANA, 2023, p. 25-27) aponta que, de um universo de 23.977 barragens cadastradas no Brasil, 13.438 não possuem informações suficientes. Diante do desconhecimento das condições de mais de 13 mil barragens catalogadas, métodos de investigação geológica se tornam essenciais para identificação de anomalias e definição de prioridades de intervenções em barragens de terra. Mesmo entre as barragens classificadas, existem diversos questionamentos e dúvidas quando à sua integridade e sua capacidade de atender ao seu propósito com segurança.

No levantamento realizado por Mello (2021, p. 153), foi identificado que 48% dos acidentes em barragens catalogados estão relacionados com as obras de terra, atingindo a barragem durante ou após sua construção. Mas, a falta de exata e ampla catalogação dos acidentes e incidentes em barragens, sejam elas grandes (com mais de 15 metros de altura) ou não, pode mascarar um percentual extremamente expressivo para acidentes com barragens de terra. O estudo e conhecimento desses empreendimentos são essenciais para a previsão e correção de acidentes, impedindo, assim, que problemas mais graves e maiores dispêndios financeiros aconteçam, ou, ainda, a perda de vidas.

2.1 REVISÃO DA LITERATURA

Existem inúmeros métodos de estudo que, a depender da finalidade a que se destina, são mais recomendados ou inapropriados (SOUZA e GANDOLFO, 2021). Após sua construção, uma barragem de terra é monitorada por meio de piezômetros, marcos topográficos, medidores de nível d'água, medidores de vazão, além de inspeções visuais rotineiras que fornecem uma informação direta e superficial sobre sinais de recalque e sobre o comportamento da água no interior do maciço (SILVA, 2019, p. 1).

Esse monitoramento, muitas vezes constante e sistemático, traz luz à uma condição superficial da barragem ou os parâmetros pontuais de seu interior, já que os piezômetros não

abrangem todo o comprimento da barragem, porém são muito eficazes em detectar anomalias. A importância da detecção de uma anomalia pode indicar um problema potencialmente sério (FISHER, CAMP, KRZHIZHANOVSKAYA, 2016, p 146-153).

Diversos trabalhos apontam a geofísica como uma valiosa ferramenta de estudos em superfície. Via de regra, ensaios geofísicos são comumente realizados na etapa inicial de caracterização geral do terreno e viabilidade de um empreendimento. Em barragens, a aplicação de métodos geofísicos de investigação se torna uma ferramenta potente para sua caracterização de forma não destrutiva, melhoram a extrapolação de dados pontuais a partir de métodos de pesquisa direta, permitindo uma avaliação rápida e econômica de grandes áreas. São capazes de detecção de anomalias como infiltrações e erosões ainda numa fase inicial, o que permite intervenção sem que haja um rompimento catastrófico, cujas consequências são gigantescas e difíceis de mensuração (SILVA, 2019; SOUZA e GANDOLFO, 2021; ROCHA, BRAGA, RODRIGUES, 2019).

Ensaos geofísicos consistem na investigação do subsolo através de diversas ferramentas com características específicas, que contribuem para elucidação do conhecimento para fins específicos de engenharia, geologia, mineração, navegação, pesca, entre outros. Sua aplicação indireta e não destrutiva oferece um conhecimento rápido dos principais elementos da área de interesse, possuindo boa relação custo/benefício.

Existem diversos métodos de estudo que, a depender da finalidade a que se destina, são mais recomendados ou inapropriados. Ensaos geofísicos são comumente realizados na etapa inicial de caracterização geral e viabilidade de obras de engenharia (SOUZA e GANDOLFO, 2021).

Após a construção de uma barragem de terra, principalmente quando as informações de projeto são falhas, é difícil a identificação de problemas e anomalias. A falta de um monitoramento adequado, mesmo com uma rotina de inspeção eficaz e sistemática, pode ocultar possíveis colapsos na estrutura. Conforme expõe Rocha, Braga e Rodrigues (2019) “devido ao aumento de acidentes graves com rompimento de barragens no Brasil, [...] a busca pelo desenvolvimento de novas alternativas de tecnologias de investigação e monitoramento contribuem na previsão de anomalias”.

Ensaos geofísicos são uma vertente de investigação que podem trazer uma luz ao conhecimento desejado, esclarecendo e identificando regiões num barramento que merecem atenção/intervenção.

A geofísica é uma alternativa interessante para o monitoramento de linhas de fluxo em barragens de terra, diante do contraste de propriedades físicas entre zonas com percolação de

água e os materiais íntegros ao redor. A avaliação de aspectos visíveis em superfície resultantes de processos nocivos à integridade da estrutura de uma barragem, como a presença de ravina ou feições de escorregamentos; associada à ensaios geofísicos e ao monitoramento direto dos instrumentos de auscultação, podem proporcionar uma avaliação adequada, de forma a complementar na avaliação da estrutura (RODRIGUES, 2018).

Dentre os diversos métodos de investigação existentes, destacamos os principais métodos não destrutivos de investigação, que podem ser executados isoladamente ou em associação, cujo resultado se soma para um diagnóstico mais eficaz:

- Métodos elétricos
 - Eletrorresistividade: caminhamento elétrico / imageamento
 - Sondagem elétrica vertical
 - Potencial espontâneo
- Métodos eletromagnéticos
 - Radar de penetração no solo (ou GPR – Ground Penetrating Radar)

O uso de ensaios geofísicos tem sido aplicado com sucesso em diversas partes do mundo, como, por exemplo, em uma barragem no condado de Warren, no estado de Missouri – EUA, outra localizada em Zaria, no noroeste da Nigéria, e, aqui no Brasil, podemos citar a barragem da usina hidrelétrica Governador José Richa (PR), outra localizada em Cordeirópolis (SP) ou a barragem BR, localizada em Tapira – MG (ROCHA et al, 2019).

