

CAPÍTULO 2

GEOFÍSICA APLICADA À SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: APLICAÇÃO DA TOMOGRAFIA ELÉTRICA DE RESISTIVIDADE A UM ESTUDO DE CASO NA BAIXADA CUIABANA NO ESTADO DE MATO GROSSO

Data de submissão: 19/10/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Marcio Correia de Amorim

Universidade Federal de Mato Grosso
(UFMT)
Cuiabá/MT, Brasil.
<https://orcid.org/0009-0004-3614-5807>

Aplicação da Eletrorresistividade em Barragens

RESUMO: As barragens são estruturas construídas com o objetivo de criar um reservatório, para armazenamento de materiais fluidos ou com elevado teor de água. Esse tipo de estrutura é usado para as mais diversas finalidades dentre as quais se destacam a acumulação de água para a dessedentação, geração de energia ou mesmo a disposição de rejeitos de mineração. Essas estruturas podem ser construídas com o emprego de diversas técnicas e materiais. A indústria da mineração normalmente faz uso de barragens de terra. Contudo, tais barramentos apresentam problemas que, em alguns casos, só podem ser detectados e monitorados, adequadamente, com instrumentação ou métodos de investigação geofísica. Sendo assim, o presente trabalho

objetiva a aplicação do método geofísico da eletrorresistividade para a análise e compreensão da percolação de água no corpo de uma barragem localizada no limite entre os municípios de Poconé e Nossa Senhora do Livramento, Estado de Mato Grosso, bem como a relação desse fenômeno com a segurança desse tipo de estrutura. Os perfis para realização dos ensaios foram construídos na crista, na berma e na base de dois setores da barragem, tendo sido aplicada a técnica do caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo. Como resultado, além da demonstração da viabilidade de emprego desse método para barragens construídas de forma similar à selecionada, foram identificados locais para aprimoramento na investigação geotécnica e no plano de monitoramento, considerando as anomalias de resistividade detectadas.

PALAVRAS-CHAVE: Geofísica; Tomografia de Resistividade Elétrica; Baixada Cuiabana; Barragens de Rejeito; Geotecnica.

GEOPHYSICS APPLIED TO THE SAFETY OF MINING TAILINGS DAMS: APPLICATION OF ELECTRICAL RESISTANCE TOMOGRAPHY TO A CASE STUDY IN THE CUIABANA BAIXADA IN THE STATE OF MATO GROSSO

ABSTRACT: Dams are structures built to create a reservoir for storing fluid or high water content materials. This type of structure is used for the most diverse purposes, among which the accumulation of water for desedentation, power generation or even the disposition of mining tailings stands out. These structures can be built with the use of various techniques and materials. Mining industry usually use earth dams. However, these dams have problems that, in some cases, can only be detected and monitored properly with instrumentation or geophysical research methods. Thus, the present work aims to apply the geophysical method of electroresistivity for the analysis and understanding of water percolation in the body of a dam located on the boundary between the municipalities of Poconé and Nossa Senhora do Livramento, State of Mato Grosso, as well as the relationship of this phenomenon with security of this type of structure. The profile lines to perform the tests were built on the crest, berm and the base of two sectors of the dam, and the electrical walking technique with a dipole-dipole arrangement was applied. As a result, in addition to demonstrating the viability of employment of this method for dams constructed in a similar way to the selected, places were identified for improvement in geotechnical investigation and monitoring plan, considering the resistivity anomalies detected.

KEYWORDS: Geophysics; Electrical Resistance Tomography; Baixada Cuiabana; Tailing Dams; Geotechnics.

1 | INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas e usadas há séculos, cuja complexidade da metodologia construtiva evoluiu ao longo do tempo. Estas, por sua vez, podem ser construídas com diferentes finalidades e situações desde geração de energia elétrica, controle de cheias, abastecimento, contenção de rejeitos industriais e de mineração, dentre outros (Bento, 2017). As barragens que têm como função o recebimento e armazenamento de rejeito de mineração são, usualmente, denominadas de Barragens de Rejeito (Morgado, 2022).

Os rejeitos, produzidos em grande quantidade, vêm afetando de forma qualitativa e quantitativa o meio ambiente. Esse fato tem gerado uma preocupação cada vez maior nas empresas, que buscam minimizar os impactos ambientais e os custos associados aos processos de contenção desse material. Essa preocupação em dispor sistematicamente os rejeitos, visando minimizar os impactos ambientais e melhorar os aspectos de segurança e economia, faz com que as empresas, optem, cada vez mais, pela deposição desses rejeitos em sistemas de barragens (Espósito, 2020).

No caso das barragens destinadas à acumulação de rejeito de mineração, normalmente são empregadas estruturas de terra para essa finalidade. Estas, por sua vez, têm a vantagem de serem construídas em estágios, na medida em que os rejeitos

são gerados, diluindo custos da construção e operação (Duarte, 2008). As barragens de terra são as mais elementares obras de barragens e normalmente se prestam para qualquer tipo de fundação, desde a rocha compacta, até terrenos construídos de materiais inconsolidados. Esses últimos, aliás, são seu campo típico de aplicação. (Marangon, 2004).

Embora apresentem algumas vantagens, as barragens de terra podem ser acometidas de alguns problemas. Os principais problemas que ocorrem em barragens podem ser associados a falhas de projetos, problemas operacionais e/ ou manutenção inadequada (Bertuluci, 2020). Dentre esses problemas, podemos citar erosões superficiais, presença de vegetação, abatimentos, desniveis e erosão interna (*piping*). Tais problemas precisam ser monitorados para evitar que evoluam ao longo do tempo. Dessa forma, é imperativo um controle de construção dessas barragens associado a um monitoramento constante ao longo de sua vida útil para garantir segurança contínua e compatibilidade ambiental (Williamson, 1996 *apud* Espósito, 2020). Quando bem executadas, essas atividades de inspeção e monitoramento apontam, com a devida antecedência ou urgência, a necessidade de reabilitar as barragens que estejam em perigo ou risco de rompimento (ANA, 2016).

Parte dos problemas que afeta as barragens de terra pode ser identificada por inspeção visual. Contudo, problemas relacionados à percolação interna no corpo ou na fundação do barramento são difíceis de detectar. A ruptura por erosão regressiva ocorre de jusante para montante, formando um tubo (*piping*), com carreamento de partículas de solo pelo maciço, devido ao fluxo de água descontrolado de montante para jusante. Nesse cenário, ocorre deslocamento de partículas do barramento que desestabiliza o equilíbrio de forças na matriz do solo e o respectivo estado de tensões no maciço por onde ocorre esse fluxo. O fenômeno é progressivo até a formação de brecha e colapso da estrutura (Ladeira, 2007). Como esse fenômeno ocorre no interior do corpo da estrutura, quando existe algum sinal visível de sua ocorrência (umidade ou surgência na face do talude), normalmente, o processo já se encontra em fase avançada de desenvolvimento. Sendo assim, a detecção desse tipo de anomalia nos seus estágios iniciais só é possível de ser executada por meio de instrumentação e monitoramento. Contudo, em casos onde o projeto de instrumentação seja inexistente ou não esteja adequado à barragem e não exista um plano complementar de monitoramento, esse tipo de problema pode ter sua ocorrência mascarada da equipe técnica responsável pela estrutura.

1.1 Barragens de mineração no Brasil e no Estado de Mato Grosso

Segundo dados disponibilizados em 2023 pela Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), versão pública, existem, atualmente, no Brasil, 928 barragens de mineração. Desse total, cerca de 50% possuem características que as enquadram nos critérios estabelecidos pela

Lei nº 12.334/2010 para inclusão na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Considerando apenas os números referentes ao Estado de Mato Grosso, há registros da existência 162 barragens de mineração, com cerca de 48% incluídas na PNSB, segundo os critérios estabelecidos pela Lei nº 12.334/2010.

Analizando o mapa da Figura 1, verifica-se que cerca de 77% das barragens existentes em Mato Grosso se localizam nos municípios presentes na Baixada Cuiabana. O termo em questão termo foi usado para designar a área rebaixada compreendida entre o Planalto dos Guimarães, a Província Serrana e o Pantanal Mato-grossense (Almeida, 1964 *apud* Barros *et al.*, 1982). Essa região compreende quatorze municípios: Acorizal, Barão de Melgaço, Campo Verde, Chapada dos Guimarães, Cuiabá, Jangada, Nobres, Nossa Senhora do Livramento, Nova Brasilândia, Planalto da Serra, Poconé, Rosário Oeste, Santo Antônio do Leverger e Várzea Grande.

Com base nas informações disponibilizadas no portal de dados abertos da ANM, verificou-se que as barragens de rejeitos de mineração existentes em Mato Grosso estão associadas à exploração de ouro. Por esse motivo, é possível inferir que o material contido no reservatório dessas barragens seja proveniente do processo de beneficiamento de minerais auríferos existentes nesses locais.

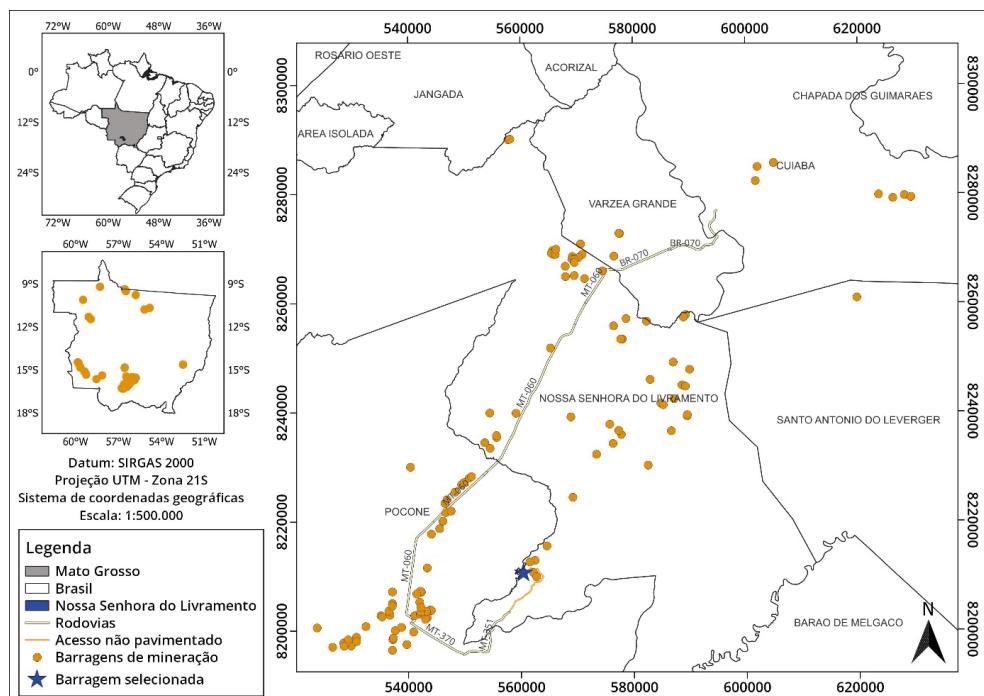


Figura 1. Distribuição das barragens de mineração no Estado de Mato Grosso e em uma região abrangida pelos municípios de Cuiabá, Várzea Grande, Nossa Senhora do Livramento, Poconé e Santo Antônio do Leverger. Além disso, está designado o local da barragem selecionada para o trabalho.

