



**Caracterização de Barragens de Rejeito Usando  
Geofísica Rasa: Aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo**  
Characterization of Tailing Dams Using Shallow  
Geophysics: Application in the Cajati B1 Dam, São Paulo

*Roberto Albuquerque<sup>1</sup>; Marco Antônio Braga<sup>1</sup>; Lorena Andrade Oliveira<sup>1</sup>;  
Leonardo Santana de Oliveira Dias<sup>1</sup>; Luis Antônio Pinto Almeida<sup>2</sup>;  
Arildo Henrique de Oliveira<sup>2</sup> & Silvana Brandão<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,  
Departamento de Geologia, Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada,  
Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, sala G-058, 21.941-916, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>2</sup>Mosaic Fertilizantes do Brasil Ltda.,

Rodovia MG 341, km 25, 38.185-000, Tapira, MG, Brasil

E-mails: roberto\_albuquerque@hotmail.com; marcobraga@geologia.ufrj.br; oliveiralorena28@hotmail.com;

leonardo.santana@gmail.com; luis.almeida@mosaicco.com.br;

arildo.oliveira@mosaicco.com.br; silvana.cembranelli@mosaicco.com.br

Recebido em: 27/11/2018 Aprovado em: 15/02/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_1\\_567\\_579](http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_567_579)

## Resumo

Barragens de rejeito são estruturas muito usadas em Mineração. Estas estruturas são monitoradas diariamente por instrumentos como: piezômetros, marcos topográficos e medidores de nível d'água. No Brasil, a utilização de geofísica para avaliação e monitoramento de barragens de mineração não é uma prática usual. A Barragem B1, que faz parte do Complexo Mineralógico de Cajati (Mosaic Fertilizantes), no estado de São Paulo, foi escolhida para avaliação do uso de eletrorresistividade. O presente trabalho visa discutir os resultados geofísicos desta barragem, assim como, analisar a aplicabilidade do método geofísico como forma de avaliar as condições internas do maciço da estrutura. A Barragem trata-se de um maciço zoneado com septo argiloso impermeável, tendo a jusante um material permeável constituído por rejeitos de calcário. Inicialmente, foram levantados 8 perfis de caminhamento elétrico. Com uma análise desses perfis, observou-se uma zona de baixa resistividade – ZBR nas duas primeiras seções, correspondendo com a cota do aterro argiloso. Estas cotas estão coerentes com o nível de água normalmente observado nos Indicadores de Nível D'água localizados junto à crista da barragem. Foram observadas em algumas seções ZBRs, tanto junto à ombreira direita bem como junto à ombreira esquerda. A fim de aprofundar a investigação a cerca destas ZBRs, uma nova campanha foi feita cobrindo a ombreira esquerda. Através de análises mais profundas dos projetos de engenharia, foi obtida a informação de que foram mantidos os canais de descarga de extravasores antigos, sendo preenchidas por um tapete drenante, passando a servir de drenos. As ZBRs, observadas nas seções, coincidem com estas estruturas, possivelmente condicionadas pela percolação de água. Observa-se que os dados obtidos com a aplicação de Eletrorresistividade estão coerentes com a estrutura do maciço, estando em harmonia com as medições dos instrumentos que monitoram a barragem. A geofísica, como demonstrado, complementa a instrumentação da barragem, dá uma visão ampla sobre a distribuição de umidade no maciço e mostra o seu comportamento em trechos que não são cobertos pela instrumentação usual.