2.2 INSTRUMENTO E COLETA DE DADOS

O presente trabalho apresenta os levantamentos em campo, que foram realizados no quarto bimestre de 2023, onde se utilizou um equipamento do modelo Terrameter LS, de fabricação da ABEM Instruments (Imagem 1), bem como, 4 cabos com 32 take-outs cada, sendo 2 cabos com espaçamento entre take-outs de 3 (três) metros de comprimento e os outros 2 cabos com espaçamento de 5 (cinco) metros de comprimento. Este conjunto constitui-se num sistema multieletrodos automatizado.

O levantamento se realizou ao longo de 13.415 metros, num universo de 36 seções de estudo de caminhamento elétrico e de potencial espontâneo, ambos realizados simultaneamente no corpo da barragem, sendo representados no mapa da Figura 3.



Imagem 1 – Equipamento Terrameter LS ABEM

Foram realizados de nove a treze seções em cada estrutura na face de jusante, já que na face de montante se encontra o reservatório. O caminhamento foi realizado paralelo ao eixo da barragem.

2.3 ENSAIOS GEOFÍSICOS DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO E POTENCIAL ESPONTÂNEO EM UMA BARRAGEM

O presente trabalho apresenta uma investigação realizada em uma estrutura de uma barragem já existente e finalizada em 2012, no estado do Mato Grosso do Sul, que se destina à geração de energia elétrica; fazendo um paralelo entre os resultados obtidos e as anomalias existentes no barramento. Os métodos empregados no estudo são eletrorresistividade e potencial espontâneo.

A eletrorresistividade é um método de investigação eficiente e de baixo custo, amplamente utilizado não apenas em barragens de terra, mas também em outros tipos de estruturas como barramentos de concreto e em investigações geológicas. Devem ser realizados em associação com outros métodos de investigação e, quando possível, comparando com os dados de monitoramento existentes nas estruturas; é uma excelente ferramenta de investigação, aplicável em quase todas as situações (ZORZI e RIGOTI, 2011).

O método da eletrorresistividade consiste na injeção de uma corrente elétrica de intensidade conhecida no terreno, com o emprego de eletrodos. A partir da diferença de potencial medida entre os eletrodos, resultado da passagem dessa corrente, se calcula a resistividade elétrica (SOUZA e GANDOLFO, 2021). O método utiliza o parâmetro físico da resistividade elétrica; uma propriedade fundamental do ambiente geológico, se valendo da premissa que um mesmo meio litológico homogêneo apresenta uma mesma resistividade; é

possível identificar alterações na característica física dos solos correlacionados à ampla gama de variação nos valores de resistividade.

Para o levantamento do tipo Caminhamento Elétrico, podem ser utilizados arranjos que permitem o estudo da variação lateral do parâmetro físico em vários níveis de profundidade, obtendo-se assim uma melhor caracterização dos materiais, tanto horizontalmente quanto verticalmente, a saber: Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Gradiente, entre outros. O arranjo utilizado foi do tipo Schlumberger, que consiste na disposição dos quatro eletrodos simetricamente em relação ao ponto médio do arranjo.

Já o Potencial Espontâneo consiste na medição da diferença de potencial elétrico natural do terreno, gerado por processos eletroquímicos e eletromagnéticos (SOUZA e GANDOLFO, 2021). O ensaio se utiliza do fato que a heterogeneidade do solo se polariza, convertendo-se em verdadeiras “pilhas elétricas” que originam, no subsolo, correntes elétricas. O fluxo de água subterrânea é o agente mais influente no mecanismo de geração de potencial espontâneo.

2.4 TRATAMENTO DE DADOS

No processamento de dados do caminhamento elétrico, a fim de se obter uma melhor convergência dos resultados, foi utilizada a inversão Jacobiana recursiva com filtragem e remoção das resistividades espúrias com o objetivo de estabilização do erro na menor faixa possível, obtendo boa convergência na abordagem. Também se realizou, durante a extração dos dados em campo, a mudança pontual de pontos com valores claramente errôneos de resistividade devido a um fraco contato entre o eletrodo e o solo, de forma que a contagem do primeiro eletrodo se iniciasse numa mesma origem.

Os erros maiores estão ligados às divergências de resistividades oriundas de seções mais distantes, em função dos desvios de percurso da corrente elétrica, característicos de maciços heterogêneos.

Para a obtenção dos perfis bidimensionais a partir das variações de resistividade para cada campanha de ensaios, foi utilizado o software Res2Dinv. Foi considerado e correlacionado na análise os níveis d'água a montante e a jusante das estruturas, bem como o nível d'água dos piezômetros e medidores de nível d'água medidos concomitantemente à realização dos ensaios.

Considerando a integridade da barragem e sua característica principal de armazenamento de água, a análise geofísica consistiu na busca de vazios e de zonas preferenciais de percolação d'água, considerando os valores de resistividade conforme Tabela 1 a seguir.

