**APLICAÇÃO DE GEOFÍSICA RASA NO MONITORAMENTO E GERENCIAMENTO DE RISCO DE SEGURANÇA EM BARRAGENS DE REJEITO**

Marco Antonio da Silva Braga – UFRJ;Demetrius Cunha Gonçalves da Rocha – UFRJ;  
Roberto Albuquerque e Silva – UFRJ; Calvin Ferreira – UFRJ, Leonardo Santana- UFRJ  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia – Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA)

**RESUMO**

A utilização de métodos geofísicos na barragem BR do complexo de mineração de Tapira no estado de Minas Gerais e na barragem B1 localizada no complexo mineroquímico de Cajati no estado de São Paulo, Brasil. Teve como principal objetivo desenvolver uma metodologia geofísica investigativa complementar ao monitoramento utilizado atualmente. Foram usados métodos geofísicos elétricos com respostas da eletrorresistividade, polararização induzida e potencial espontâneo e eletromagnético com *ground penetrating radar* (GPR). Na barragem BR durante a aquisição de dados geofísicos foram levantadas 10 linhas paralelas ao eixo principal do barramento.Já na barragem B1, foram levantadas 14 linhas geofísicas, também paralelas a crista da barragem, divididas em duas campanhas de campo. Na primeira campanha foram levantadas 8 linhas e na segunda foram levantadas 6 linhas geofísicas a fim de complementar os resultados geofísicos anteriores localizados principalmente na ombreira esquerda.A partir dos resultados da eletrorresistividade foi possível delinear de forma precisa o nível do lençol freático, separar áreas secas das úmidas na parte central e nas ombreiras dos barramentos. A resistividade identificou alto teor de umidade na ombreira esquerda da barragem B1, sendo correlacionada a presença de antigos extravasores soterrados nesta região. Zonas de baixa resistividade (ZBR), foram correlacionadas com regiões do maciço possivelmente saturadas ou com alto teor de umidade. Para a barragem BR a zona de baixa resistividade (ZBR) foi definida porvalores abaixo de 250 ohm.m e para a barragem B1 esses valores foram limitadosa 84 ohm.m. Em resposta ao GPR, zonas saturadas apresentaram forte atenuação nos refletores, sendo esta atenuação menor com a diminuição no teor de água. Em algumas seções, foram correlacionados padrões dos refletores a diferentes zonas resistivas. As respostas da polarização induzida (IP) nas duas barragens, não foram suficientes para separar áreas secas de saturadas ou com certo teor de umidade, devido à grande ambiguidade interpretativa desses dados após processamento. Os dados do potencial espontâneo na barragem BR não mostraram evidências de fluxos anormais, mas na barragem B1 os resultados evidenciaram a presença de fluxo anormal localizado na ombreira esquerda. Portanto a geofísica mostrou ter uma grande eficácia na investigação e monitoramento dessas estruturas, através da geração de indicadores indiretos contínuos, que após processamento resultaram em um imageamento completo em 2D e 3D do interior das barragens estudadas.

1. **INTRODUÇÃO**

A maioria dos acidentes em barragens iniciam de forma gradual a partir de infiltrações de fluxos internos indesejáveis. Essas percolações iniciam um processo de erosão interna com o aparecimento de cavidades e em casos mais avançados coma ocorrência de “pipings”, alterando a estrutura inicial do empreendimento podendo levar a sua total ruptura (Abdel et al., 2004).Um outro importante fator é a falha na drenagem interna que pode resultar naliquefação estática pelo o aumento da carga hidráulica através da elevação do nível freático. Como consequência haverá um aumento na pressão interna intra-poros, reduzindo o contato entre as partículas sólidas que compõem a barragem, levando o barramento a um total estado de fluidez (Ishihara, 1977).

Devido ao aumento de acidentes graves com barragens aqui no Brasil é de se esperar que a procura e o desenvolvimento de novas tecnologias ou alternativas de investigação e monitoramento venham a complementar o sistema de auscultação utilizado atualmente.O rompimento de uma barragem quase sempre é catastrófico com perdas de vidas, sociais e financeiras. O impacto ambiental é incalculável podendo perdurarpor décadas.