**Palavras-chave:** Barragem; Rejeito; Geofísica

## Abstract

Tailing dams are structures widely used in the mining industry. These structures are monitored by instruments such as piezometers, topographic benchmarks and borehole standpipes on a daily basis. Some geophysical methods have been used in addition to this monitoring. In Brazil, the use of geophysics for evaluation and monitoring of mining dams is not a common practice. The B1 dam, which is part of the Cajati Mining Site (Mosaic Fertilizantes), in São Paulo state, was chosen to be evaluated on the use of electroresistivity. The present work aims to discuss the geophysical results from this dam, as well as to analyze the applicability of the geophysical method as a way of evaluate the internal conditions of the structure's embankment. The B1 dam is a zoned structure with a water-impermeable clay core and more permeable material consisting of limestone tailings downstream. Initially, eight electrical 2D profiles were acquired. From the analysis of these profiles, a low resistivity zone – ZLR could be observed on the first two sections, corresponding to the elevation of the clay core. The elevations were consistent with the water level normally observed in the water level indicators located near the crest of the dam. ZLRs were observed both along the right abutment and next to the left abutment. In order to further investigate these ZLRs, a new electrical campaign was performed covering the left abutment with new geophysical sections. After a more thorough analysis of the engineering projects, the information emerged that there were discharge channels of old spillways filled by a blanket drain. The ZLRs observed in the new sections coincide with these structures, possibly conditioned by water percolation. The data obtained with the application of the electro-resistivity method are coherent with the structure of the dam, being in harmony with the measurements of the instruments that monitor the dam. Geophysics, as demonstrated, complements the dam instrumentation, and gives a broader view of the distribution of moisture in the embankment, showing its behavior in stretches that are not covered by the usual instrumentation.

**Keywords:** Dam; Tailing; Geophysics

## 1 Introdução

Barragens de rejeito são estruturas muito usadas em Mineração, visando a disposição final dos resíduos do beneficiamento do minério. Estas estruturas merecem uma atenção especial desde a fase de projeto até o fechamento da Mina. Elas são monitoradas no dia a dia da operação por instrumentos tais como: piezômetros, marcos topográficos, medidores de nível d'água, etc. Esses instrumentos fornecem uma informação direta sobre sinais de recalque e sobre o comportamento da água dentro do corpo da barragem. É muito usado também o levantamento batimétrico periódico do lago, verificando se o preenchimento de rejeito está ocorrendo conforme planejado. Além do uso de instrumentos, inspeções visuais rotineiras são feitas observando-se a presença de trincas, de surgências de água, erosões, etc. O estado de conservação de canaletas e do vertedouro também deve ser verificado.

Alguns métodos geofísicos têm sido usados como complemento dessas inspeções, seja para se observar a estrutura do maciço da barragem, como em Sjö Dahl *et al.*, (2005), seja para avaliar alguma surgência identificada, tais como em Sjö Dahl *et al.* (2008), Johansson (1997) e Panthulu *et al.* (2001). Perfilagens elétrica, levantando Potencial Espontâneo (SP) e Resistividade foram executadas nas barragens de rejeito de Kiruna, Aitik and Kristineberg na Suécia para observação do nível do lençol freático e identificação de zonas de saturação de água e de surgências anômalas (Mainali, 2006).

Alguns métodos geofísicos (Perfilagem elétrica: IP, Resistividade e Ground-penetrating radar – GPR) vem sendo usados também na investigação de outras estruturas da mineração, tais como pilhas de estéril, com o objetivo de verificar zonas de saturação de umidade e para o controle do fluxo de água interno à sua estrutura (Poisson *et al.*, 2009; Campbell & Fitterman, 2000; Anterrieu *et al.*, 2010).

No Brasil a utilização de geofísica para avaliação e monitoramento de estruturas de mineração não é uma prática usual. Entretanto, recentemente, alguns trabalhos vêm sendo feitos. Um exemplo ocorreu na barragem de rejeito do Diogo em Rio Piracicaba, Minas Gerais, onde foi utilizado radar de

penetração no solo (GPR) para definir a existência de padrões de sedimentação na subsuperfície do depósito de rejeito (Martini *et al.*, 2016).

Devem ser também mencionados alguns trabalhos feitos em barragens de captação de água. Na barragem de terra próximo a Cordeirópolis, São Paulo, foi feita uma tomografia de eletro-resistividade, permitindo observar um provável fluxo preferencial de água perpendicular ao eixo da barragem (Camarero & Moreira, 2017).

O Centro de Pesquisas em Geofísica Aplicada (CPGA) do Departamento de Geologia da UFRJ tem como objetivo pesquisar a utilização da Geofísica soluções de diversos problemas da indústria e do cotidiano das pessoas. Assim iniciou um projeto visando estudar e difundir a aplicação de geofísica em barragens de rejeito no Brasil. Uma das barragens selecionadas neste projeto é a Barragem B1 do Complexo Mineroquímico de Cajati, a qual será descrita logo abaixo.

Neste trabalho serão discutidos os resultados da aplicação de Eletroresistividade e Batimetria nesta barragem de rejeito de Cajati.