TABELA 1 - VALORES DE REFERÊNCIA DE RESISTIVIDADE UTILIZADA NOS ENSAIOS GEOFÍSICOS

<i>Tipo de rocha</i>	<i>Resistividade (ohm.m)</i>		
	Telford (1990)	Loke (1999)	Braga (2002)
<i>Argila</i>	100-133	1-100	300-5.000
<i>Areia</i>	670-1.330	-	1.000-8.000
<i>Arenito</i>	33-6.700	200-8.000	-
<i>Basalto</i>	1.000-1.000.000	200-100.000	>10.000
<i>Água doce</i>	0,5-300	1-100	50-100

As regiões que apresentaram valores de resistividade abaixo de 50 ohm.m no caminhamento elétrico estão identificadas como Zona de Baixa Resistividade (ZBR) e estão associadas à presença de água, umidade ou argila. Para as Zonas de Alta Resistividade (ZAR), os valores encontrados ficaram acima de 1.000 ohm.m e estão associadas a porções mais compactadas do corpo da barragem ou à presença de rocha sã quando abaixo ou a jusante do corpo da barragem (terreno natural).

2.5 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM

A barragem está localizada na região da Bacia do Paraná, numa bacia Paleo-Mesozóica, conforme aponta o Mapa Geológico do estado do Mato Grosso do Sul (LACERDA FILHO et al, 2006), numa região de ocorrência de basaltos da Formação Serra Geral de idade jurássico-cretácea, de coloração negro a cinza-esverdeado, microcristalino e lentes de arenito róseo com granulação média, endurecido por efeito térmico dos derrames. Sobreposto ao basalto encontram-se arenitos, de idade cretácea, da Formação Caiuá e Santo Anastácio (Grupo Bauru). São arenitos finos a médios e grosseiros, geralmente decompostos em solos arenosos marrom-avermelhados, com fragmentos e blocos de arenito ferruginoso. Ao longo dos cursos d'água ocorrem aluviões restritos de idade quaternária.

O contato entre os arenitos e os basaltos se dá por falhamentos normais isolando blocos tectônicos adernados em direção a oeste. A falha de montante tem rejeito da ordem de poucas dezenas de metros, enquanto a de jusante tem pequeno rejeito, inferior a 5 m. As rochas de

ambas essas unidades geológicas só afloram na calha e nas margens do rio, sendo os terrenos ocupados essencialmente por coberturas de solos residuais e colúvios bastante espessos.

Na área da fundação da barragem, os basaltos estão presentes e seguem aflorando principalmente no fundo do vale do rio e os arenitos apresentam-se depositados sobre o basalto nas porções mais altas do terreno.

No empreendimento predominam os solos residuais e/ou coluvionares do arenito Caiuá. Estes solos são classificados como areias siltosas ou silto-argilosas apresentando, na sua grande maioria, não mais do que 15% de finos na sua composição.

O presente trabalho aborda o trecho da barragem que é composto por solo compactado em todo o maciço com taludes de 1,00 (vertical):2,00 (horizontal) no paramento de montante e 1,00 (vertical):2,50 (horizontal) no paramento de jusante, a partir do terreno da fundação, assente no topo rochoso em basalto denso, com uma altura de 19 metros. Acima desta elevação passa a ser 1,00 (vertical):2,10 (horizontal) por mais oito metros, perfazendo uma altura máxima de 27 metros de barragem, com uma borda livre a partir no nível médio d'água de três metros.

No eixo da estrutura existe um filtro vertical de areia compactada da fundação até o nível d'água máximo normal do lago da barragem (há 3 metros da crista da barragem). Na região de jusante foi projetado um tapete drenante, com o intuito de dar vazão à água que percola pelo maciço da barragem, captando água que percola pelo filtro vertical; bem como captar o fluxo d'água pela fundação. A barragem também conta com um dreno de pé e uma trincheira que coletam as vazões dos drenos vertical e horizontal, disciplinando a saída de fluxo e garantindo as condições de estabilidade do paramento de jusante da barragem. No trecho em rocha, a vazão é captada por um tubo que conduz a água até um medidor de vazão.

A Figura 1 abaixo apresenta o corte transversal de uma seção tipo da barragem, indicando a inclinação dos taludes de montante e jusante, elevações e nível d'água, filtros vertical e horizontal e topo rochoso. A Figura 2 em seguida apresenta o desenho em planta da barragem, com a localização dos piezômetros e dos marcos de referência.

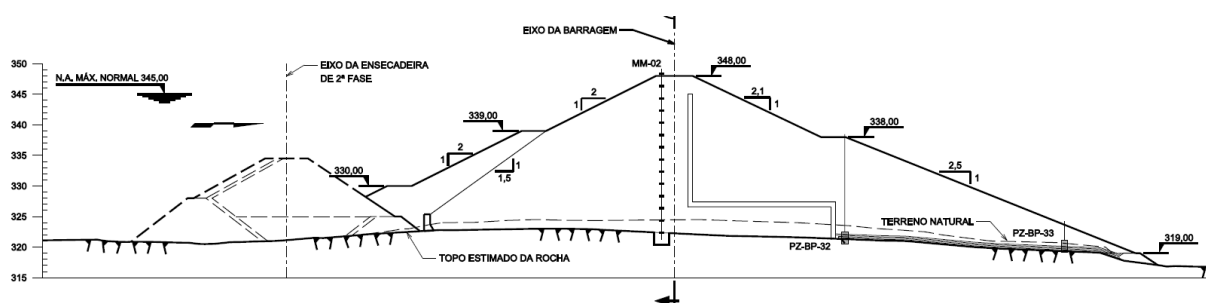


FIGURA 1 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO CORTE DA BARRAGEM