1.2 Histórico da exploração do ouro na baixada cuiabana

Os primeiros descobrimentos de ouro em Mato Grosso ocorreram na região do Alto Paraguai, pela expedição do espanhol Ayolas, em 1536 (Frota, 1942 *apud* Miranda, 1997). Na região da baixada cuiabana, a exploração do ouro se inicia no século XVIII, quando Pascoal Moreira Cabral Leme, em 1718, partindo de Itu (SP) com propósito de fazer o tráfico de índios coxiponé, atingiu o rio Coxipó-Mirim, local onde minerou o primeiro ouro; encontrando índios ornamentados com adereços do metal, chegou facilmente às fontes auríferas. O grupo de Pascoal Moreira Cabral Leme recebeu a adesão dos irmãos Antunes (Gabriel, Antonio, Felipe e João), bandeira que arregimentou os índios Aripoconé e, no local, surgiu o primeiro núcleo de povoamento situado nas margens do rio Coxipó-Mirim, de nome Arraial da Forquilha. Com a descoberta de ouro, sucedeu-se a mineração rudimentar com o uso de ferramentas manuais e simples, ficando a captura de índios relegada a segundo plano (Miranda, 1997).

Na década de 80, uma nova “corrida do ouro” se iniciou na Baixada Cuiabana, transformando alguns municípios dessa região (Cuiabá, Várzea Grande, Santo Antônio do Leverger, Nossa Senhora do Livramento e Poconé) em grandes produtores de ouro, dando origem ao termo de Província Aurífera Cuiabá-Poconé. A princípio, o ouro era lavrado em depósitos secundários, aluviões e lateritas. Com a intensa exploração, os 21 depósitos primários foram expostos, de modo que os veios de quartzo e suas encaixantes, pertencentes ao Grupo Cuiabá, passaram também a ser explorados (Fernandes *et al*, 2006 *apud* Paula, 2019).

1.3 Acidentes envolvendo barragens de mineração

O Boletim nº 121 de 2001 da International Commission on Large Dams (ICOLD), em português Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), apresenta as estatísticas de 220 casos de acidentes em barragens destinadas à disposição de rejeitos ocorridos entre os anos de 1917 e 2000. Conforme esse trabalho, problemas relacionados à percolação de água dentro do corpo do barramento são a quinta causa mais recorrente dos acidentes envolvendo essas estruturas. Isso se deve ao fato de que o sistema de drenagem interna é uma estrutura crítica que muitas vezes foi negligenciada no passado, resultando em superfícies freáticas perigosamente altas dentro do corpo da barragem de rejeitos. Como se sabe, os taludes externos de uma barragem de rejeitos são muito sensíveis ao nível da superfície freática (ICOLD, 2001).

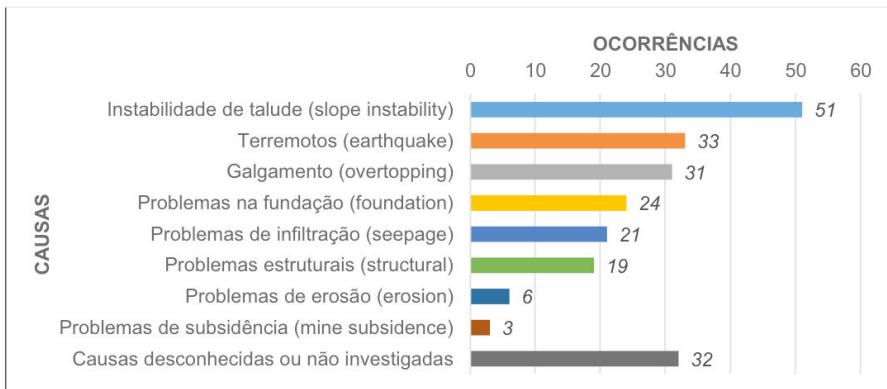


Figura 2. Número de ocorrências das causas de ruptura de barragens de rejeito ocorridas entre os anos de 1917 e 2000 no mundo. Extraído de ICOLD (2001).

Ocorreram no Brasil, até o mês de maio de 2020, o rompimento de nove barragens de rejeito. Destas, oito encontravam-se no estado de Minas Gerais e uma no estado de Mato Grosso, sendo elas: Barragem de Fernandinho, Barragem Rio das Pedras, Barragem Macacos, Barragem de Contenção de Rejeito Cataguases, Barragem de São Francisco, Barragem Herculano Mineração, Barragem Fundão, Barragem da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho) e Barragem TB1 (Morgado, 2022). Segundo essas estatísticas, em pelo menos cinco desses casos houve a morte de funcionários das empresas ou de residentes nas comunidades vizinhas a esses empreendimentos.

No dia 5 de novembro de 2015, por volta das 16h00, no município de Mariana/MG, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, liberando um volume estimado de 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, água e materiais utilizados em sua construção (lama), que correspondem a quase 70% do volume total acumulado em Fundão (Bento, 2017). Dentre os sinais evidenciavam a existência de problemas na estrutura, surgências em superfície começaram a aparecer no recuo da ombreira esquerda em várias elevações e ocasiões durante o ano de 2013 (Morgenstern *et al*, 2016). Resumidamente, o rompimento da barragem teve como causas principais a elevada saturação do material que compõe o corpo do barramento, deficiência no monitoramento e danos em vários instrumentos, alteamento em ritmo acima do que as características do material permitiam, obstrução de um dique a falha no sistema de drenagem interna da barragem (Morgado, 2022).

No dia 25 de janeiro de 2019, às 12h35, aconteceu o rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão, da mineradora Vale S.A., localizada no município de Brumadinho, Região Metropolitana de Belo Horizonte. A barragem estava inativa desde 2015 e armazenava 12 milhões de metros cúbicos de lama de rejeitos da mineração de ferro (Oliveira *et al*, 2019). O dique de partida continha características que impediam a drenagem através do pé da

barragem. A falta de recursos de drenagem significativos, juntamente com a presença de camadas de rejeitos finos menos permeáveis resultou em um nível freático elevado. Uma urgência na face da barragem era observada periodicamente, desde a época do quarto alteamento. Dentre as causas que contribuíram para a ruptura da barragem, podemos destacar: taludes demasiadamente íngremes, deficiência no controle da extensão da praia de rejeitos, problemas construtivos e de controle granulométrico do material do barramento, deficiências na drenagem interna, cimentação entre partículas do material do barramento devido à presença de ferro e elevada precipitação regional (Morgado, 2022).

No dia 01 de outubro de 2019, houve um acidente envolvendo esse tipo de estrutura no Município de Nossa Senhora do Livramento, Estado de Mato Grosso. O ocorrido não deixou vítimas fatais e dois trabalhadores ficaram feridos e foram levadas ao hospital com ferimentos leves, também o incidente não afetou nenhuma área de preservação permanente (ANM, 2019).

Dentre as obrigações estipuladas pela ANM em seus normativos para as empresas que operam barragens de mineração, está a realização de inspeções periódicas quinzenais e o encaminhamento das respectivas informações para a referida autarquia, por meio do dos Extratos de Inspeção Regular (EIR)¹. Os extratos de inspeções regulares enviados não relataram qualquer ocorrência de anomalias na estrutura da barragem e a mesma sempre possuía pontuações zero em todos itens do estado de conservação desde 21 de setembro de 2019 (ANM, 2019). Nesse caso, não houve a divulgação de relatório conclusivo a respeito das causas da ruptura do barramento.

Analizando os dados a respeito das causas dos acidentes apresentados, é possível perceber que os problemas relacionados à infiltração e percolação no corpo da barragem aparecem de forma recorrente entre as causas. Mesmo no caso onde não houve divulgação do relatório das causas, é possível inferir que o problema causador da ruptura ocorreu no interior do corpo do barramento, tendo em vista que nas informações encaminhadas ao órgão regulador não foram reportadas ocorrências de problemas aparentes.

Uma das formas mais eficazes de evitar a ocorrência e evolução de problemas em barragens de terra é a implementação de um plano de monitoramento adequado. Além disso, esse monitoramento deve começar desde as etapas construtivas da estrutura e seguir até sua completa descaracterização². O projeto de instrumentação deve prever a instalação de instrumentos para, no mínimo, controle das vazões da drenagem interna, dos níveis de água e poropressão no interior do maciço da barragem, das suas fundações e deformações (ABNT, 2013). Dessa forma, torna-se possível o acompanhamento do comportamento do barramento e a detecção antecipada de condições que poderiam acarretar no surgimento futuro de problemas.

1 À época da ruptura da barragem, se encontrava vigente a Portaria nº 70.389/2017. Posteriormente, em fevereiro de 2022, o referido normativo foi substituído pela Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) da ANM nº 95/2022.

2 Segundo a Resolução da Diretoria Colegiada da ANM nº 95/2022, uma barragem descaracterizada é uma estrutura que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem.

Sempre que possível, o monitoramento e a identificação de problemas em uma barragem de terra, devem ser realizados causando o mínimo de perturbação à estrutura. A vantagem da aplicação de métodos geofísicos é que ela pode gerar imagens de todo interior da barragem numa correspondência de superfícies. Quando essas seções são associadas e sobrepostas é possível gerar visualizações que compilam os parâmetros em três dimensões. Através do contraste entre as propriedades físicas dos materiais podemos estabelecer o contato entre os diferentes materiais e sua umidade (Silveira, 2021). Assim esse conjunto de métodos traz informações adicionais à instrumentação tradicionalmente usada (piezômetros, marcos superficiais, etc.). Tal condição, ganha ainda mais importância em quando a barragem tem um histórico de ocorrência de anomalias, naquelas onde não se tem informações a respeito de sua construção e operação ou mesmo nos naquelas onde a estrutura está sendo descaracterizada por não apresentar mais condições seguras de operação. Contudo, mesmo barragens descaracterizadas, devem ser monitoradas após a conclusão das obras de descaracterização, objetivando assegurar a eficácia das medidas de estabilização (ANM, 2022).