## 2 A Barragem B1

O Complexo Mineroquímico de Cajati localiza-se na região sul do Estado de São Paulo (Figura 1). A extração de apatita, atividade primária do complexo, ocorre em carbonatitos inseridos em clinopiroxênitos, que na região são denominados de Jacupiranguitos. A partir da apatita, ocorre a produção, dentro do complexo, de ácido sulfúrico, ácido fosfórico, rocha fosfática e fosfato bicálcio.

Dentro de suas instalações, ao norte do complexo mineroquímico, está localizada a Barragem B1, para onde é destinado o resíduo de lama calcária de sua operação.

A Barragem B1 iniciou com um dique de partida em 1973 com cerca de 15,0 m de altura, construído com aterro argiloso compactado, apresentando um enrocamento de pé a jusante (LEME Engenharia, 2016). Para a construção do dique de partida não foi removida a camada de solo aluvionar de 1 a 2 m de

## Caracterização de Barragens de Rejeito Usando Geofísica Rasa: Aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo

Roberto Albuquerque; Marco Antônio Braga; Lorena Andrade Oliveira;  
Leonardo Santana de Oliveira Dias; Luis Antônio Pinto Almeida; Arildo Henrique de Oliveira & Silvana Brandão

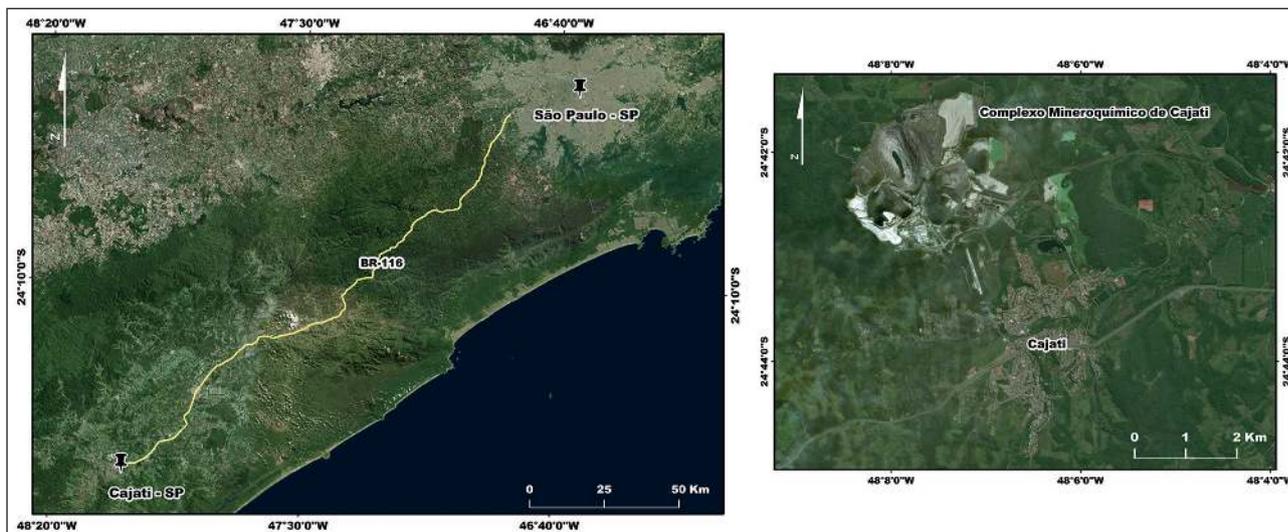


Figura 1 Localização do Complexo Minerquímico de Cajati (modificado de *World Imagery Basemap – ArcGis*; ESRI, 2017).

espessura, de características argilosas e consistência mole, que recobre a região (Geoconsultoria, 2017).

Posteriormente passou por pequenos alteamentos sucessivos (Tabela 1), resultando num maciço zoneado com uma zona impermeável a montante

(septo argiloso), sendo as partes de jusante e montante executadas, com material permeável constituído por rejeitos de calcário. A Figura 3 mostra uma seção no centro do maciço da Barragem B1 onde é possível ver a complexidade da estrutura.