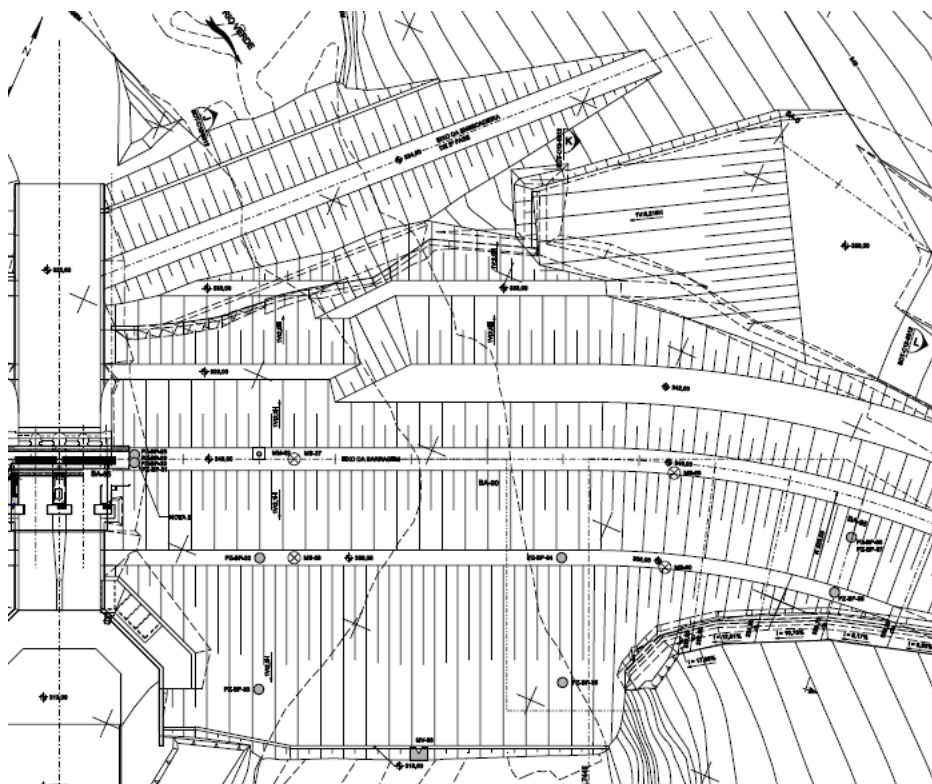


FIGURA 2 - DESENHO DA BARRAGEM – VISTA EM PLANTA

Este trecho da barragem se estende por 300 metros a partir do eixo do vertedouro, e está assente no leito do rio, conforme se depreende da Figura 2. A ensecadeira a montante foi executada inicialmente para permitir a execução da barragem e encontra-se submersa no lago do barramento, não sendo objeto de investigação.

2.6 LOCALIZAÇÃO DAS CAMPANHAS

O trecho destacado se encontra na margem esquerda do curso do rio, fora da calha do corpo d'água original, sendo realizadas 10 campanhas de leitura, com o equipamento compreendendo as campanhas um a nove e a campanha 31. Todas as campanhas se realizaram paralelamente ao eixo da barragem, iniciando na margem mais próxima ao eixo do rio e terminando na extremidade mais afastada seguindo pela linha da crista da barragem. As campanhas um e dois foram realizadas na crista da barragem, uma a montante do eixo e outra a jusante do eixo. As demais campanhas foram realizadas no talude de jusante, avançando para o terreno natural imediatamente a jusante da barragem.

É apresentada na Figura 3 a localização das seções de caminhamento elétrico na barragem.



FIGURA 3 - DESENHO ESQUEMÁTICO DAS CAMPANHAS DE LEITURA NA BARRAGEM

2.6.1 Resultado das campanhas

São apresentadas nas figuras Figura 4, Figura 5 e Figura 6, apenas as campanhas de caminhamento elétrico das seções L2 e L3, realizadas na crista da barragem, a jusante do filtro vertical, e a campanha L31, realizada a jusante da barragem, já em terreno natural. As demais campanhas de caminhamento elétrico são apresentadas na modelagem tridimensional indicada na Figura 7 e todas as campanhas de potencial espontâneo são apresentadas na modelagem tridimensional da Figura 8.