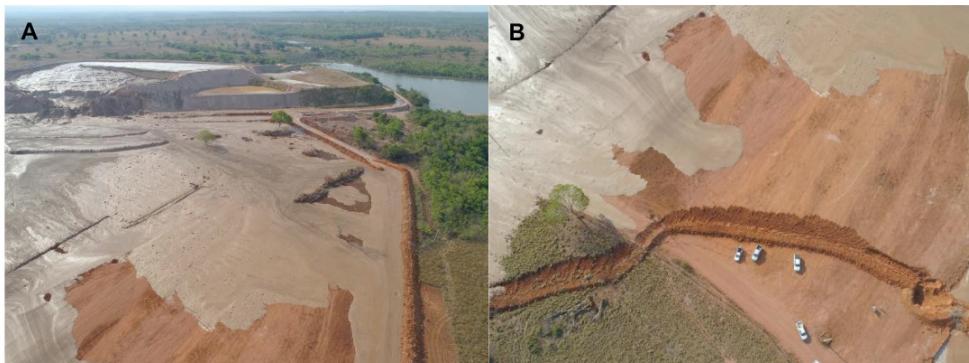


Figura 3. Fotografias aéreas divulgadas na imprensa evidenciam (A) a presença de rejeitos extravasados no rompimento da barragem (barramento do fundo) em Nossa Senhora do Livramento, (B) a construção de trincheiras e diques para a contenção dos rejeitos. Fonte: Portal G1 MT³

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A escolha da baixada cuiabana para a realização do presente estudo teve como principal motivo o fato de que essa região concentra a maior parte das barragens de mineração no estado Mato Grosso. Além disso, contribuiu para essa escolha a importância da mineração de ouro desenvolvida nessa localidade. A seleção da área e da barragem que seriam, efetivamente, objeto do estudo levou em consideração os seguintes critérios: existência de informações históricas construtivas, existência de dados de operação e manutenção, existência de instrumentação instalada e dados das respectivas leituras, proximidade com a capital e possibilidade de obtenção de autorização para a realização

³ Disponível em: <https://g1.globo.com/mt/mato-grosso/noticia/2019/10/02/rompimento-de-barragem-de-rejeitos-de-mineracao-deixa-moradores-sem-energia-em-mt.ghtml>. Acesso em 18 de junho de 2023.

dos levantamentos de campo necessários ao estudo.

2.1 Caracterização Geológica

A área objeto desse estudo se localiza no início do pantanal matogrossense, em uma região limítrofe entre sedimentos da Formação Pantanal, depósitos aluvionares e as rochas do Grupo Cuiabá. Contudo, a barragem e na qual foi realizado o ensaio, se localiza sobre sedimentos e depósitos aluvionares, conforme pode ser observado na Figura 4.

O Pantanal Mato-grossense é constituído pela Formação Pantanal e Depósitos Detriticos e Aluviais (Souza *et al*, 2006). A geologia da Baixada Cuiabana, por sua vez, é constituída por metamorfitos do Grupo Cuiabá, por coberturas detrito-laterítica e pela Formação Pantanal. O Grupo Cuiabá faz parte da Faixa Paraguai do Proterozóico Superior e engloba metaconglomerados, filitos microconglomeráticos, metarenitos, filitos sericíticos e carbonosos, meta-arcóseos, metamargas, lentes de mármore calcítico e dolomítico (Miranda, 1997).

2.1.1 Formação Pantanal

Segundo Miranda (1997), a Formação Pantanal consiste de sedimentos quaternários inconsolidados de natureza areno-argilosas e siltico-argilosa, arenosa (areia média a conglomerática) e aluviões do interflúvio. Segundo Lima *et al* (2017) e Corrêa e Couto (1972), a Formação Pantanal é constituída de uma sequência argilo-arenosa inconsolidada, estratificada horizontalmente, formada por uma alternância de argila cinza e areia média a fina, de cor branca, amarela e vermelha, com classificação regular a boa. Além do quartzo, as areias possuem conteúdo regular de caulim. Entremeados às camadas argilosas e arenosas, são localizados leitos laterizados de pequena espessura de areias e conglomerados finos.

Os depósitos da Formação Pantanal são poucos espessos, com a composição areno-argilosos e siltico-argilosos, com granulometria predominantemente fina ou muito fina, ocorrendo também areias médias a conglomeráticos. Os grãos de quartzo são subarredondados e arredondados, as superfícies polidas com intercalações de níveis argilosos, tendo a fração cascalho, o resultado da movimentação ou dinâmica atual dos rios (Almeida, 1964).

2.1.2 Grupo Cuiabá

O Grupo Cuiabá se estende por toda a Depressão Cuiabana, entre a Província Serrana e a Bacia Sedimentar do Paraná. É caracterizado por uma sequência predominantemente de filitos com intercalações de quartzitos, metagrauvacas, metarenitos, metaparaconglomerados, com raras ocorrências de metacalcários e filitos calcíferos (Calachibete, 2016).

As primeiras descrições das rochas do Grupo Cuiabá ocorreram na década de 60 com trabalhos de individualização litoestratigráfica, e se deve a Almeida, que em 1964, individualizou os Grupos Jangada e Cuiabá (Calachibete, 2016). Posteriormente, foram realizados novos trabalhos de reconhecimento nos domínios de rochas pertencentes ao Grupo Cuiabá, a exemplo daquele efetuado por Dardenne (1980).

Mais recentemente, uma revisão das unidades litoestratigráfica do Grupo Cuiabá foi proposta por Tokashiki e Saes (2008). Nesse trabalho, as oito subunidades litoestratigráficas da classificação feita por Luz *et al* (1980) são agrupadas em quatro unidades estratigráficas, que receberam suas respectivas denominações considerando a literatura geológica sobre a Faixa Paraguai. Dessa forma, a Formação Campina de Pedras é adotada segundo o conceito de Freitas (inédito) englobando as subunidades 1 e 2 de Luz *et al.* (1980) e correspondendo à Unidade Inferior de Alvarenga (1988). A Formação Acorizal (Almeida 1964) é correlacionada com as subunidades 3, 4 e 5 de Luz *et al.* (1980) e à Fácies Intermediária da Unidade Média Turbidítica Glácia-marinha de Alvarenga (1988). Empresta o nome da cidade situada a cerca de 70km a norte de Cuiabá, denominação esta anteriormente adotada por Almeida (1964) como unidade basal do Grupo Jangada, abrigando ainda as formações Engenho, Bauxi e Marzagão. Corresponde parcialmente à Formação Marzagão de Almeida (1964), às subunidades 6 e 7 de Luz *et al.* (1980) e à Fácies Proximal da Unidade Turbidítica Glácia-marinha de Alvarenga (1988). Abriga também a Fácies Guia (mármore calcíticos e dolomíticos aflorantes na Sinclinal da Guia) e os quartzitos que formam o alinhamento de serras que se estende da Serra de São Vicente até Barão de Melgaço (Tokashiki e Saes, 2008).

2.2 Mineralização aurífera

Os depósitos auríferos nos municípios de Nossa Senhora do Livramento e Poconé se localizam no “*trend*” estrutural conhecido como Pirizal – Bento Gomes (Calachibete, 2016). Miranda (1997) e Silva *et al* (2002) identificaram evidências de ocorrência de três fases deformacionais em alguns depósitos da Baixada Cuiabana, sendo elas: Segundo esses autores, essas fases são representadas por foliação metamórfica, dobramentos, falhamentos e veios de quartzo. Silva (2002) propôs ainda que as duas primeiras fases deformacionais apresentam direção NE e a terceira possui direção NW.

No alinhamento estrutural mencionado, os depósitos auríferos são explorados a céu aberto e por pequenos grupos de mineradores. O ouro está associado a veios de quartzo que preencheram sistemas de fraturamento, e disseminados nas encaixantes, proximais a essas feições estruturais. (Calachibete, 2016). Silva *et al* (2002) concluiu que os melhores teores de ouro estão localizados nos veios de direção NW, perpendiculares aos cisalhamentos regionais, de direção NE.

Segundo Miranda (1997) os depósitos auríferos da Baixada Cuiabana encerram forte controle estrutural e estratigráfico descontínuo e distinguem-se em três categorias: depósitos hidrotermais, com o ouro em veios de quartzo com piritas, discordantes, subverticais e largura centimétrica a métrica; depósitos de enriquecimento supergênico, que geraram platôs lateríticos, onde o ouro ocorre na forma de pepitas com distribuição irregular e granulometria variável; e depósitos de *Placers*, com o ouro em depósitos de aluviões e elúviios e colúviões quartzosos, gerados durante os períodos Terciário e Quaternário por constantes processos de aplanação do relevo.

O empreendimento que abriga a barragem objeto deste estudo é uma empresa mineradora que explora minério de ouro. Segundo as informações disponibilizadas no portal de dados abertos⁴ da ANM, a área se localiza no limite entre os Municípios de Poconé e Nossa Senhora do Livramento, Estado de Mato Grosso, conforme pode ser visualizado na Figura 4. Ainda segundo essas informações, a concessão de lavra que autorizou a lavra no local foi expedida no ano 2000.