Em alguns países o uso da geofísica rasa já vem sendo amplamente utilizado como uma alternativa altamente eficaz na investigação e monitoramento em diferentes tipos de barragens. Nwokebuihe et al., (2016), usou a geofísica rasa em uma barragem de terra localizada no estado do Missouri – USA. Os métodos elétricos com respostas da eletrorresistividade, polarização induzida (IP) e potencial espontâneo (SP) foram utilizados com a finalidade de investigar a possível percolação de fluidos indesejáveis ao longo do dreno principal, localizado na parte central do barramento, e se a eficiência dessa estrutura estavade acordo com o projeto inicial. Em uma outra barragem de terra, localizada em Zaria a noroeste da Nigéria, foi usado a eletrorresistividade para investigar áreas de baixa velocidade previamente mapeadas pela sísmica na região das duas ombreiras. Em algumas dessas áreas foram investigadas zonas de baixa resistividade sugerindo a presença de zonas saturadas devido a uma região de alta permeabilidade possivelmente por fraturas (Chinedu, A.D. and Ogah A.J, 2013). Nos dois casos mencionados acima a pesquisa geofísica atingiu resultados satisfatórios.

Aqui no Brasil também temos alguns registros do uso da geofísica rasa na investigação de barragens através do imageamento contínuo do interior dessas estruturas, todos com excelentes resultados. Por exemplo o uso do método elétrico da eletrorresistividade na barragem de concreto UHE Governador José Richa no estado do Paraná – Brasil, mostrou grande eficiência em identificar as zonas úmidas próximo a fraturas previamente mapeadas. Posteriormente foi utilizado o potencial espontâneo (SP) de maneira a complementar os resultados da eletrorresistividade, identificando as principais direções dessas infiltrações(Zorzi and Rigoti, 2011). Os resultados foram extremamente satisfatórios.

Foram utilizados na barragem BR e B1 os métodos geofísicos elétricos com respostas da eletrorresistividade, polarização induzida (IP) e potencial espontâneo (SP). Já o método eletromagnético com o *ground penetrating radar* (GPR). A partir das seções geofísicas de eletrorresistividade foi possível separar zonas secas como sendo zonas de alta resistividade (ZAR), das zonas úmidas classificadas como sendo as zonas de baixa resistividade (ZBR) ou das áreas com certo teor em umidade denominadas zonas de resistividade intermediária (ZIR). As zonas de baixa resistividade (ZBR) tiveram limites superiores diferentes para as duas barragens. Na barragem BR o limite máximo para a ZBR ficou em 250 ohm.m, enquanto na B1 esse valor ficou limitado a 84 ohm.m. Essa diferença de resistividade está relacionada a composição das barragens, ou seja, a natureza dos meios submetidos a passagem da corrente elétrica. A barragem B1 sendo composta em grande parte de argila fosfática mostrou ser menos resistiva do que a barragem BR composta de areia de magnetita.

Com as respostas do GPR podemos observar as zonas úmidas devido à forte atenuação dos refletores, nas zonas secas a atenuação diminui significativamente. Em algumas seções foi possível correlacionar os padrões dos refletores a diferentes zonas resistivas. O uso do potencial espontâneo (SP) de maneira geral vem para complementar os resultados da eletrorresistividade, com a finalidade de mapear se háa existência de fluxos nas áreas de baixa resistividade (ZBR) e quais suas direções preferenciais.

Método geofísicos são não invasivos e uma vez calibrados geram de forma contínua um imageamento completo em 2D e 3D do interior dessas estruturas. Aliado a um baixo custo operacional, rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios. O uso da geofísica possui um grande potencial em identificar regiões com possíveis anormalidades em estágio inicial ou avançado.