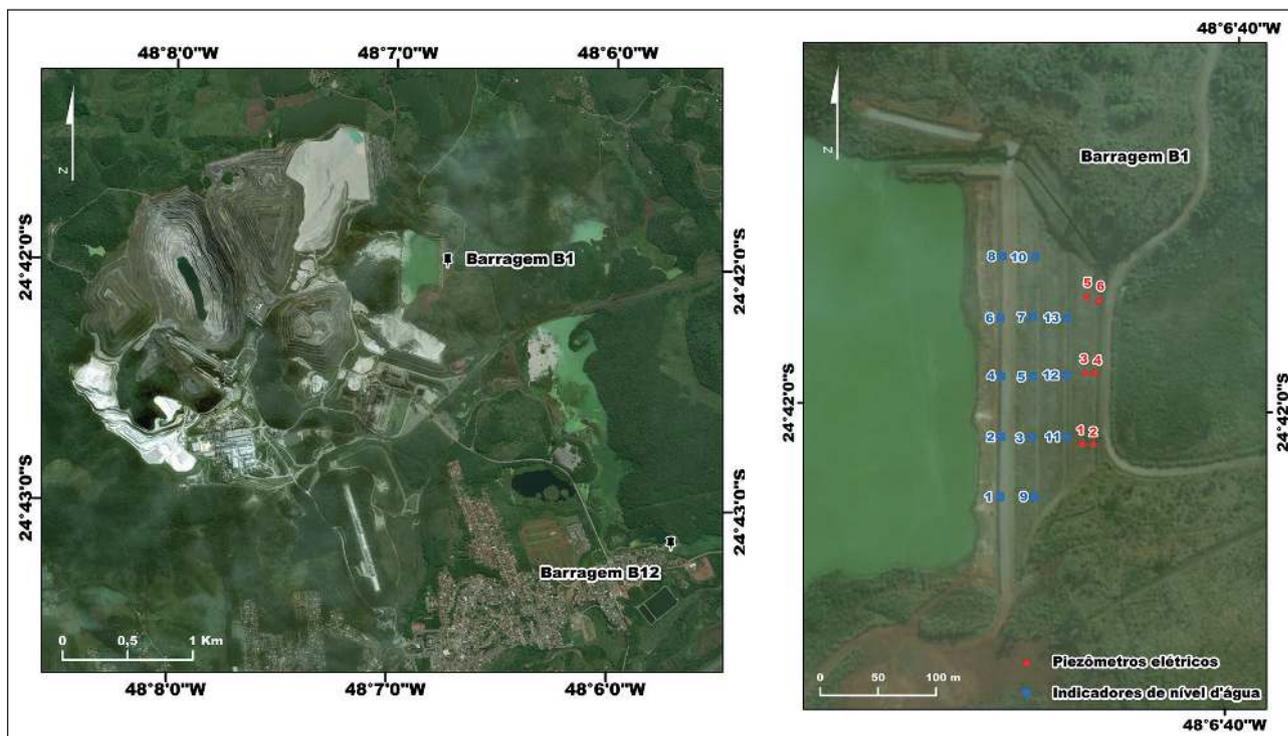


Figura 2 A Barragem B1 está na parte norte do Complexo de Cajati. Estão instalados no corpo da barragem 13 indicadores de nível d'água - INA's (em azul) e 6 piezômetros elétricos - PZE's (em vermelho). A Barragem B12 é o destino final de todos os efluentes do Complexo Minerquímico antes de serem descartados no meio ambiente.

Ano	Etapas	Cota (m)	Método
1973	Dique de partida	49,1	-
1992	1° Alçamento	52,1	Jusante
1995	2° Alçamento	55,5	Jusante
1999	3° Alçamento	60,5	Jusante
2003	4° Alçamento	65	Jusante
2008	5° Alçamento	66	Jusante
2009	6° Alçamento	71	Montante
2013	7° Alçamento	72	Montante
2015	8° Alçamento	73	Montante
Em andamento	9° Alçamento	75	Jusante

Tabela 1 Histórico dos diversos alçamentos da Barragem B1 (modificado de LEME Engenharia, 2016).

Na Figura 3 é possível observar a presença de um filtro vertical de areia associado a um tapete drenante formado por brita corrida que está interligado ao enrocamento do dreno de pé da estrutura, este sistema de drenagem interna foi executado durante o alçamento da estrutura para a cota 55,5 m (LEME Engenharia, 2016). Nos alçamentos posteriores este sistema não foi prolongado. Existe também um filtro de areia longitudinal ao eixo da barragem na cota de 71 m (Geoconsultoria, 2017).