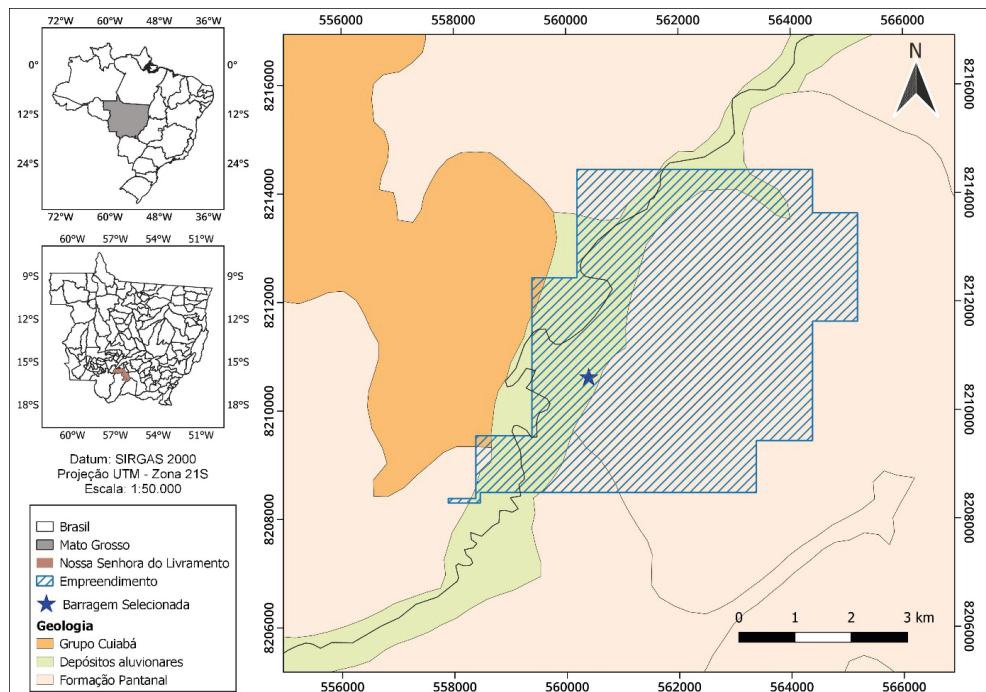


Figura 4. Mapa geológico da área onde se localiza o empreendimento e barragem. A área autorizada para exploração mineral se encontra hachurada na figura. O empreendimento se encontra sobre sedimentos da Formação Pantanal, depósitos aluvionares e pequena porção do Grupo Cuiabá. A barragem, também indicada na figura, se encontra assentada sobre sedimentos.

⁴ Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos>. Acesso em 19 de junho de 2023.

3 | MÉTODOS GEOFÍSICOS

A geofísica é uma ciência que apresenta uma íntima relação com a Física e a Geologia, procurando resolver, a partir da Física, problemas colocados em termos geológicos (Braga, 2006). Em outras palavras, é uma ciência que busca compreender as estruturas do planeta tendo como base a interação entre as propriedades de seus minerais constituintes e campos físicos aplicados a estes. Por esse motivo, o sucesso da aplicação dos métodos geofísicos está diretamente relacionado com a amplitude dos contrastes das propriedades físicas entre o “alvo” e seu “entorno” (Souza e Gandolfo, 2021).

A geofísica aplicada tem evoluído desde os primeiros trabalhos realizados no início do século 20 (Souza e Gandolfo, 2021). Devido à simplicidade e aos custos relativamente baixos, os métodos geofísicos vêm sendo cada vez mais utilizados em diversas áreas do conhecimento, tais como: prospecção mineral, geologia de engenharia, geotecnologia, hidrogeologia, monitoramento ambiental, dentre outros. Além disso, com a evolução da tecnologia, em especial, da eletrônica, observa-se a aplicação da geofísica no campo do monitoramento em tempo real de variações das diversas propriedades físicas dos terrenos. O monitoramento de barragens, por meio dos métodos da microssísmica, da eletrorresistividade e do potencial espontâneo, ilustra algumas das possibilidades neste vasto potencial campo de atuação da geofísica aplicada (Souza e Gandolfo, 2021).

3.1 Métodos geoelétricos

Segundo Braga (2006), os métodos geoelétricos, com suas diversidades de modalidades, são muito utilizados no mundo inteiro, atuando nas mais variadas áreas de conhecimento. Além disso, enquanto que os métodos da gravimetria e magnetometria, são considerados de campo natural, estudando as perturbações que determinadas estruturas ou corpos produzem sobre campos preexistentes, os métodos geoelétricos (exceção do potencial espontâneo e magnetotelúrico) são artificiais, ou seja, o campo físico a ser estudado é criado por meio de equipamentos apropriados.

Conforme o próprio nome sugere, os métodos geoelétricos estudam as perturbações que os diversos minerais existentes no planeta provocam em campos elétricos, sejam estes naturais ou induzidos. Alguns autores, como Orellana (1972) e Iakubovskii & Liajov (1980), propuseram classificações para os diferentes métodos geoelétricos, visando a padronização da denominação destes. Essas classificações se baseiam em critérios como o tipo de campo (natural ou induzido), sistema de excitação, tipo de medição, dentre outros. Braga (2006), propõe ainda uma classificação baseada apenas em três critérios: métodos geoelétricos, técnicas de investigação e arranjos de desenvolvimento de campo. Segundo o referido autor, essa classificação, procura revelar os métodos geoelétricos para qualquer tipo de usuário, tornando simples o entendimento de suas várias modalidades existentes,

e consequentemente, seus empregos adequados em função dos objetivos e geologia a serem estudadas.

3.2 Método da eletrorresistividade

Os diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico, apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica, o qual reflete algumas de suas características servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação, etc., e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas (Braga, 2006). Dessa forma, a existência de zonas saturadas com água pode gerar pontos onde a resistividade do material, neste caso, o corpo da barragem, será mais baixa que as demais. Contudo na prática, nem sempre o meio estudado é homogêneo. Assim, ao efetuar as medições o parâmetro obtido é a resistividade aparente, resultante da propagação da corrente elétrica nas diferentes camadas do substrato.

3.2.1 Técnica do caminhamento elétrico

A realização de ensaios geofísicos com o emprego do método da eletrorresistividade pode ser feita por diferentes técnicas de campo. Neste trabalho, especificamente, foi utilizada a técnica do caminhamento elétrico. Esta, por sua vez, se baseia na análise e interpretação de um parâmetro geoelétrico (resistividade aparente), obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, ao longo de uma seção, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas (Braga, 2006).

O desenvolvimento do trabalho de campo se dá ao longo de perfis estabelecidos, com espaçamento previamente definido, nos quais são fixados eletrodos metálicos. Após a disposição do arranjo no terreno, e obterem-se as leituras pertinentes, todo o arranjo é deslocado para o eletrodo seguinte e efetuadas as leituras correspondentes, continuando este procedimento até final do perfil a ser levantado (Braga, 2006).

3.2.2 Arranjo dipolo-dipolo

Uma vez montado o perfil, nas medições executadas segundo um arranjo dipolo-dipolo o espaçamento entre os eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) é mantido fixo durante todo o levantamento, apenas aumentando a separação entre os dipolos (AB e MN). Cada afastamento dos pares de eletrodo representa um nível de profundidade investigado, sendo que quanto maior a distância entre os pares, mais profundo será o nível de investigação (Coura, 2019).

Segundo Braga (2006), a profundidade teórica atingida (Z) em cada nível investigado, é tomada, como sendo $Z = R/2$ (metros), onde R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN). Entretanto, na prática, essa relação é mais real se for tomada

como sendo aproximadamente $Z = R/4$ (metros).

Após a realização das medições de campo, os dados são, então, filtrados e modelados com o auxílio de programas computacionais específicos. Uma vez concluída essa etapa, as informações podem ser apresentadas por meio de perfis ou mapas.

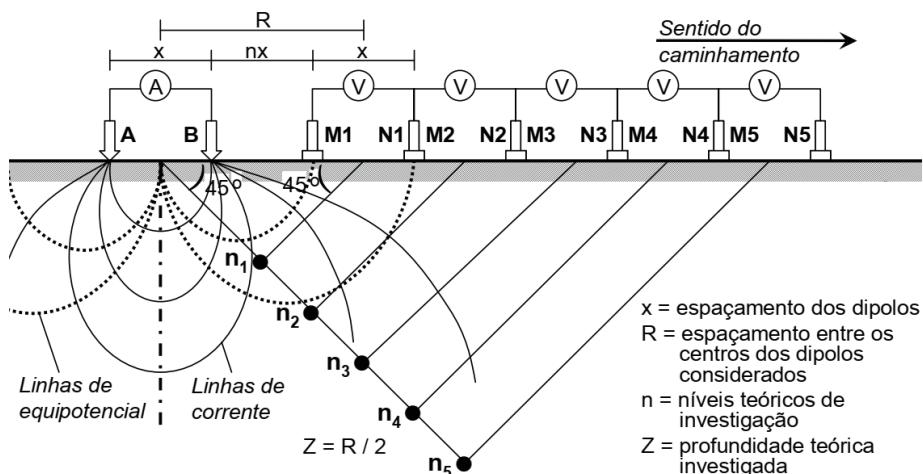


Figura 5. Esquema de aplicação da eletroresistividade, com a técnica do caminhamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo. Adaptado de BRAGA (2006).

3.2.3 Tomografia Elétrica de Resistividade

Segundo Gandolfo (2007), nas últimas décadas, o caminhamento elétrico vem sendo empregado de maneira sistemática, fato que pode ser verificado pelas inúmeras publicações recentes em periódicas nacionais e estrangeiros utilizando e/ou abordando aspectos dessa técnica. A evolução técnica dos equipamentos permite, atualmente, a realização de centenas ou milhares de leituras em cada perfil, aumentando a resolução e a quantidade de dados coletados nos ensaios.

Dentre as terminologias usadas para definir o emprego dessa metodologia, uma bastante difundida é “*Electrical Resistance Tomography*” (ERT) ou “*Tomografia Elétrica de Resistividade*”. No meio técnico científico, sua aplicação tem por objetivo produzir imagens bi ou tridimensionais da resistividade elétrica em subsuperfície. É bastante utilizada em monitoramento, com medidas da variação do parâmetro causadas por meios naturais ou induzidos pela atividade humana. Os ensaios podem ser realizados com o posicionamento dos eletrodos em superfície, variando-se a posição da fonte de do receptor entre esses eletrodos (Gandolfo, 2007).

4 | DESCRIÇÃO DO TRABALHO DESENVOLVIDO

O objetivo principal do trabalho é correlacionar anomalias de resistividade, eventualmente detectadas no corpo da barragem, com a possível ocorrência de processos

de formação de caminhos preferenciais de percolação anormal de água. Conforme já demonstrado no escopo desse trabalho, a instalação desse tipo de processo tem o potencial de desencadear condições que comprometem a segurança da barragem.

O equipamento utilizado para a realização dos levantamentos de medições foi o resistivímetro Syscal Pro Switch 48, fabricado pela empresa Iris Instruments. Esse equipamento possibilita a realização de até 10 leituras simultaneamente, devido à quantidade de canais disponíveis. O processo de realização de leituras é programável, por meio de *software*, e sua execução ocorre de forma automatizada. O equipamento dispunha de cabos com 48 eletrodos e espaçamento padrão de 10 metros.