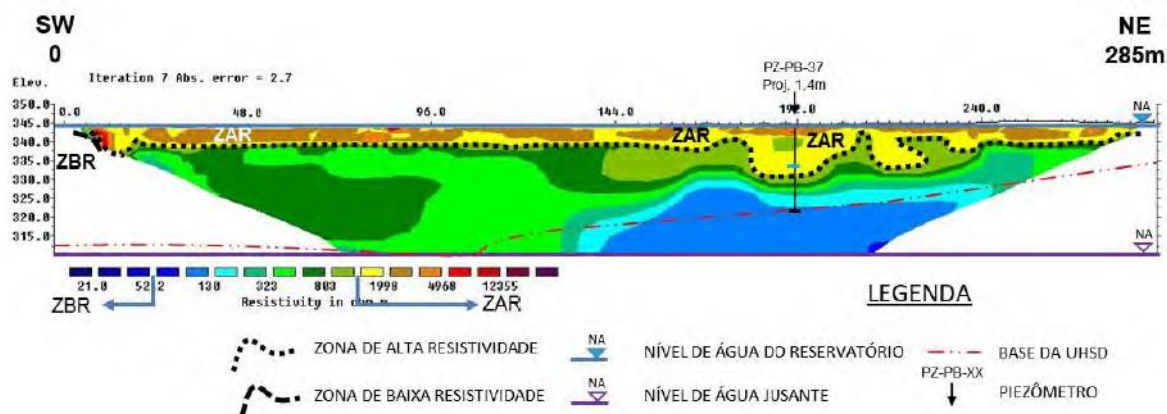


FIGURA 4- SEÇÃO L2

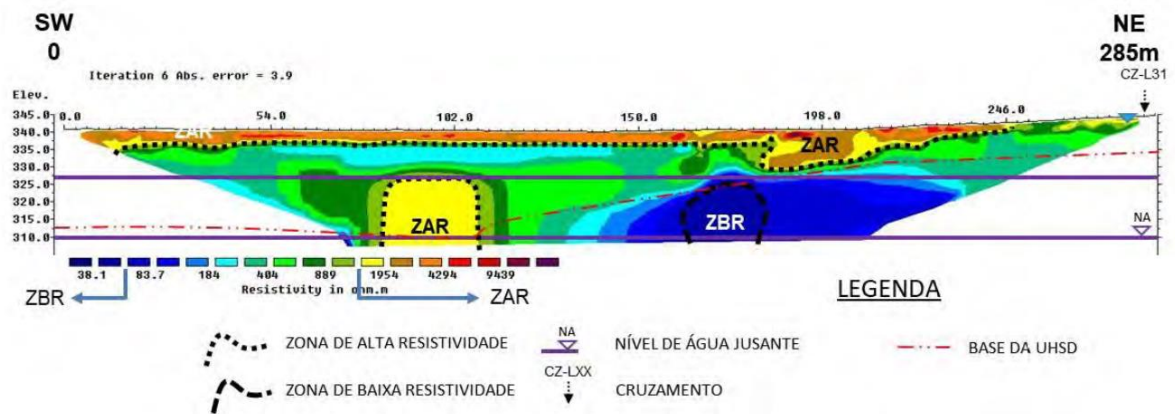


FIGURA 5 - SEÇÃO L3

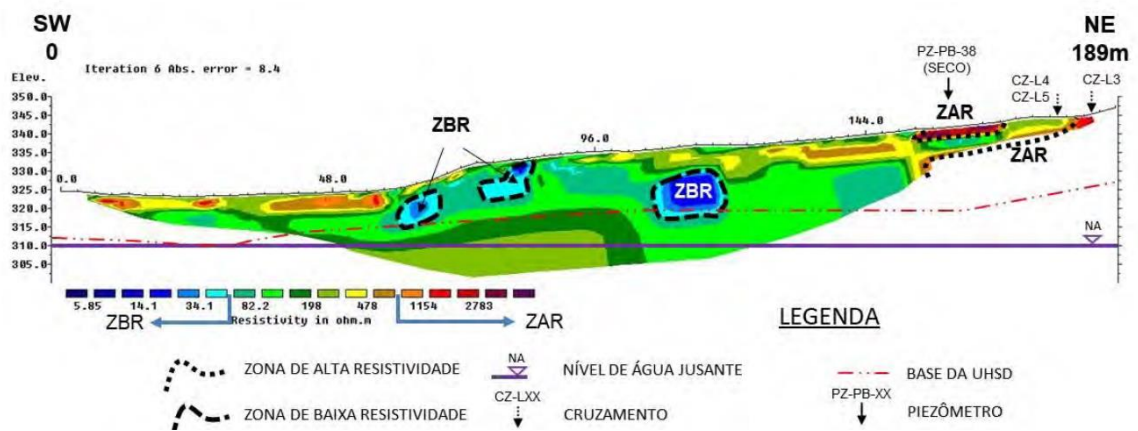


FIGURA 6 - SEÇÃO L31

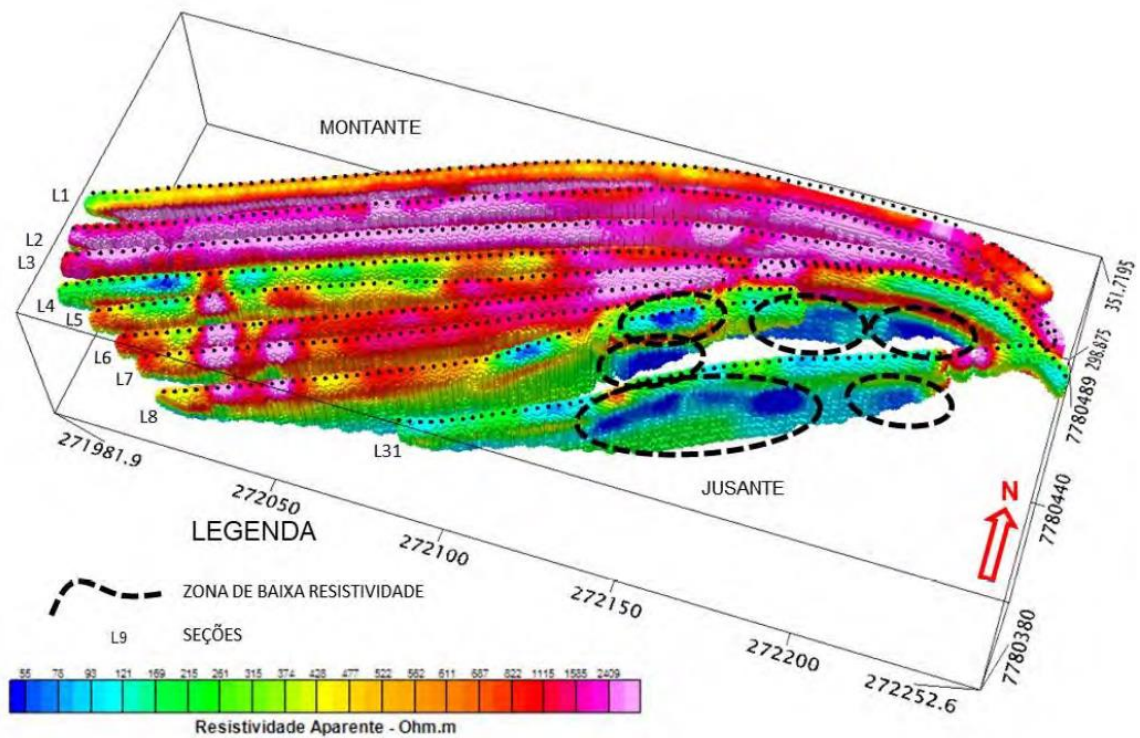


FIGURA 7 – MODELAGEM ELETRORRESISTIVIDADE TRIDIMENSIONAL DA MARGEM ESQUERDA

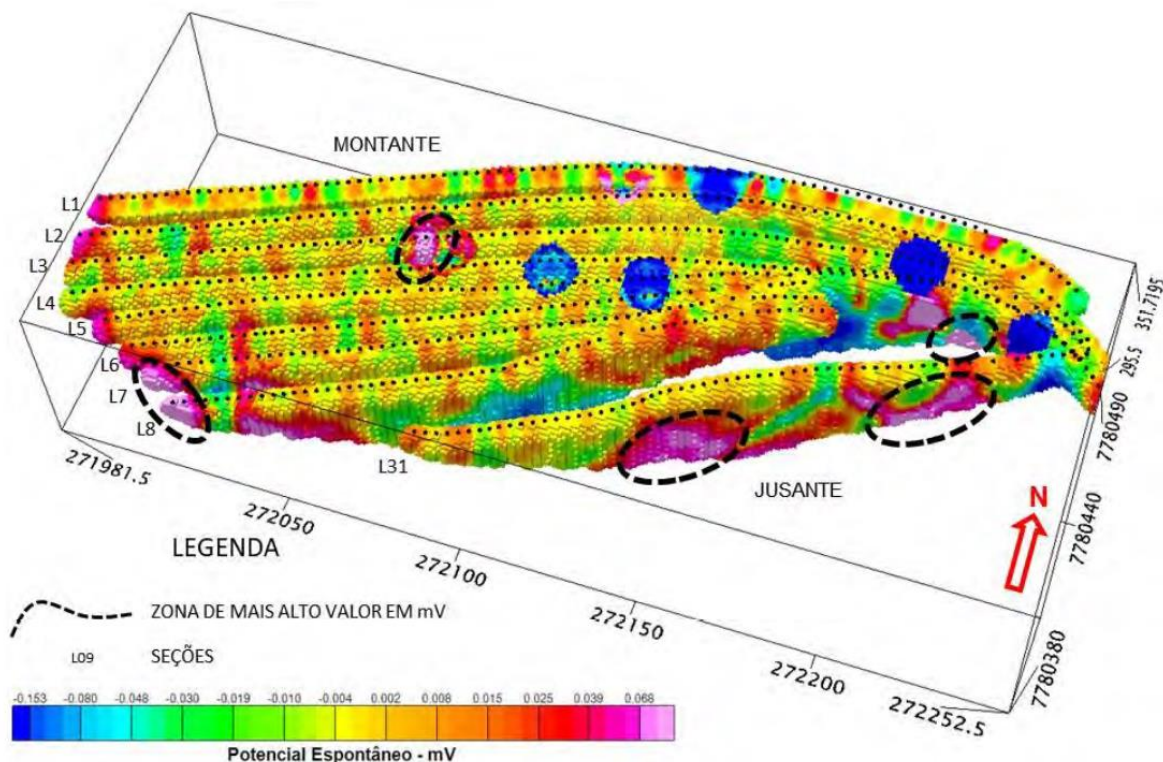


FIGURA 8 - MODELAGEM POTENCIAL ESPONTÂNEO TRIDIMENSIONAL DA BARRAGEM MARGEM ESQUERDA

2.6.2 Análises

2.6.2.1 Eletroresistividade

É possível observar zona de baixa resistividade (ZBR) com valores abaixo dos 50 Ohm.m variando de 9 a 57 metros de profundidade (zona azul da Figura 7). A baixa resistividade obtida, localizadas abaixo da cota de fundação da barragem, pode ser indício de presença de argila e/ou umidade. Destaca-se na campanha L31 (Figura 6) uma ZBR (zona de baixa resistividade) logo abaixo da base da barragem.

As zonas de alta resistividade (ZAR) estão localizadas predominantemente nas seções próximas ao topo da área estudada; na porção superficial do desenho, reflete uma maior compactação do material, que compreende o corpo da barragem de terra.

As leituras dos instrumentos de auscultação, realizadas concomitantemente à execução das campanhas, indicaram nível d'água nos contatos localizados no contato da barragem com a fundação e se apresentam secos os instrumentos localizados no terreno natural. Essas leituras serviram de indicação para a calibração dos modelos.

2.6.2.2 Potencial espontâneo

A caracterização da presença de uma possível zona preferencial de percolação de água são as zonas cujos valores são maiores acima de 0,1 mV para o potencial espontâneo.