1. **DESCRIÇÃO/METODOLOGIA**

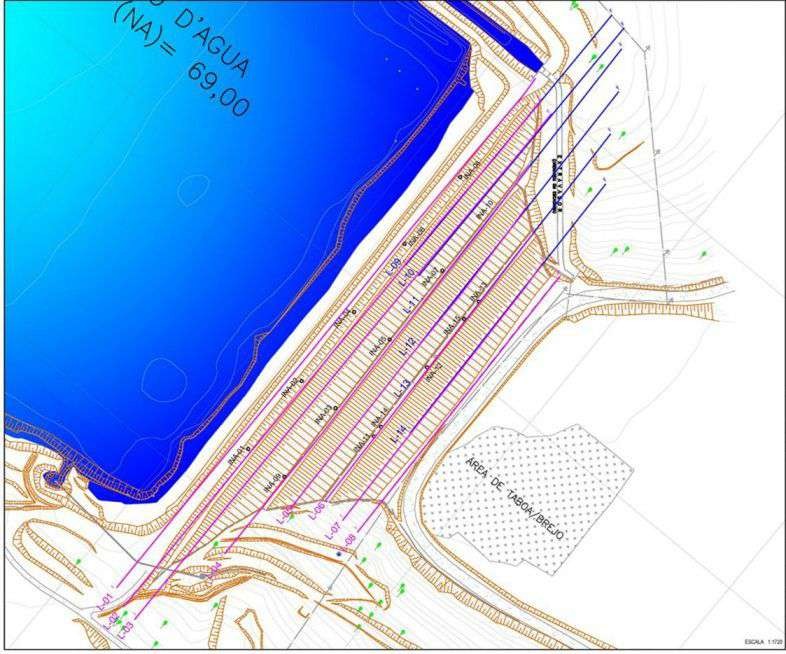
Esta pesquisa envolve a investigação de duas barragens de rejeitos (BR e B1) da empresa Mosaic Fertilizantes. A primeira é a barragem BR encontra-se no Complexo de Mineração de Tapira, no Estado de Minas Gerais. Trata-se de uma mina de fosfato, a 400Km de Belo Horizonte. Atualmente o monitoramento é feito pela instrumentação tradicional denominada auscultação, conta com as seguintes ferramentas: 1 piezômetro de Casagrande, 11 indicadores de nível d´água (INA), 3 indicadores de fluxo, 11 marcos topográficos, 1 régua graduada no reservatório, 1 pluviômetro e 1 evaporímetro.

Em segundo, tem-se a barragem B1. Que faz parte do Complexo Mineroquímico de Cajati, região Sul do Estado de São Paulo, aproximadamente 200Km da capital. Também tratando-se de uma mina fosfática, a barragem B1, atualmente conta com as seguintes ferramentas de monitoramento: 1 piezômetro de Casagrande, 6 piezômetros elétricos, 13 indicadores de nível d´água (INA), 9 marcos topográficos, 1 régua graduada e 1 pluviômetro (Mosaic Fertilizantes S.A, 2016).

Ambas sendo barragens de rejeitos, sofreram sucessivos alteamentos durante as etapas de construção. Os alteamentos são obras de engenharia, realizadas para que a estrutura da barragem consiga conter o aporte de material que é descartado. A barragem de rejeito de Tapira foi construída através do método de linha de centro usando magnetita ciclonada, enquanto a barragem de Cajati teve sua construção feita através de alteamentos por método a jusante ea montante com a utilização de argila fosfática.Foram utilizados 3 métodos elétricos e 1 método eletromagnético através do *ground penetrating radar* (GPR), para um melhor entendimento, todos os ensaios geofísicos utilizados foram brevemente descritos na seção 2.1. Nas duas barragens (BR e B1) foram feitas seções geofísicas ao eixo principal, ou seja, seções longitudinais e paralelas as cristas das barragens. Na barragem BR foram feitas 10seções Geofísicas, sendo 9 principais e 1 complementar na ombreira esquerda (Fig.1).Enquanto na barragem B1 foram feitas em uma primeira etapa 8 seçõesgeofísicas e posteriormente, a partir dos primeiros resultados, mais 6 seções complementares na ombreira esquerda (Fig.2).

|  |
| --- |
|  |
|  |

**Fig.1 -** Em vermelho está à disposição das 9 linhas (L01 a L09) do levantamento geofísico na barragem BR, e em verde a linha complementar (L10), todas longitudinais ao corpo do barramento (Rocha D.C.G, 2019).



**Fig.2**- Localização das seções de eletrorresistividade e polarização induzida (linhas em rosa e azul)paralelasaoeixodabarragem B1.AslinhasemrosacorrespondemàslinhasL01aL08.Notopo dacristadabarragemestáaL01,descendosucessivamenteatéopédabarragemchegandoàlinha L08,juntoàáreadebrejo.Aslinhasazuiscorrespondemàsegundafasedeaquisiçãodeseçõesde eletrorresistividade (L09 a L14), junto à ombreira esquerda. A linha mais ao topo da barragem é a L09, descendo sucessivamente até aL14 (Silva R.A, 2019).

Nas duas barragens as seções geofísicas foram executadas de modo coincidente para todos os métodos utilizados. O método de GPR não se estendeu para as ombreiras em algumas seções devido as dificuldades topográficas encontradas. Já os métodos elétricos cobriram todo o corpo do maciço.