A face do talude jusante da barragem possui proteção superficial com brita corrida feita com estéril de jacupiranguito e sendo coberta por vegetação de gramínea. O sistema de drenagem superficial é constituído por canaletas meia cana de concreto com seção trapezoidal implantadas nas bermas junto aos taludes e nas laterais do maciço (LEME Engenharia, 2016). O nível de água está muito próximo da superfície do terreno, nas regiões mais baixas das ombreiras e nas proximidades da várzea (LEME Engenharia, 2016). A jusante da barragem existe uma área de charco onde o lençol freático é aflorante.

A instrumentação da Barragem B1 é composta por 1 piezômetro Casagrande (PZ), 6 piezômetros elétricos (PZE), 13 indicadores de nível d'água (INA), 9 marcos superficiais (MS), 1 régua graduada no reservatório e 1 pluviômetro. A Figura 2 mostra a localização dos piezômetros e indicadores de nível d'água (INAs) (LEME Engenharia 2016). Os 6 piezômetros elétricos estão localizados mais próximos ao pé da barragem, enquanto os INAs estão distribuídos em 5 perfis transversais ao eixo da barragem.

Até o 8° alçamento, a barragem apresentava um canal extravasor escavado em terreno natural em seção trapezoidal seguido de um canal de descarga revestido em concreto. Para o alçamento de cota 75 m, será construído um novo extravasor na margem direita. O extravasor normalmente não é usado pois o efluente desta barragem é transferido por sifonamento para o reservatório da Barragem 12, onde se concentra todo o efluente líquido do Complexo. Na barragem 12, demonstrada na Figura 2, é feito o controle final antes do efluente ser destinado ao ambiente.

O rejeito é composto de: calcita (65,6%), dolomita (23,9%), apatita (7,2%) e mica (1,2%).

Neste trabalho serão discutidos os resultados da aplicação da Batimetria e Eletroresistividade na barragem de rejeito B1 do Complexo Mineiro de Cajati.

### 3 Metodologia

#### 3.1 Batimetria

A batimetria consiste em um método geofísico de superfície, com a finalidade de medir a profundidade de corpos hídricos. No presente trabalho, a medição é feita de modo indireto, através da emissão e posterior leitura de ondas acústicas por ecobatímetros.

Esse instrumento de propagação sonora emite um feixe de ondas acústicas, de frequência inferior à 18KHz, ou ultrassônicas, com frequência superior à 18 KHz (Miguens, 1996), de modo que sejam transmitidas verticalmente por um emissor instalado na embarcação, conhecido como transdutor de emissão. Este, é composto por material piezoelétrico, que transforma a energia elétrica em energia sonora, no momento de emissão da onda acústica. Os feixes sonoros atravessam o meio fluido, até alcançar o substrato submerso, havendo a posterior reflexão dos mesmos. O som é captado pelo transdutor de recepção, que converte as ondas acústicas em sinais elétricos ao serem detectadas. O tempo entre a emissão e o recebimento do sinal refletido é transformado em profundidade, sabendo a velocidade média de propagação dos feixes acústicos na água, em média 1500m/s (Miguens, 1996).