A Figura 8 acima destaca em tons de rosa claro as regiões de valor de potencial espontâneo acima de 0,1 (um décimo) mV, os quais podem estar associados a zonas preferenciais de fluxo d'água, identificados na seção L3, nas proximidades da porção central; na seção L4, também na sua parte central e na confluência da seção L5, na seção L7 e L8 próximo ao seu início e na parte central da seção L31.

2.6.2.3 Correlação resistividade x Potencial espontâneo

Uma zona com altos valores de potencial espontâneo associada com zonas de baixas resistividades podem indicar uma região preferencial de fluxo, podendo ser dada essa definição nessa associação de informações.

A partir da Figura 7 e da Figura 8, é possível correlacionar a Figura 9, que buscou sobrepor os ensaios geofísicos de caminhamento elétrico e potencial espontâneo numa só imagem.

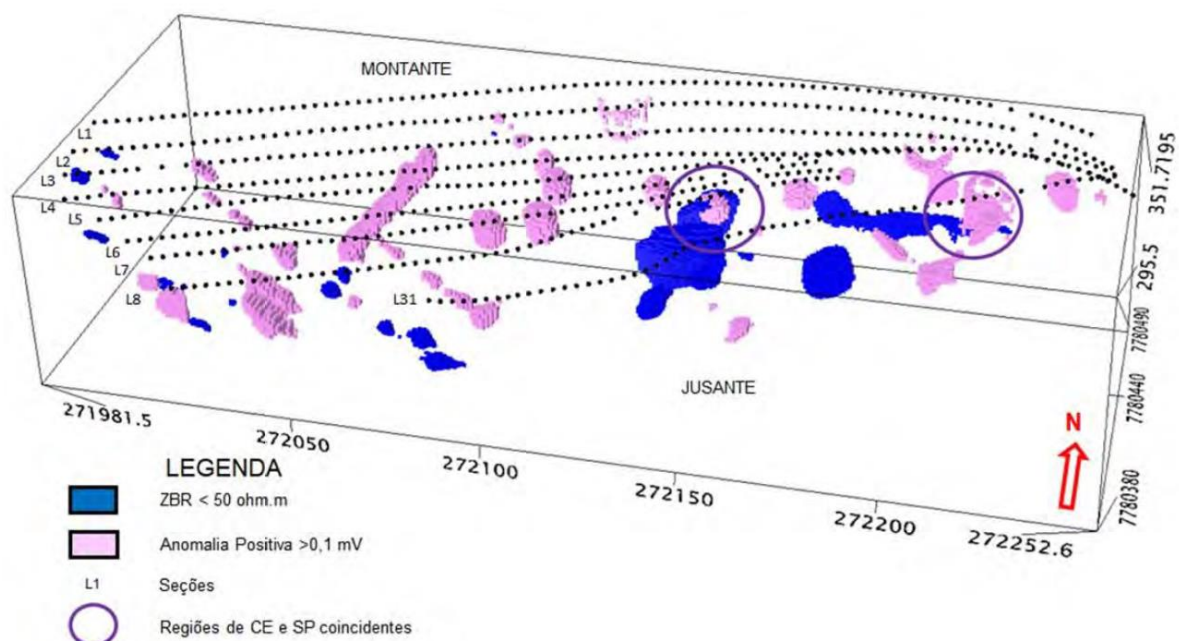


FIGURA 9 - MODELAGEM DA BARRAGEM PARA AS REGIÕES DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO COM RESISTIVIDADE MENOR QUE 50 OHM.M E DE POTENCIAL ESPONTÂNEO MAIOR QUE 0,1 MV

A Figura 9 destaca com um círculo as zonas de interesse para o caminhamento elétrico e para o potencial espontâneo, cuja correlação apresenta indício de regiões com fluxo preferencial. Impende ressaltar que, na imagem, a região de destaque se encontra abaixo da linha de fundação da barragem.

2.6.3 Análise das condições locais

Conforme demonstrado na Figura 7, temos uma região de maior umidade/ presença de água na região que está destacada com um círculo; já no terreno natural situado abaixo do corpo da barragem, a região corresponde à área destacada na Figura 10 abaixo.



FIGURA 10 – TALUDE NATURAL A JUSANTE DA BARRAGEM

Localmente, na região de baixa resistividade destacada na Figura 9, podemos observar a presença de unidade (Figura 10) caracterizada por uma região com vegetação mais verde e vistosa e solo mais úmido, com afloramento de água, que escorre em direção ao leito do rio. O afloramento se situa abaixo da fundação do maciço, numa área de corte do terreno natural, onde um filtro invertido foi construído e direciona o fluxo d'água a um medidor de vazão que é monitorado sistematicamente.

A Figura 11 abaixo mostra o medidor de vazão construído na área da surgência d'água identificada na imagem da Figura 10 e destacada na Figura 9 - Modelagem da barragem para as regiões do caminhamento elétrico com resistividade menor que 50 ohm.m e de potencial espontâneo maior que 0,1 mV.



FIGURA 11 - MEDIDOR DE VAZÃO

Como solução para a surgência d'água, foi realizado um filtro invertido, com a escavação local, colocação uma manta geotêxtil, areia e brita, de forma a direcionar a surgência d'água para um medidor de vazão com monitoramento contante. Após a reconformação do terreno, o medidor foi envolto com uma canaleta ao seu redor de forma a evitar que a água superficial proveniente de chuva não interfira nas leituras da vazão do medidor. O plantio de grama no entorno do medidor de vazão contribui para evitar caminhos preferenciais de água.