* 1. **Métodos elétricos**

A técnica utilizada para essa aquisição geofísica foi a do caminhamento elétrico (CE) com os eletrodos dispostos no arranjo dipolo-dipolo para respostas da resistividade e polarização induzida (IP). Para o SP foi usado a técnica da base fixa nas duas barragens. Os ensaios elétricosde eletrorresistividade, polarização induzida (IP) e potencial espontâneo (SP) na barragem de magnetita denominada BR totalizaram 4594 m divididos em 10 linhas de levantamentos geofísicos (Fig.1).Enquanto na barragem de argila fosfática denominada B1 os métodos elétricos totalizaram 2215 m(Fig.2).

**2.1.1 Eletrorresistividade**

É um método geofísico aplicado para determinar a resistividade elétrica dos materiais após excitação por uma corrente elétrica. De forma prática a resistividade pode ser compreendida como sendo o inverso da condutividade, ou seja, um meio de alta condutividade possui baixa resistividade e vice-versa. Na prática, a aquisição elétrica utiliza pares de eletrodos de corrente (AB) e pares para medidas de potencial (MN). O par de eletrodos A e B, denominado corrente, injeta uma corrente elétrica artificial no meio, a corrente se propaga pelo meio, através de um fluxo contínuo. Enquanto o par de eletrodos MNmede o potencial elétrico gerado nas vizinhanças desse fluxo. O arranjo de eletrodos utilizado durante o caminhamento elétrico na aquisição geofísica foi o dipolo-dipolo. Após testes iniciais, esse arranjo foi o escolhido devido a melhor razão sinal / ruído e boa relação entre a profundidade da investigação e resolução lateral.A resistividade foi determinada através do cálculo da diferença de potencial (ΔP), sendo a profundidade dada por Z (Fig.3).

Uma imagem contendo mapa

Descrição gerada automaticamente

**Fig 3**–Desenho esquemático da configuração dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo, utilizada na aquisição de dados durante o caminhamento elétrico (CE) nas barragens BR e B1. (Dentith and Mudge, 2014).

Para a barragem B1 foi feito caminhamento elétrico ao longo de 14 linhas (L01 – L14), divididas em duas campanhas de aquisição. O espaçamento entre as linhas variou entre 10 a 15m. Na barragem BR, o caminhamento elétrico foi realizado ao longo de 10 linhas (L01-L10), em campanha de aquisição única. O espaçamento entre as linhas variouentre 15 e 25m.

**2.1.2 – Polarização Induzida**

O método elétrico de Polarização Induzida (IP) é baseado na edição das variações de voltagem em função do tempo ou frequência (Telford *et al*., 1990). Ao se aplicar uma diferença de potencial por intermédio de eletrodos de corrente convencionalmente chamados de A e B, cravados na superfície do terreno, ocorre uma polarização do solo. Esta diferença de potencial primária não se estabelece nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos. Ela varia com o tempo na forma de uma curva ΔVIP = f(t). A amplitude de um valor ΔVIP (t) está diretamente ligada a um maior ou menor capacidade que os terrenos têm de se polarizarem, constituindo, portanto, a base do método (Braga,2006).Para esse método também foi usado o arranjo dipolo-dipolo (Fig.3).

**2.1.3 – Potencial Espontâneo**

Trata-se de um método de campo natural e baseia-se no fato de que, mesmo na ausência de qualquer campo elétrico criado artificialmente, é possível medir uma diferença de potencial entre dois eletrodos impolarizáveis introduzidos no terreno, que pode ser de alguns milivolts até algumas dezenas de milivolts. Usualmente para barragens o método utilizado é a diferença de potencial por descensum. O fluxo de água através de um sistema capilar coleta e transporta íons positivos existentes nos materiais circundantes. Os íons positivos se acumulam no ponto de saída do sistema, deixando uma carga liquida positiva. Os íons negativos não transportados se acumulam no ponto de entrada do sistema capilar, deixando uma carga líquida negativa. Se o potencial de fluxo desenvolvido por esse processo é de magnitude suficiente para ser medido, os pontos de entrada e saída das zonas de percolação podem ser determinados em virtude das anomalias de potencial. Os eletrodos não polarizáveis foram constituídos por cobre, imersos em solução de sulfato de cobre (CuSO4) e espaçados 5,0 metros entre si. O arranjo utilizado, potencial ou de base fixa (Fig.4), compreende dois eletrodos de medidas, sendo um deles mantido fixo enquanto o outro percorre os pontos de medidas nos perfis ou malha de levantamento. Foram realizados 4594 m de levantamento de SP, longitudinais e paralelos ao eixo do barramento, compreendendo as linhas de L01 a L10 (Fig.4) para barragem BR e 2215 m para a barragem B1 divididos em 8 linhas L01 a L08, na primeira etapa de aquisição.