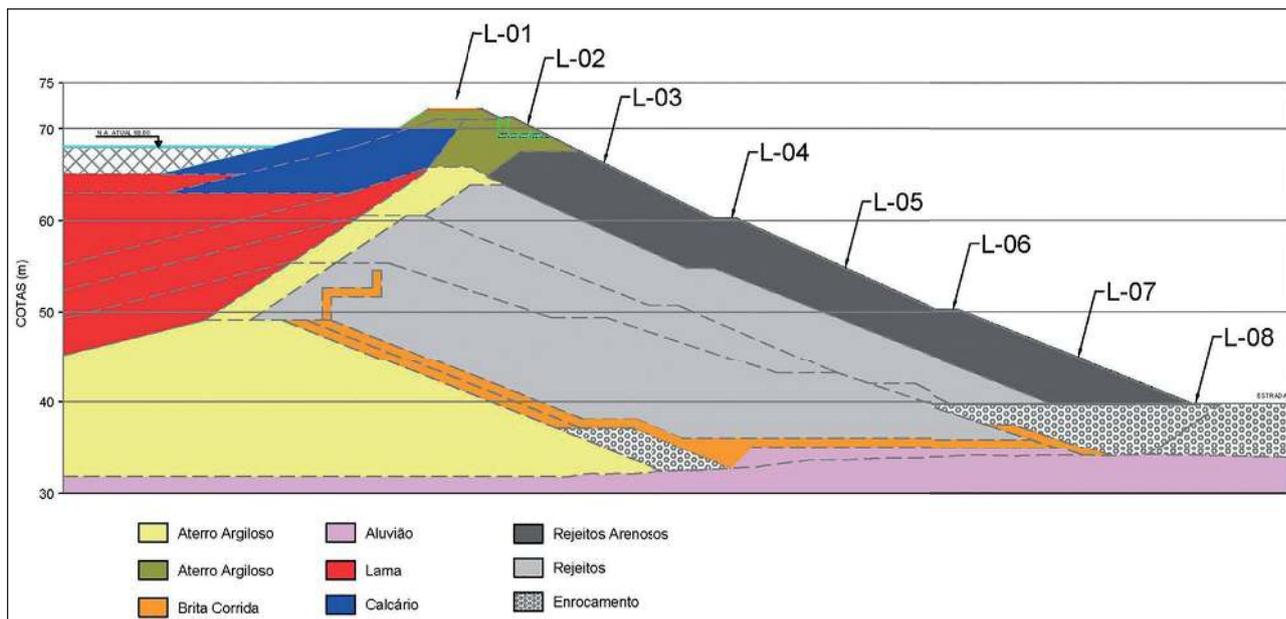


Figura 3 A Barragem B1 apresenta um maciço zonado com um septo argilosos a montante, tendo a jusante rejeito calcário compactado. A jusante do dique de partida podemos ver um filtro vertical de areia associado a um tapete drenante formado por brita corrida que está interligado ao enrocamento do dreno de pé da estrutura. É informado também a posição das linhas de Eletroresistividade (L-01 até L-08) (modificado de *World Imagery Basemap – ArcGis; ESRI, 2017*).

No início da aquisição batimétrica houve a calibração do método, onde usa-se uma ferramenta graduada a fim de obter maior conhecimento sob a lâmina d'água e também acerca da velocidade de propagação acústica na mesma. Ajustando-se a velocidade de propagação, tendo como base uma profundidade conhecida, é possível avaliar a calibração do aparelho. Tal procedimento é de suma importância para que se conheça as propriedades do fluido existente e dessa forma, minimizar possíveis erros de profundidade que possam vir a ocorrer caso essa etapa não seja executada. Após a calibração, é ajustada a frequência do transdutor para operação do equipamento em campo. Frequências maiores são usadas para menores profundidades associadas com uma maior resolução e ao contrário, frequências menores são utilizadas para maiores profundidades e menor resolução dos alvos. Uma vez conhecida a faixa de profundidade desejada, é adotada uma frequência adequada para a operação em campo.

### 3.2 Eletroresistividade

A eletroresistividade é um método geofísico baseado na determinação da resistividade elétrica

dos materiais. Esse método consiste na emissão de uma corrente elétrica artificial inserida no terreno através de dois eletrodos de corrente (denominados A e B) com a finalidade de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos de potencial (denominados M e N) nas redondezas do fluxo da corrente (Loke *et al.*, 2013), como mostrado na Figura 4. Com isso, é possível reconhecer regiões em subsuperfície que apresentam diferentes níveis de resistividade.

Para a definição da resistividade, é necessário o cálculo da diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre os eletrodos M e N mencionados acima. Para tal fim,

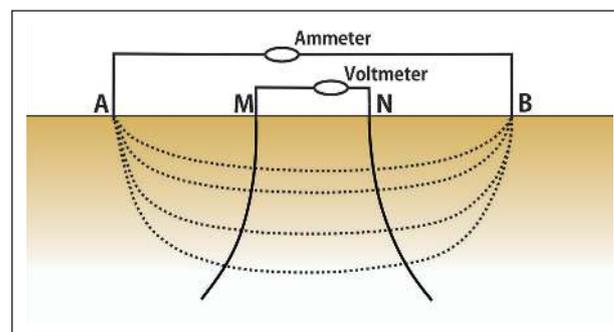


Figura 4 Desenho esquemático, ilustrando o funcionamento do método de eletroresistividade, em que o par de eletrodos AB correspondem ao circuito de corrente e o par de eletrodos MN correspondem ao circuito potencial (Braga, 2006).