3 CONCLUSÕES

Ensaio de geofísica são um meio eficaz de investigação em barragens, oferecendo, de forma rápida e econômica, um panorama geral de uma barragem e sua condição de integridade.

Quando o caminhamento elétrico é feito em associação com outro ensaio, como o potencial espontâneo, temos um diagnóstico complementar entre os dois tipos de investigação bastante preciso e confiável das características da barragem, de possíveis anomalias que possam evoluir para uma catástrofe, e, principalmente, do comportamento e fluxo d'água dentro do maciço, servindo de um importante referencial para o entendimento de anomalias. Se a realização de um ensaio pode diagnosticar possíveis manifestações patológicas, dando tempo hábil para o empreendedor agir; o monitoramento constante e periódico pode trazer um panorama evolutivo dos problemas, permitindo uma intervenção e correção antes que um acidente possa ocorrer, o que pode reduzir muito os custos de recuperação.

3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS

No caso apresentado neste documento, foi observado uma região de baixa resistividade destacada em azul nas figuras 4, 5, 6 e na figura 7, associados à zonas de alto potencial

espontâneo exposto na Figura 8 e Figura 9. Essas zonas foram identificadas a partir de ensaios de eletrorresistividade através do caminhamento elétrico e potencial espontâneo realizados com equipamento do modelo Terrameter LS. Os resultados apresentaram zonas com baixa resistividade para o caminhamento elétrico concomitantemente às zonas de alto potencial espontâneo (Figura 9), que podem indicar a presença de umidade ou fluxo.

3.2 SITUAÇÃO DA BARRAGEM

Em campo foi observado uma região com vegetação mais verde e exuberante (Figura 10), com uma surgência d'água a jusante da barragem, no talude em terreno natural, ambas localizadas abaixo da cota de fundação da barragem, identificada já desde a construção da barragem segundo registros.

Diante da situação e, de forma a proporcionar o monitoramento periódico, foi construído um medidor de vazão (Figura 11) para conduzir essa surgência d'água permitindo o monitoramento periódico semanal, obtenho, assim, um diagnóstico preciso da situação, que se mantém estável.

Assim, o ensaio de caminhamento elétrico associado ao de potencial espontâneo consiste num eficiente meio de diagnóstico do comportamento do solo no interior do maciço de uma barragem, resultando numa importante ferramenta de observação, capaz de diagnosticar anomalias no corpo de uma barragem de forma confiável e economicamente viável.

REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Relatório de segurança de barragens 2022 /Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. – Brasília, 2023. CDU: 627.82(047). Site: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/documentos-e-capacitacoes?tipo=documento&id=121>

FISHER, Wendy D.; CAMP, Tracy. K; KRZHIZHANOVSKAYA, Valeria V. Anomaly detection in Earth dam and leave passive seismic data using support vector machines and automatic feature selection. Article in Journal of Computational Science. 2016. DOI: 10.1016/j.jocs.2016,11,016. Página 146 a 153.

JANSEN, Robert B. Dams and Public Safety – A Water Resources Technical Publication – U. S. Department of Interior - Bureau of Reclamation, 1983.

LACERDA FILHO, Joffre Valmório de; BRITO, Reinaldo Santana Correia de; SILVA, Maria da Glória da; OLIVEIRA, Cipriano Cavalcante de; MORETON, Luiz Carlos; MARTINS, Edson Gaspar; LOPES, Ricardo da Cunha; LIMA, Thiers Muniz; LARIZZATT, João Henrique; VALENTE, Cidney Rodrigues - Geologia e recursos minerais do estado de Mato Grosso do Sul. CPRM; SEPROTUR/MS; EGRHP/MS, 2006. Relatórios técnicos. Site: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10217>

MELLO, Flavio Miguez de, GUIDICINI, Guido, SANDRONI, Sandro Salvador - Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil – Livro eletrônico 2021 - ISBN 978-65-990860-1-4.

PEREIRA, Geraldo Magela. Material didático do curso de Pós-Graduação Lato Sensu da Universidade Federal da Bahia - Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, 2023.

ROCHA, Demetrius Cunha Gonçalves; BRAGA, Marco Antonio da Silva; RODRIGUES, Camila Alves. Geophysical methods for BR tailings dam Research and monitoring in the

mineral complexo f Tapira – Minas Gerais, Brasil. Revista Brasileira de Geofísica (2019) 37(3) páginas 276-289 – 2019 Sociedade Brasileira de Geofísica ISSN: 0102-261X.

RODRIGUES, Camila Tavares. Geofísica aplicada à investigação da barragem de rejeito BR, do complexo de mineração de Tapira, Minas Gerais. Trabalho de final de curso de geologia. Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito necessário à obtenção do título de Bacharel em Geologia. Rio de Janeiro. 2018.

SILVA, Roberto Albuquerque. Geofísica aplicada à caracterização da barragem de rejeito de mineração B1, Cajati, São Paulo. Dissertação de Mestrado (Geologia). Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências (Geologia), 2019.

SOUZA, Luiz Antonio Pereira de e GANDOLFO, Otavio Coaracy Brasil – Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente: manual de boas práticas. Primeira edição. ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo, 2021. ISBN: 978-65-88460-02-3.

ZORZI, Roberto Rafael e RIGOTI, Augustinho - Aplicação de métodos geoeletricos para monitoramento da barragem de concreto da UHE Gov. José Richa. Boletim Paranaense de Geociências - Universidade Federal do Paraná - Volume 64-65 (2011) 48-58.