Uma imagem contendo objeto, antena

Descrição gerada com alta confiança

**Fig 4** - Simulação em planta de seções referente ao procedimento em que a estação-base é o ponto do eletrodo M e as posições N, N’ e N” referem-se às sucessivas posições do eletrodo itinerante. (Fonte: Mosaic Fertilizantes S.A., 2016)

* 1. **GPR (Ground Penetrating Radar)**

Consiste em um método geofísico não invasivo. Comumente é aplicado na investigação de alvos rasos. Tem como referência a interação entre ondas eletromagnéticas e o meio a ser investigado. Na prática, conta com um equipamento que possui um par de antenas. Uma destas, emite as ondas eletromagnéticas, segundo uma frequência conhecida. Assim, o sinal transmitido se propaga pelo substrato, interagindo com as diferentes camadas e demais objetos que estejam em subsuperfície. Consequentemente, o sinal sofre reflexão e a velocidade de propagação do sinal é modificada. Ou seja, há uma atenuação na intensidade do sinal. Por último, uma parte do sinal retorna a superfície e é detectado pela segunda antena.

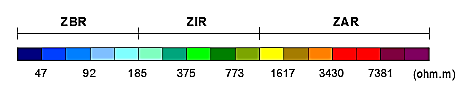
A escolha pela frequência a ser utilizada na investigação é feita após uma etapa de calibração. Significa que são feitos testes com diferentes frequências na região a ser investigada. Geralmente, testes com frequências mais altas resultam em uma melhor resolução espacial e menor capacidade de penetração. Para a ocasião da aquisição nas barragens BR e B1 foram testadas três frequências: 40, 80 e 100 MHz. Ao final, foi selecionada a frequência de 100 MHz, para ambas, devido a melhor razão sinal-ruído. Além da frequência, há outros fatores a serem considerados para a aplicação do método: composição do substrato (minerais e presença de materiais de construção), propriedades magnéticas das camadas do substrato e presença de água.

1. **RESULTADOS**
   1. **- Barragem BR**

Os ensaios geofísicos aplicados na investigação do interior da barragem BR alcançaram resultados excelentes. Os principais resultados estão descritos abaixo:

**3.1.1 – Posicionamento do nível freático (N.F)**

Após processamento dos dados de eletrorresistividade medidos em campo, foi possível identificar 3 zonas distintas: Zona de alta resistividade (ZAR), com valores acima de 1.116 ohm.m. Zona de baixa resistividade (ZBR), com valores abaixo de 250 ohm.m. E uma zona de resistividade intermediária (ZIR), cujo os valores então compreendidos entre 250 e 1.116 ohm.m. Abaixo segue a escala de resistividade usada para a barragem BR:



**250**

**Fig 5**–Escala de valores da resistividade para a barragem BR (Rocha D.C.G, 2019).

A partir do limite definido para a zona de baixa resistividade (ZBR) o nível freático (N.F)foi mapeado de forma precisa, considerando o seu topo no limite máximo dessa zona á 250 ohm.m. Posteriormente, o nível freático mapeado pela geofísica foi comparado com o nível freático adquirido através de 3 seções-tipo (C,D,E) localizados na parte central do barramento. Essas seções-tipo compreenderam os resultados de 7 INAs (indicadores de nível d’água). O posicionamento do nível freático mapeado pelos INAs foi muito próximo dos resultados geofísicos obtidos.

Uma imagem contendo texto, mapa

Descrição gerada automaticamente

**Fig 6**–Comparação do posicionamento do nível freático mapeado pela geofísica em comparação com o nível freático mapeado pelos INAs (Rocha D.C.G, 2019).

**3.1.2 – Posicionamento da ZBR e do tapete drenante**

Pelo posicionamento da seção de eletrorresistividade L05 foi possível observar que o tapete drenante encontra-se abaixo da ZBR. Por essa seção podemos observar que o tapete drenante está a 35 m de profundidade enquanto o topo da ZBR está a 29 m. Portanto pelos resultados da eletrorresistividade o tapete drenante na época da aquisição geofísica encontrava-se afogado pelo nível freático do barramento.