Além do resistivímetro, foi utilizado um computador, para programação das leituras, *download* das informações coletadas e processamento preliminar dos dados. As informações de posicionamento (coordenadas UTM) de cada eletrodo cravado no solo foram tomadas a partir do Sistema GNSS implementado em receptor portátil de geolocalização Trimble Geo 7x. Para cada eletrodo cravado no solo foram tomados um par de coordenadas UTM com a taxa de amostragem de 1 registro por segundo, onde cada eletrodo foi medido por 5 segundos. Os dados foram armazenados na memória interna do dispositivo para todos perfis e ao final do processo, a sua totalidade foi descarregada em um notebook por meio do software GPS *Pathfinder Office*, versão 5.9. Aplicando-se o processamento de sinal para a correção diferencial, tomando como referência a RBMC Sesc Pantanal, obteve-se mais de 85% do conjunto de dados com a precisão menor que 50cm.

4.1 Seleção da barragem objeto do estudo

Considerando as informações apresentadas no item 1.1 e o escopo do trabalho, inicialmente, foi elaborada uma relação de potenciais barragens de rejeito, contendo, inicialmente, 10 empreendimentos. Dentre aquelas pré-selecionadas, foi escolhida uma, localizada no limite entre os municípios de Poconé e Nossa Senhora do Livramento, que seria, efetivamente, objeto do estudo.

Segundo as informações disponibilizadas pela ANM, na versão pública do SIGBM⁵, Trata-se de um barramento do tipo *Pond*, no qual, devido à topografia, é necessária a construção em forma de anel, para fechamento da topografia e formação de reservatório. Além disso, o respectivo cadastro indica que essa barragem começou a ser construída há cerca de 20 anos atrás.

Ao longo de sua vida útil, a barragem em questão passou por diversas modificações estruturais, dentre as quais podemos relacionar: construção de novas seções, modificações no reservatório, com o soterramento de taludes antigos pelo rejeito, construção de bermas de reforço e, principalmente, alteamentos, que são realizados de forma contínua visando a

⁵ Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/BarragemPublico/Detalhar/783A56C5302B699711CB57C16E5FD4B3E743862979B3173751C28338EC2D0C1B>. Acessado em 19 de junho de 2023

adequação da capacidade de armazenamento às necessidades de disposição de rejeitos do empreendimento. Segundo as informações contidas nos projetos da barragem, o sistema de monitoramento é composto por 04 medidores de nível d'água (MNA's), destinados ao monitoramento da altura da linha freática em seu corpo, dentre outros instrumentos, como marcos superficiais e réguas limimétricas.

4.2 Descrição da etapa de campo

Considerando o fato de que a barragem é construída em sistema de dique fechado, onde todas as estruturas que formam o reservatório são construídas e alteadas, verificou-se a necessidade de execução de levantamento geofísico em várias partes do barramento, conforme indicado na Figura 6. Dessa forma, seria possível a compreensão das condições não apenas na seção principal, mas, em outras partes da estrutura. Segundo essa premissa, foram definidos seis perfis para os levantamentos geofísicos. Estes, por sua vez, foram posicionados na crista e na berma intermediária da seção principal e da seção adjacente. Além disso, foram montados, também, dois perfis, localizados na base dessas seções, para que fosse possível compreender melhor a interface e as diferenças entre o barramento construído e a respectiva fundação.

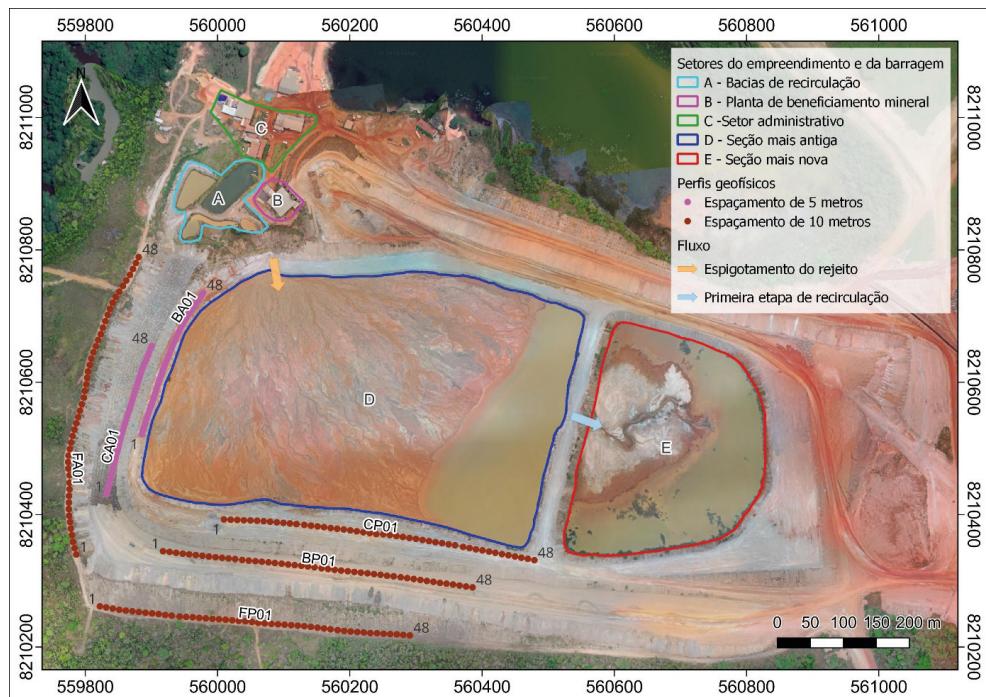


Figura 6. Ortomasíaco da área da barragem. As imagens foram obtidas com uso de uma aeronave remotamente pilotada (ARP), modelo Dji Mavic 2 Pro, a uma altura de 200 metros. Os números nos perfis indicam a posição do primeiro de do último eletrodo em cada um.

A seleção do método empregado no ensaio geofísico tomou como base a sugestão contida na Norma ASTM D6429-99, que propõe critérios para a seleção dos métodos geofísicos mais adequados para os diferentes tipos de trabalhos e objetivos desejados. Além disso, levou em consideração, também, outros casos nos quais esse tipo de trabalho foi desenvolvido, da natureza das anomalias que se desejava investigar e também dos parâmetros geométricos da barragem. Dessa forma, a etapa de levantamentos geofísicos foi realizada com o emprego do método da eletrorresistividade, com a técnica de caminhamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo.

A metodologia utilizada foi selecionada considerando que as anomalias eventualmente detectadas estão relacionadas com o fluxo de água no interior do corpo da barragem. Este fluxo ocorre de montante para jusante de forma perpendicular ao alinhamento da seção de barramento. Por essa razão, conforme esquema mostrado na Figura 5, considerando as dimensões da barragem e a topografia do local, a técnica de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo se mostrou a mais adequada para esse tipo de ensaio.



Figura 7. Preparação e montagem dos perfis (A). Umidificação dos pontos de cravação dos eletrodos com solução salina para redução da resistência de contato (B). Equipamento montado e pronto para a realização das injeções de corrente e realização das medições de resistividade (C). Coleta das coordenadas UTM de localização dos eletrodos ao longo do perfil (D).

A realização do ensaio buscou seguir, dentro do que foi aplicável ao presente trabalho, as orientações contidas na Norma ASTM D6431-18, que propõe critérios para o emprego do método da eletrorresistividade. O espaçamento dos eletrodos e o comprimento das seções foi definido com base nas informações provenientes das etapas de levantamento planialtimétrico, no comprimento de cada trecho investigado e na profundidade teórica de investigação desejada em cada local. Além das informações de resistividade, foram coletadas também as informações de geolocalização da posição dos eletrodos.

Durante a realização do ensaio, foram adotadas todas as medidas para que houvesse o mínimo de ruído e interferências nas leituras. Além disso, buscou-se a manutenção da resistência de contato dentro de níveis considerados aceitáveis, para que esse parâmetro não viesse a ter influência sobre as medições realizadas.

PERFIL	LOCAL	ELETRODOS	ESPAÇAMENTO	COMPRIMENTO	DIREÇÃO
CP01	Crista da seção principal	48	10 metros	480 metros	Leste - Oeste
BP01	Berma da seção principal	48	10 metros	480 metros	Leste - Oeste
FP01	Base da seção principal	48	10 metros	480 metros	Leste - Oeste
CA01	Crista da seção adjacente	48	5 metros	240 metros	Norte - Sul
BA01	Berma da seção adjacente	48	5 metros	240 metros	Norte - Sul
FA01	Base da seção adjacente	48	10 metros	480 metros	Norte - Sul

Tabela 1. Detalhes dos perfis construídos para a realização dos ensaios geofísicos.

Durante a realização do ensaio, foram adotadas medidas para que a resistência de contato atingisse os menores valores possíveis, conforme demonstrado na Figura 8. Isso foi feito para que esse parâmetro não interferisse nas medições.

PERFIL	RESISTÊNCIA DE CONTATO kOhm		ELETRODOS ANÔMALOS
	MÍNIMO	MÁXIMO	
CP01	5,12	7,20	39, 40, 41 e 42 (resistência superior a 100kOhm)
BP01	0,69	4,50	Não houve
FP01	0,61	2,63	Não houve
CA01	6,19	14,22	Não houve
BA01	1,08	4,60	Não houve
FA01	0,33	4,20	36 (66,87kOhm), 37 (60,71kOhm) e 41 (51,37kOhm)

Tabela 2. Detalhes dos valores da resistência de contato obtida para cada perfil.

5 | MODELAGEM DAS SEÇÕES E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Durante a realização dos ensaios estatísticos, é possível que ocorra a obtenção e leituras errôneas, que não correspondem efetivamente aos dados de resistividade existentes no meio geológico analisado. Sendo assim, é necessário que o conjunto de dados, coletados na etapa de campo, seja submetido a um tratamento baseado na aplicação de metodologias estatísticas para identificação de leituras incorretas e *outliers*, bem como no processamento de seções por meio de métodos de inversão 2D.

5.1 Filtragem estatística dos dados

A primeira etapa do processamento dos dados consistiu na eliminação das leituras que apresentaram dados com medições de resistividade fisicamente incoerentes ou com desvio padrão superior a 5%. Após a eliminação desses dados, foram agregadas as informações de geolocalização dos eletrodos e foi realizada a exportação do conjunto de dados para o formato de arquivo compatível com o software Res2Dinv, versão 4.07, no qual foi executada a próxima etapa de processamento.