calcula-se o potencial resultante do campo elétrico nos eletrodos M e N ( $V_M$  e  $V_N$ ), usando as fórmulas de Ohm (Telford *et al.*, 1990) a seguir, prevendo um meio homogêneo e isotrópico:

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

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

Onde I é a intensidade da corrente elétrica introduzida no subsolo,  $\rho$  a resistividade que o meio oferece a propagação dessa corrente e AM, BM, NA, BN a distância entre esses eletrodos. A diferença de potencial medida no equipamento será:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N \quad (3)$$

E que, por conseguinte, pode ser escrita sob a forma:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (4)$$

Todavia, a realidade do maciço de uma barragem corresponde a um meio heterogêneo, composto por diferentes tipos de materiais (areia, argila, cascalho), ocasionando em variações de  $\Delta V$  devido às variações de  $\rho$  no meio. Por isso, a medida de  $\Delta V$  representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície. Sendo assim, ao executar os cálculos pertinentes, chega-se a uma resistividade aparente,  $\rho_a$ , que é possível calcular através da seguinte equação:

Onde K equivale ao fator geométrico, que foi estabelecido de acordo com o arranjo usado no levantamento elétrico (Koefoed, 1979).

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (5)$$

(Telford *et al.*, 1990)

Onde K equivale ao fator geométrico, que foi estabelecido de acordo com o arranjo usado no levantamento elétrico (Koefoed, 1979).

## 4 Planejamento e Aquisição de Dados

### 4.1 Batimetria

O levantamento batimétrico foi realizado através de 16 linhas, sendo 9 paralelas (L1 – L9) ao corpo do maciço da barragem, de direção aproximadamente N-S, com espaçamento de 15 metros entre si e 7 linhas perpendiculares (T1 – T7), de direção aproximadamente E-W, espaçadas de 50 metros, como pode ser observado na Figura 5. O quantitativo das linhas supracitadas totalizou 4.039 metros de aquisição de dados batimétricos.

Foi empregado o ecobatímetro monofeixe, composto por um transdutor de 200 kHz AIRMAR SS510 e uma unidade de controle e processamento ECHOTRAC CV200, *Odom Hydrographic Systems Inc.* A escolha desse transdutor permite identificar alvos de menor tamanho e ainda cobrir de modo eficiente a lâmina d'água existente na área de trabalho. A determinação da posição foi feita por meio de um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS) ATLAS LINK, com precisão horizontal < 0,20 m e 95% de confiança. Todos os dados foram adquiridos no DATUM WGS84, na projeção UTM 22S.

O processamento de todos os dados batimétricos foi realizado no *software* Meridata MDPS 5.2. Os dados de batimetria foram corrigidos com a remoção de ruídos na coluna d'água e *spikes*, além de terem sido interpolados pelo método digipol, do *software* QINSy 8.15, com intuito de gerar os mapas de contorno batimétricos da área.

### 4.2 Eletrorresistividade

Para o presente trabalho, foram levantados inicialmente 8 perfis de caminhamento elétrico (L01-L08), com espaçamento de 3 metros entre os eletrodos, e espaçamento entre linha variável, de 10 a 15 metros. Inicialmente, houve 2.215 metros de aquisição de dados de eletrorresistividade. A localização dos perfis levantados (L01 a L08), paralelos ao barramento, estão representados por linhas rosas na Figura 6.

No início da aquisição elétrica, foram realizados testes com a utilização de diferentes arranjos de