Uma imagem contendo texto, mapa

Descrição gerada automaticamente

**Fig 7**–Posicionamento do tapete drenante em relação ao topo da ZBR. A ZBR foi definida como sendo o topo do nível freático pela geofísica (Rocha D.C.G, 2019).

**3.1.3 – Correlação entre os dados de GPR e Eletrorresistividade para linha L05.**

Analisando os dados de GPR, é possível determinar três estratos sobrepostos a ZBR com padrões diferenciados de refletores nesse grupo:

* 1. O primeiro é o mais superficial, caracterizado por um horizonte pouco espesso (2 a 3m), marcado por refletores contínuos, paralelos e planos.
  2. O segundo abaixo desse horizonte é possível marcar um conjunto de refletores moderadamente contínuos a contínuos na região do maciço (4 a 7m).
  3. Já nas regiões inferiores das seções encontram-se um padrão de refletores que definem um horizonte espesso e de forma geral bem atenuado sugerindo um aumento na saturação (11 a 13m).

Uma imagem contendo captura de tela

Descrição gerada automaticamente

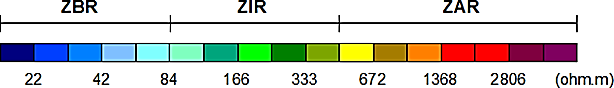
**Fig 8**–Correlação entre os de GPR (ground penetrating radar) e eletrorresistividade para a parte central do maciço. Seção representativa L05 (Rocha D. C.G, 2019).

* 1. **– Barragem B1**

Os ensaios geofísicos aplicados na investigação do interior da barragem B1, também alcançaram resultados excelentes. Os principais resultados estão descritos abaixo:

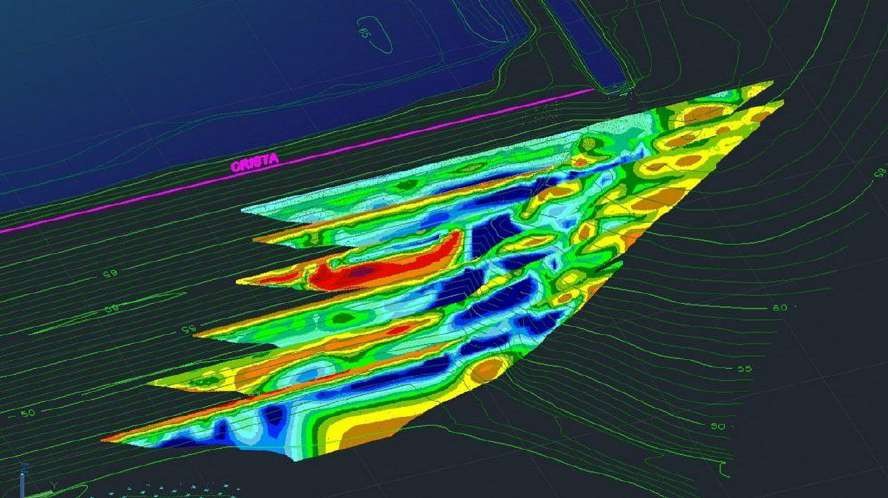
**3.2.1 – Zona de baixa resistividade (ZBR), observada na ombreira esquerda**

Asseçõeslevantadas em 2 campanhas de campo,L01aL14,atingiramprofundidadesde18a40metros,e forameficientesnadetecçãodeanomaliasdebaixaealtaresistividade.Foramestabelecidaszonasdebaixaresistividade interpretadas como regiões saturadas(ZBR–abaixode84ohm.m). Regiões de resistividade intermediária sendo interpretadas com a ocorrência de alguma umidade (ZIR – entre 84 e 500 ohm.m) e regiõesde alta resistividade, interpretadas como regiões secas (ZAR – acima de 500ohm.m) (Fig.6).