PERFIL	MEDIDAS EFETUADAS EM CAMPO	MEDIDAS FILTRADAS NA 1 ^a ETAPA	MEDIDAS FILTRADAS NA 2 ^a ETAPA	MEDIDAS EFETIVAMENTE UTILIZADAS	PERCENTUAL DE MEDIDAS UTILIZADAS	PROFOUNDIDADE TEÓRICA DE INVESTIGAÇÃO
CP01	2.628	402	325	1.901	72,34%	41 metros
BP01	2.213	2	30	2.181	98,55%	37 metros
FP01	1.580	30	32	1.518	96,07%	24 metros
CA01	2.491	213	407	1.871	75,11%	30 metros
BA01	2.435	30	71	2.334	95,85%	30 metros
FA01	1.580	21	53	1.506	95,31%	24 metros

Tabela 3. Comparativo entre as medidas coletadas em campo e aquelas efetivamente utilizadas após os processos de filtragem estatística.

A filtragem de dados não ocorreu apenas na primeira etapa de processamento. Ela também foi executada durante a segunda fase, na qual estava sendo realizada a geração das seções de resistividade. Nesse caso, os dados foram filtrados até que fosse obtido o melhor ajuste, comparando as informações estimadas pelo programa e aquelas obtidas a partir das leituras em campo. Vale salientar que, em todas as etapas de filtragem, buscou-se a preservação do máximo de medidas possível, com vistas a não interferir em eventuais anomalias possivelmente detectadas durante a realização do ensaio.

A Tabela 3 apresenta a quantidade de medidas que foram realizadas em campo e traz uma comparação com o número de dados que foram filtrados em cada etapa de processamento destes. Nota-se, então, que em todos os perfis houve a preservação de, ao menos, 70% dos dados, mesmo considerando os parâmetros apresentados e a obtenção de ajuste estatístico adequado. Além disso, considerando o grande volume de dados coletados durante a realização do ensaio, as medições filtradas não interferiram na geração das seções e na detecção de anomalias nestas.

5.2 Geração das seções de resistividade por meio do processo de inversão 2D

Considerando que os ensaios geofísicos medem indiretamente propriedades do meio estudado, se torna necessária a aplicação de ferramentas físico/matemáticas que permitam obter as propriedades físicas dos materiais em subsuperfície a partir de suas respostas físicas. Uma das ferramentas mais utilizadas é a inversão de dados. Através da inversão é possível determinar os parâmetros geológico-geofísicos que estão contidos nos dados, que de outra forma não poderiam ser obtidos a partir da análise direta deles (Bortolozo, 2016).

Para este trabalho, foi utilizado o processo de inversão 2D. Como resultado, é possível obter seções bidimensionais baseadas nos dados modelados provenientes das medições efetuadas em campo. Posteriormente, essas seções foram interpretadas, considerando as particularidades do meio estudado, buscando a formação de um entendimento geológico, geotécnico e estrutural das informações ali apresentadas.

A geração das seções foi efetuada com o emprego do *software* Res2DInv, versão 4.07, considerando os dados filtrados apresentados na Tabela 02. O processo de inversão foi realizado com o emprego do método dos mínimos quadrados, utilizando um algoritmo baseado em diferenças finitas e aplicação de restrição de suavidade. Segundo Gandolfo (2007), essa metodologia procura um modelo suavizado que minimiza a soma do quadrado das variações espaciais do modelo de resistividade (“rugosidade” do modelo) assim como o “erro” (diferença entre o dado medido e o calculado). Assim, é possível remover valores de resistividade espúrios que podem ocorrer devido a discretização em elementos menores do que a resolução espacial dos dados (Rangel, 2018). O critério de parada escolhido para limitar o número de iterações foi a convergência do erro quadrático médio (RMS) para valores percentuais abaixo de 5% e foram realizadas etapas de filtragem para eliminação de *outliers*.

Objetivando a padronização da exibição das seções e uma melhor interpretação, as seções de resistividade foram geradas segundo uma mesma escala de cores, com um intervalo que abrange todos os valores medidos.

5.3 Interpretação das seções de resistividade

Após a confecção das seções de resistividade, foi feita a intepretação das informações nelas apresentadas. Considerando que os perfis se localizam em diferentes partes do barramento e a possível existênciade estruturas geológicas na fundação, foram elaboradas seções de interpretação separadamente. Para melhor compreensão, a escala vertical foi mantida em valores referentes à altitude registrada no local.

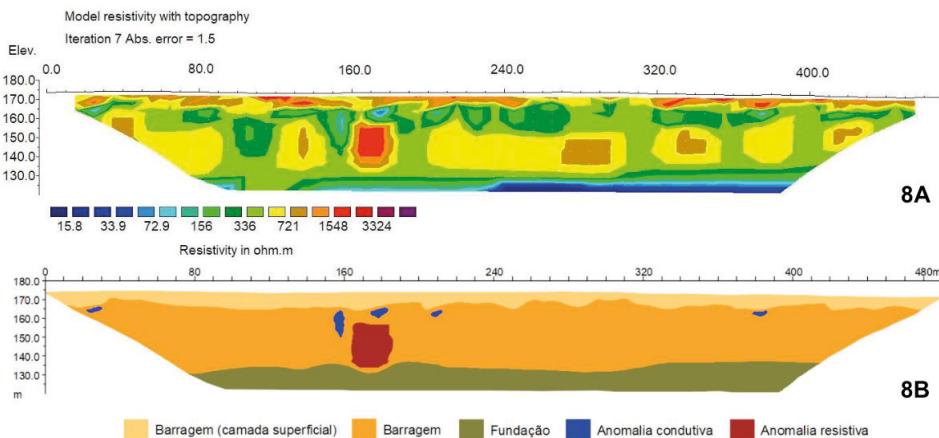


Figura 8. Seção de resistividade gerada para o perfil CP01 (8A). É possível que as anomalias condutivas, indicadas na figura (8B), se refiram a pontos com material mais argiloso ou com maior saturação de água. A anomalia resistiva, quando comparada com imagens de satélite públicas, se alinha com uma antiga seção da barragem, soterrada por rejeito após sucessivas etapas de alteamento.

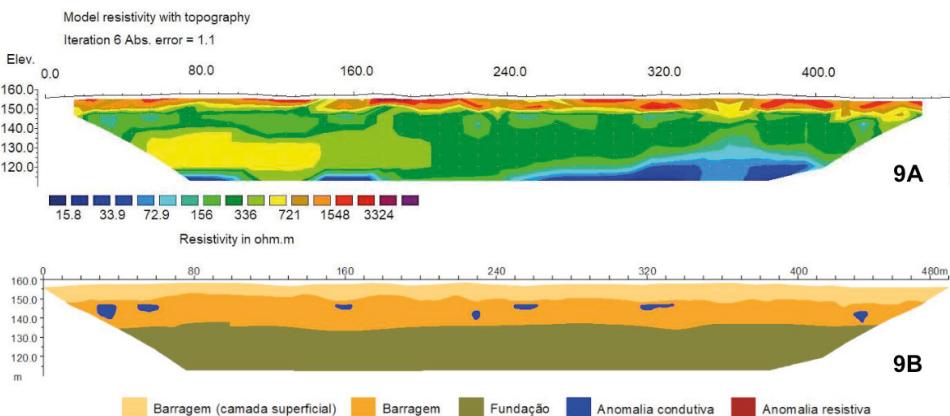


Figura 9. Seção de resistividade gerada para o perfil BP01 (9A). As anomalias condutivas, visualizadas na figura (9B), mais uma vez, podem estar associadas a pontos com material mais argiloso ou com saturação anômala de água. Na base do perfil, fica mais evidente a influência da fundação, caracterizada por materiais com resistividades mais baixas e pela possível influência do Rio Bento Gomes, que se localiza a cerca de 200 metros da barragem.

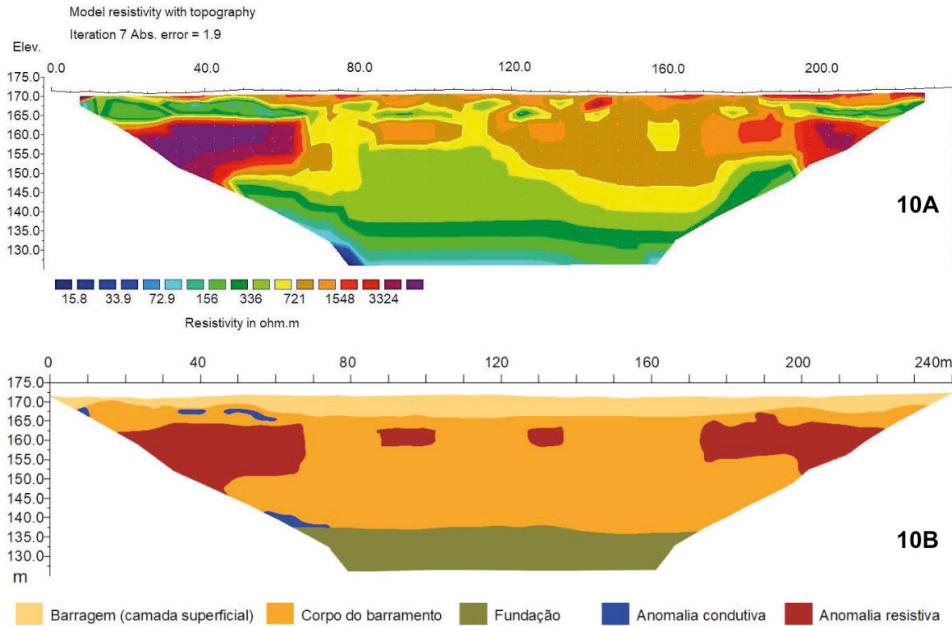


Figura 10. Seção de resistividade gerada para o perfil CA01 (10A). A exemplo de outras seções, as anomalias condutivas, visualizadas na figura (10B) podem ser referir a pontos com material mais argiloso ou saturação anormal de água. Vale menção a existência de grandes zonas com resistividade mais elevada que o restante do corpo da barragem na seção, o que pode ser resultado de emprego de materiais ou técnicas diferentes durante os sucessivos alteamentos nessa parte do barramento.