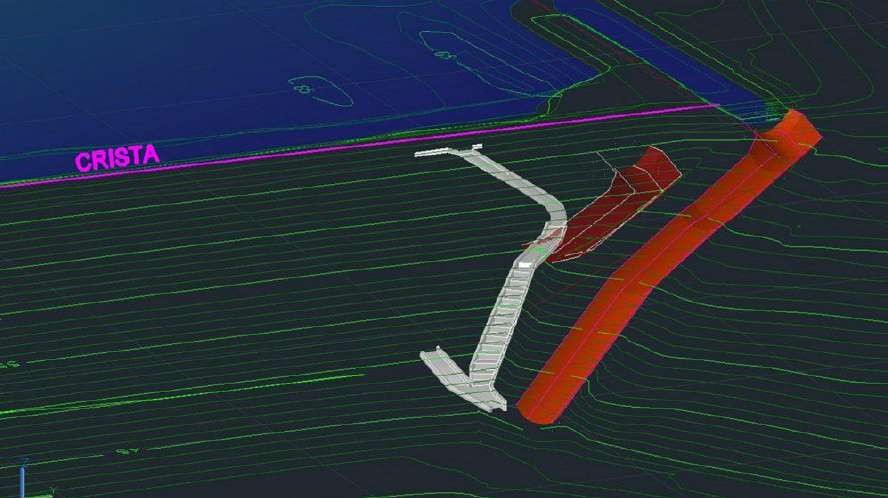
**Fig 6**–Escala de valores da resistividade para a barragem BR (Silva R.A, 2019).

Foram observadas nas seções L01 a L04 regiões de baixa resistividade tanto junto à ombreiradireitabemcomojuntoàombreiraesquerda. Para melhor compreensão destas ZBR, uma nova campanha foi feita cobrindo a ombreira esquerda, resultando nas seções de L09 até a L14. Observam-se ZBR presentesemtodasasseções,indicandoumprovávelcaminhopreferencialdeágua.



**Fig. 7** - Seções de Eletrorresistividade de L09 até L14. Observam-se Zonas de Baixa Resistividade presente em todas as seções, indicando um provável caminho preferencial de água (Silva R.A. 2019)

Nas novas seções feitas junto à ombreira esquerda, a persistência de ZBRs ocorreu de modo expressivo, o que acarretou em investigações mais enfáticas. Através de análises mais profundas dos projetos de engenharia e diálogos com os engenheiros responsáveis pela barragem, foi obtida a informação de que algumas estruturas de concreto em escada foram mantidasduranteasobras.Sãoantigoscanaisdedescargaextravasores,sendopreenchidospor umtapetedrenante,formadoporbritacorridaeareia,quepassaramaservirdedrenosjuntoà ombreira esquerda (Fig.8).

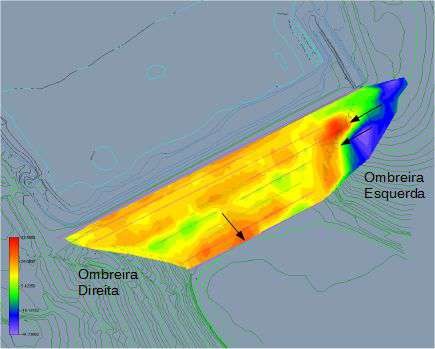


**Fig. 8** - Estruturas de antigos canais extravasores que foram preenchidas com brita corrida e areia e mantidas como drenos junto à ombreira esquerda (Silva R.A, 2019)

**3.2.2 – Análise do Potencial Espontâneo (SP) – Ombreira esquerda**

OresultadodoslevantamentosdePotencialEspontâneo(SP)éapresentadona figura 9. Os dados analisados mostraram a existência de dois padrões de comportamento de SP: um caracterizado pela predominância das cores verde/azul, cujosvaloresencontram-seabaixode5mVedispostospreferencialmentenaregião daOmbreiraEsquerda;eoutroassociadoàscoresamarelo/vermelho,cujosvalores encontram-se acima de 5 mV. A distribuição das repostas geofísicas na região do maciçoémajoritariamentehomogênea,compontosdemaiorpotencial(35a55mV) localizadospróximoàsbermasinferioreseàombreiraesquerdadabarragem.

Os resultadosindicaramumfluxodeáguadaombreiraemdireçãoaocorpodabarragem. Esteresultadoestádeacordocomosdadosderesistividade,querevelaramos antigos extravasores que foram transformados em drenos. Esse fluxo da ombreira para a barragem é constante, podendo ser observada a saída dessa água nacaixa localizadanopédoextravasoratual.Éobservadotambémumfluxodeáguanabase junto ao pé da barragem.



**Fig. 9**- Os resultados de Potencial Espontâneo mostraram um fluxo de água da ombreira esquerdaemdireçãoaomaciçodabarragem.Mostramtambémumfluxojuntoaopédomaciçoem direção ao brejo dejusante (Silva R.A, 2019).

**4 – CONCLUSÕES E DISCUSSÕES**

A pesquisa realizada utilizou 4 métodos geofísicos, que analisaram propriedades físicas diferentes, e forneceram resultados para o mapeamento em subsuperfície ao longo das barragens BR e B1. Os resultados geofísicos geraram imagens contínuas em 2D e 3D ao longo dos barramentos. Após a análise e discursões desses resultados, a geofísica rasa mostrou ser uma importante ferramenta complementar na investigação e no monitoramento de barragens de rejeitos. A aplicação do método eletromagnético com o GPR e principalmente o método elétrico da eletrorresistividade, em geral, foram os mais eficazes na separação de áreas secas das saturadas. O método elétrico de potencial espontâneo mostrou eficiência em indicar se há direção de fluxos preferenciais nas regiões saturadas, como observamos na ombreira esquerda da barragem B1.

A partir das leituras dos INA (indicadores de nível de água), próximo a época do levantamento elétrico, foi possível calibrar os resultados da eletrorresistividade com o intuito de identificar a zona de alta condutividade (ZBR). Na barragem BR o nível freático mapeado pela eletrorresistividade mostrou ser muito próximo do nível freático mapeado anteriormente pelos INA.

Em resposta ao *ground penetrating radar* (GPR), zonas saturadas apresentaram atenuação dos refletores, sendo esta atenuação menor com a diminuição no teor de água. Foi possível correlacionar em algumas seções, padrões dos refletores à diferentes zonas resistivas. O GPR complementou os dados de eletrorresistividade diminuindo a ambiguidade na interpretação final dos resultados. Esse método mostrou ser muito eficiente na identificação das diferentes descontinuidades através das respostas nos padrões de refletores.

. Somente os resultados da polarização induzida (IP) mostraram ser insuficientes em separar zonas secas das úmidas ou detectar algum tipo de anormalidade no interior dos barramentos devido à grande ambiguidade para a interpretação desse método.

Como recomendação, com base nos resultados alcançados dos 4 métodos geofísicos levantados na barragem BR e B1, e através dos estudos prévios de aplicações da geofísica em outros trabalhos desse mesmo tema.É de grande importância a implementação de dois levantamentos geofísicos terrestres anuais, para complementar os dados oriundos da instrumentação convencional instalada dando uma maior confiabilidade no gerenciamento de risco e tomadas de decisões. Dessa forma, essa pesquisa sugere o uso do método de eletrorresistividade em conjunto com o método do *ground penetrating radar* (GPR), periodicamente, sendo o primeiro levantamento geofísico na estação seca e um segundo na chuvosa, levando em consideração um estudo prévio do índice pluviométrico anual da região. Para a barragem B1 sugere-se ainda o uso do potencial espontâneo na ombreira esquerda. Assim, será possível visualizar todo o comportamento hidráulico interno das 2 barragens ao longo do ano, monitorando infiltrações indesejáveis e fluxos e em qual época será a maior ocorrência de anormalidades.

**5 – BIBLIOGRAFIA**

BRAGA, A.C.O., Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas. Brasil (2006)

CHINEDU A. D & OGAH A. J., Electrical resistivity imaging of suspected seepage channels in an earthen dam in Zaria, north-western Nigeria. US (2013)

DENTITH M & MUDGE S.T., Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. US (2014)

ISHIHARA K., Simple method of analysis for liquefaction of sand deposits during earthquakes. Soils and Foundations, US (1977)

NWOKEBUIHE S. C. et al., Dam seepage investigation of an earthfill dam in warren county Missouri using geophysical methods. US (2016)

MOSAIC VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.2016. Auditoria técnica de segurança da barragem BR. Relatório de inspeção de segurança regular. Relatório de auditoria técnica de segurança, complexo de mineração de Tapira, Brasil (2016)

ROCHA D.C.G., Aplicação da Geofísica Rasa na Investigação da Barragem de Rejeito BR no Complexo de Mineração de Tapira – Minas Gerais, Brasil – Dissertação de Mestrado – UFRJ, Brasil (2019)

SILVA R.A., Geofísica Aplicada à Caracterização da barragem de rejeito B1, Cajati, São Paulo – Dissertação de Mestrado – UFRJ, Brasil (2019)

Telford, W.; Geldart, L. & Sheriff, R., Resistivity Methods. In: *Applied Geophysics*. Cambridge. England (1990).

ZORZI R. R & RIGOTI A., Aplicação de métodos geoelétricos para monitoramento da barragem de concreto da UHE Gov. Brasil (2011)