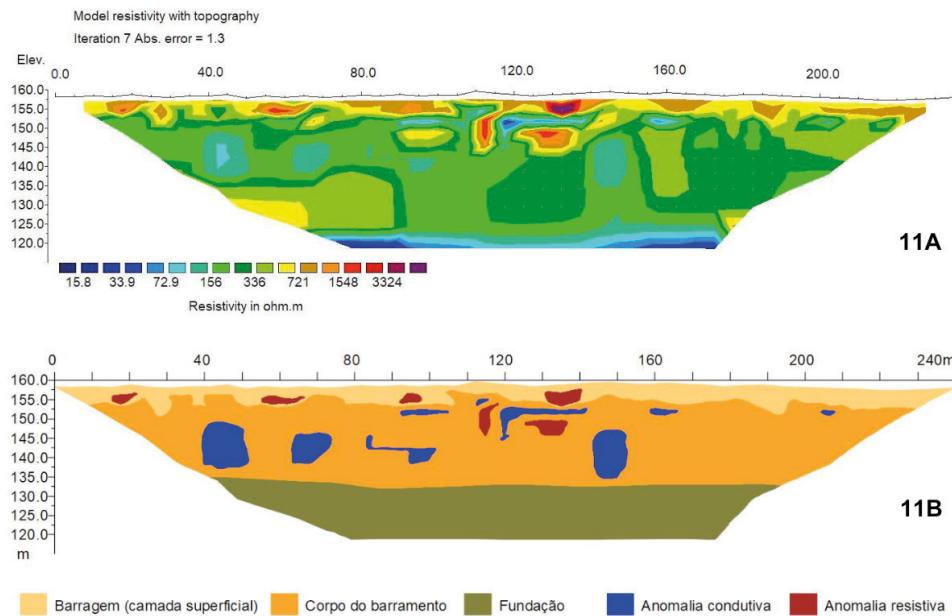


Figura 11. Seção de resistividade gerada para o perfil BA01 (11A). As anomalias condutivas, visualizadas na figura (11B) podem ser referir a pontos com material mais argiloso ou saturação anormal de água. As anomalias resistivas visualizadas, possivelmente, se referem a blocos de rocha presentes no material utilizado durante os sucessivos alteamentos nessa parte do barramento.

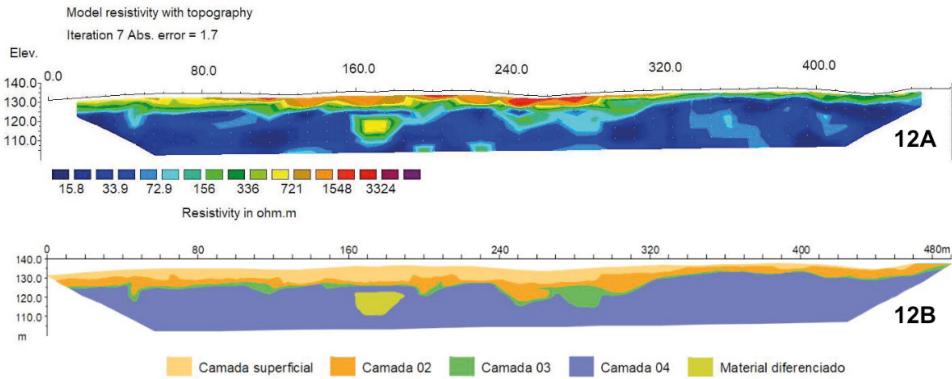


Figura 12. Seção de resistividade gerada perfil FP01 (12A). A barragem se encontra assentada sobre sedimentos. Este perfil foi construído para comparação entre a resistividade do corpo do barramento (construído) e a fundação (terreno natural). É possível identificar algumas camadas com resistividades diferentes, possivelmente associadas à coluna estratigráfica dos sedimentos, naquele local, ou mesmo a níveis de saturação de água no terreno. A anomalia, identificada como “material diferenciado” pode estar associada a presença de um bloco de rocha (matacão) naquela posição ou mesmo à presença de veios no local. Além disso, fica evidenciada a resistividade mais baixa do terreno natural, em comparação com a barragem. Essa condição pode estar associada à mineralogia dos sedimentos ou à influência do Rio Bento Gomes, que passa a cerca de 200 metros do perfil.

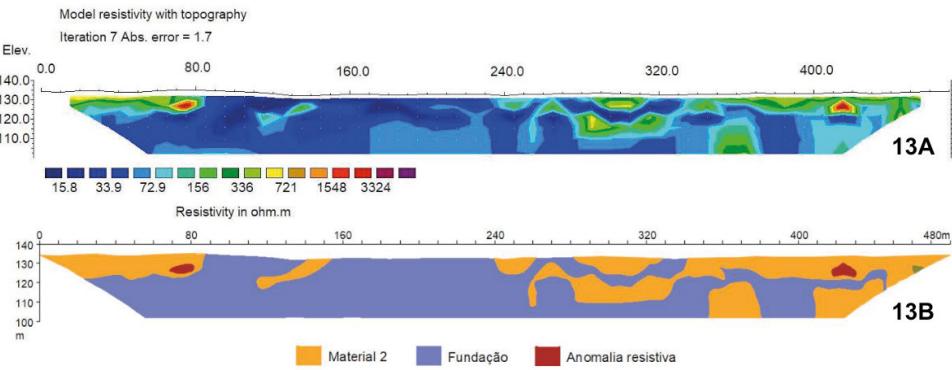


Figura 13. Seção de resistividade gerada perfil FA01 (13A). A barragem se encontra assentada sobre sedimentos. Este perfil foi construído para comparação entre a resistividade do corpo do barramento (construído) e a fundação (terreno natural). No perfil interpretativo (13B), não foi possível delimitar tão claramente as diferentes camadas de sedimentos presentes, tendo sido identificada a presença de materiais com maior resistividade (Material 2) junto com os sedimentos presentes na fundação. As anomalias resistivas, possivelmente, estão associadas com a presença de blocos de rocha (matacões) naquelas posições. Novamente, fica evidenciada a resistividade mais baixa do terreno natural, em comparação com a barragem. Essa condição pode estar associada à mineralogia dos sedimentos ou à influência do Rio Bento Gomes, que passa a cerca de 200 metros do perfil.

Nas seções de resistividade que se referem ao corpo da barragem, é possível identificar uma primeira camada com resistividade superior ao restante da estrutura. Isso, possivelmente, se deve ao fato de que o barramento passa por alteamentos contínuos, fazendo com que sempre haja uma camada de material menos saturado e com menos compactação, nos primeiros metros abaixo da crista e do piso da berma. Vale salientar que

a região onde se localiza a barragem se encontrava em um momento de baixa pluviosidade, em um período que compreende o final da estação seca.

O perfil CP01 se localiza na crista da parte mais antiga da barragem. Conforme as imagens de satélite públicas, esta parte passou por diversas modificações estruturais ao longo do tempo. Durante a etapa de interpretação das informações coletadas, foi verificada, por meio da seção, a existência de uma anomalia de grande resistividade no corpo do barramento. Ao comparar essa anomalia com as imagens de satélite históricas disponíveis, foi possível constatar que esta se alinha exatamente com uma antiga seção da barragem que foi soterrada pelos rejeitos depositados no reservatório ao longo dos anos e dos sucessivos alteamentos. Além disso, também foi constatada a existência de locais com resistividade muito. Tais anomalias de resistividade podem estar associadas a pontos com material mais argiloso, depositado durante os sucessivos alteamentos. Outra possibilidade é que essas anomalias de baixa resistividade estejam associadas a pontos onde exista uma maior saturação, provocada pela água que percola no corpo da barragem.

O perfil BP01 se localiza na berma da seção principal que foi construída para conferir maior estabilidade geotécnica à barragem, segundo as informações contidas nos respectivos projetos. Essa parte do barramento teve maior controle tecnológico e acompanhamento técnico durante sua construção. Na interpretação desse perfil, chama atenção os pontos com muito baixa resistividade. Os pontos com baixa resistividade, novamente, podem estar associados a locais com material mais argiloso ou mesmo com saturação elevada de água. Considerando a profundidade teórica de investigação, na base desse perfil, fica mais evidenciada a influência da fundação, caracterizada por materiais com resistividades mais baixas e pela possível influência do Rio Bento Gomes, que se localiza a cerca de 200 metros da barragem. Contudo, essa diferenciação só foi possível de determinar considerando a seção de resistividade do perfil FP01.

O perfil CA01 se localiza na crista da seção adjacente à seção principal da barragem, que, segundo informações históricas, foi construída para ampliar a capacidade do reservatório e melhorar o processo de sedimentação da fração sólida do rejeito. O ensaio geofísico nesse local teve como objetivo avaliar a percolação em mais uma seção do barramento, tendo em vista que este se constitui de um anel inteiramente construído. Assim como em outras partes da estrutura, também foram identificados pontos com baixa resistividade que podem estar associados à presença de material argiloso ou mesmo saturação anômala de água. Além disso, foi identificada a presença de grandes zonas com resistividade mais elevada, o que pode ser resultado de emprego de materiais ou técnicas construtivas diferentes durante os sucessivos alteamentos nessa parte do barramento.

O perfil BA01 se localiza na seção adjacente da berma de reforço da barragem. Trata-se da extensão da berma de reforço da barragem, que se inicia na seção principal. Novamente, foi identificada a presença de anomalias, possivelmente relacionadas à presença de material argiloso ou mesmo saturação de água anômala. Nesse caso, chama

atenção a quantidade de anomalias presentes no perfil, sugerindo uma intensificação no monitoramento dessa parte do barramento. As anomalias resistivas visualizadas, possivelmente, se referem a blocos de rocha presentes no material utilizado durante os sucessivos alteamentos nessa parte do barramento. Considerando a profundidade teórica de investigação e as informações da seção do perfil FA01, é possível visualizar a diferenciação das características do material da fundação e do barramento em relação à resistividade.

Os perfis FP01 e FA01 se localizam na base da seção principal e da seção lateral (adjacente) da barragem. O objetivo de sua construção e realização do ensaio geofísico nesses locais era compreender as resistividades no meio natural (fundação), no corpo da barragem e efetuar uma comparação entre essas partes, buscando identificar a diferenciação entre a fundação e o barramento construído. Na seção de resistividade do perfil FP01 é possível diferenciar algumas camadas pela variação das resistividades destas. É possível que as camadas identificadas estejam efetivamente, associadas à coluna estratigráfica dos sedimentos, naquele local, ou estar relacionadas mesmo a níveis de saturação de água no terreno em função da profundidade.

Na seção de resistividade do perfil FA01 não foi possível identificar com clareza a existência de uma coluna estratigráfica em função das resistividades medidas, a exemplo da seção do perfil FP01. Foi identificada a presença de materiais com resistividade maior que a encontrada no restante da seção. Contudo, é necessária a realização de investigações adicionais para compreender sua natureza e gênese. As anomalias resistivas, possivelmente, estão associadas com a presença de blocos de rocha (matacões) naquelas posições. Tanto na seção deste perfil quanto na seção do perfil FP01 chama atenção a baixa resistividade dos materiais. Tal condição pode estar associada à mineralogia dos sedimentos ou à influência do Rio Bento Gomes, que passa a cerca de 200 metros do perfil.

6 | CONCLUSÕES

Os sistemas tradicionais de monitoramento das barragens de mineração desempenham um papel fundamental na segurança destas. Esses sistemas são responsáveis pelo acompanhamento das condições operacionais dessas estruturas, permitindo a adoção de medidas preventivas ou corretivas em tempo hábil para que sejam evitados acidentes, que poderiam causar impactos às pessoas, ao meio ambiente e até mesmo à economia.

Contudo, os sistemas convencionais se baseiam, muitas vezes, em instrumentação distribuída de forma discreta, monitorando as condições de pontos e locais específicos do corpo desses barramentos. Além disso, apresentam limitações em alguns casos, como aqueles onde a barragem passa por alteamentos contínuos ou mesmo em situações onde há necessidade de que haja a mínima interferência possível, devido ao desconhecimento

das condições de estabilidade das estruturas ou mesmo devido à existência de condição de risco previamente identificada.

A geofísica já tem seu emprego consolidado na prospecção mineral. Além disso, também é usada com sucesso em outras áreas da geologia e da engenharia. A partir disso, novos estudos e o desenvolvimento de equipamentos mais modernos permitiram seu emprego também em situações cada vez mais abrangentes. Dentre essas, podemos citar a investigação e o monitoramento de barragens.

O trabalho apresentou resultados interessantes no emprego do método geofísico da eletrorresistividade para a investigação de uma barragem. Foram identificadas, por exemplo, anomalias de baixa resistividade em várias partes do corpo da estrutura. Estas, por sua vez podem estar associadas à simples presença de materiais com maior teor de argila, por exemplo, ou mesmo a locais onde possa estar sendo iniciado ou ocorrendo processos de formação de caminhos preferenciais de percolação anormal de água. Esse tipo de problema, quando existe e não é devidamente mitigado, pode evoluir para a instalação de um processo de *piping* na barragem. Assim, esses resultados fornecem uma orientação de locais para uma investigação mais detalhada ou mesmo para a elaboração e implantação de planos de monitoramento e instrumentação.

Além da investigação relacionada aos níveis freáticos no corpo da barragem, os resultados também indicaram a presença de pontos onde a resistividade de apresentava acima dos níveis do entorno. Nas seções de resistividade, esses locais são representados por anomalias de elevada resistividade. Ao correlacionar essas anomalias com o histórico de modificações promovidas no barramento, verificou-se que algumas delas se alinhavam com partes da barragem e diques internos que, durante os sucessivos alteamentos e modificações, acabaram por ser recobertos pelo rejeito depositado no reservatório. Esses resultados, inesperados durante a formulação do problema e realização do trabalho, abrem a possibilidade de que esse método geofísico possa ser usado como ferramenta para investigação das modificações estruturais pelas quais essas barragens passaram, ao longo de sua vida útil.

A motivação para realização deste trabalho foi verificar a aplicação do método a uma barragem construída no sistema de dique fechado, visto que outros trabalhos similares costumam focar em barragens construídas em sistema linear. Ao final, foi possível verificar que a metodologia empregada apresentou resultados bastante satisfatórios e até mesmo inesperados, que permitiram conhecer maiores detalhes a respeito da condição de saturação do corpo da barragem e até mesmo correlacionar alguns desses resultados com o histórico construtivo desta. Assim, fica evidenciado que as técnicas empregadas são eficazes tanto na investigação quanto no monitoramento deste tipo de barragem, podendo contribuir, inclusive, com as etapas que precedem sua construção. Considerando o escopo do trabalho de desenvolvido, não foi possível a realização dos ensaios em todos os taludes do barramento. Contudo, a realização dos levantamentos e até mesmo monitoramento

geofísico em todas as seções da barragem será capaz de fornecer informações bastante detalhadas e de forma mais continua a respeito da existência de condições que estão associadas a alguns dos principais problemas que podem ocorrer com esse tipo de estrutura. Além disso, a realização desse levantamento ou monitoramento de forma periódica, provavelmente, será capaz de identificar eventuais problemas em estágio inicial, permitindo a adoção de providências de forma antecipada e impedindo que esses evoluam para condições que possam comprometer a segurança estrutural da barragem.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. (1964). Geologia do Centro-Oeste Mato-grossense. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia*, p.1-133.
- Alvarenga, C. J. S. (1988). Turbiditos e a Glaciação do Final do Proterozóico Superior no Cinturão Paraguai, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*. 18(3), 323-327.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 13028/2013 – Mineração – Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água - Requisitos*. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- ANA – Agência Nacional de Águas. (2016). *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens*. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/instrucoes-para-apresentacao-plano-seguranca-barragens>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- ANM – Agência Nacional de Mineração. (2019). *Relatório Anual de Segurança de Barragens de Mineração 2019*. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-annuals-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao-2/relatorio-anual-gsbm-2019-v-final.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- ANM - Agência Nacional de Mineração. (2022). *Resolução nº 95/2022*. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- Bento, G. R. (2017). *Fechamento de Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP.
- Braga, A. C. O. (2006). *Métodos Da Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática*. Tese (Livre Docência). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP.
- Bertuluci, F. B. (2020). *Análise das condições de percolação em barragem de terra a partir do método geofísico da eletrorresistividade*. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP.
- Bortolozo, C. A. (2016). *Inversão conjunta 1D e 2D de dados de eletrorresistividade e TDEM aplicados em estudos de hidrogeologia na Bacia do Paraná*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo – USP.

Calachibete, C. (2016). *Caracterização lito-geofísica por métodos geoelétricos na região da Baixada Cuiabana – Trend Pirizal – Bento Gomes*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB.

Correa, J. A., Couto, E. A. (1972). *Projeto aluviões diamantíferos de Mato Grosso*. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/3782>>. Acesso em 23 de junho de 2023.

Coura, M. M. (2019). *Aplicação de Métodos Geoelétricos para Análise da Estabilidade de Barragens de Terra*. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP.

Dardenne, M. A. (1980). Relatório da viagem ao Mato Grosso. Goiânia. *Projeto Radam Brasil*, (Relatório Interno RADAMBRASIL, 377-G)

Duarte, A. P. (2008). *Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

Espósito, T.J. (2000). *Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico*. Tese (Doutorado). Brasília: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – UnB.

Gandolfo, O. C. B. (2007). *Um Estudo do Imageamento Geoelétrico na Investigação Rasa*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP.

Iakubovskii, I. U. V., Liajov, L. L. (1980). *Exploración eléctrica. Espanha*. Editorial Reverté, S.A.

ICOLD - International Commission On Large Dams. (2001). *Bulletin 121: Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences: Lessons learnt from practical experiences*.

Ladeira, J. E. R. (2007). *Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob O Cenário De Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos: O caso UHE – São Simão*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

Lima, C. S., Lima, T. E., Souza, C. A., Silva, J. L. (2017). A. Caracterização ambiental: geologia, geomorfologia e solo no baixo curso na bacia do Rio Cabaçal em Curvelândia Mato Grosso. I Congresso Nacional de Geografia Física. Campinas: Disponível em: <<https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1818>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

Luz, J. S. Oliveira, A. M. Souza, J. O. Motta, J. F. M. Tanno, L. C. Carmo, L. S. Souza, N. B. (1980). *Projeto Coxipó. Relatório Final*. Goiânia: DNPM/CPRM.

Marangon, M. (2004). *Notas de aula: Barragens de Terra e Enrocamento*. Juiz de Fora: Núcleo de Geotecnica, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/nugeo/files/2017/07/MARANGON-OT-05-Barragens-de-Terra-e-Enroncamento-2018-1.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

Miranda, J. G. (1997). *A produção de Ouro no Estado de Mato Grosso*. (1997). Dissertação (Mestrado). Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

Morgado, R. G. P. (2022). *Estudo das Causas de Rupturas de Barragens de Rejeito de Mineração no Brasil e Proposta para Avaliação da Operação*. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP.

Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., Watts, B. D. (2016). *Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão*. Disponível em: <<https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2017/10/relatorio-sobre-as-causas-imediatas-da-ruptura-da-barragem-de-fundao.pdf>> Acesso em: 23 jun. 2023.

Oliveira, W. K., Rohlf, D. B. k Garcia, L. P. (2019). *O Desastre de Brumadinho e a Atuação da Vigilância em Saúde. Epidemiologia e Serviços de Saúde*. Disponível em: <<https://doi.org/10.5123/S1679-49742019000100025>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

Orellana, E. (1972). *Prospección Geoelectrica en Corriente Continua*. Madrid, Ed. Paraninfo.

Paula, M. C. L. (2019). *Estudo de Radarfacies em Placeres Auríferos na Baixada Cuiabana*. Instituto de Geociências. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB.

Pereira, T. S. (2013). *Avaliação do Desempenho de Diferentes Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes em Barragens de Terra*. Dissertação (Mestrado). Santa Maria: Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

Rangel, R. C. (2018). *Inversão Conjunta 2D de Dados de Caminhamento Elétrico e Caminhamento TDEM Aplicados a Estudos Hidrogeológicos em Taubaté/SP*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo – USP.

Souza, C. A., Lani, J. L., Sousa, J. B. (2006). Origem e Evolução do Pantanal Matogrossense. Goiânia. *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia*. União da Geomorfologia Brasileira. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/6/3/132.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

Silva C. H.; Simões L. S. A.; Ruiz A.S. (2002). Caracterização Estrutural dos Veios Auríferos da Região de Cuiabá, MT. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4), 407-418.

Silveira, E. R. (2021). *Investigação Geofísica Elétrica Aplicada ao Monitoramento de Barragens de Prevenção de Acidentes*. Trabalho de Conclusão de Curso. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP.

Souza, L. A. P., Gandolfo, O. C. B. (2021). *Geofísica Aplicada à Geologia de Engenharia e Meio Ambiente*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.

Tokashiki, C. C., Saes, G. S. (2008). Revisão Estratigráfica e Faciológica do Grupo Cuiabá no alinhamento Canas-Poconé, Baixada Cuiabana, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(4), 661-675.