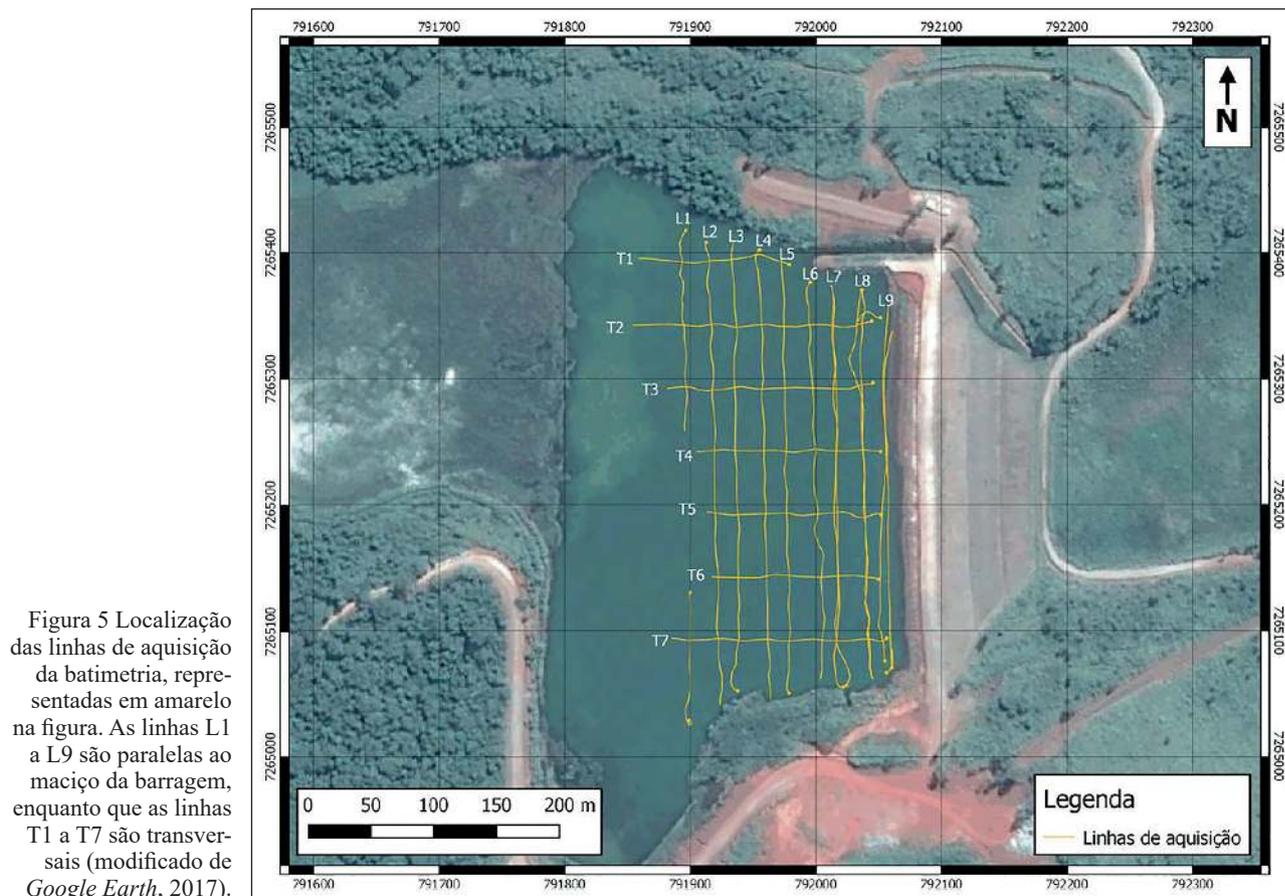


Figura 5 Localização das linhas de aquisição da batimetria, representadas em amarelo na figura. As linhas L1 a L9 são paralelas ao maciço da barragem, enquanto que as linhas T1 a T7 são transversais (modificado de Google Earth, 2017).

eletrodos, de modo a determinar o melhor modo para as aquisições elétricas. Os testes foram realizados ao longo da L01 com os arranjos Dipolo-Dipolo e Gradiente. O arranjo escolhido para o caminhar elétrico foi o Dipolo-Dipolo, por apresentar melhor relação sinal-ruído e satisfatória relação profundidade de investigação versus resolução lateral. Ou seja, o estudo da variação lateral do parâmetro físico pôde ser efetuado em vários níveis de profundidade, obtendo-se uma caracterização do meio, em subsuperfície, tanto horizontalmente como verticalmente.

Em função dos resultados obtidos nas linhas L01 a L08, foi realizada uma nova campanha geofísica para cobrir a ombreira esquerda da barragem. Na nova aquisição, foram realizados 6 perfis elétricos (L09 até L14), com igual espaçamento de 3 metros entre os eletrodos. Nesta etapa, houve 1.116 metros de aquisição de dados de eletrorresistividade. A localização das novas linhas está representada em cor azul na Figura 6.

O valor da resistividade aparente ( $\text{ohm.m}$ ) foi calculado levando-se em consideração o fator geométrico ( $K$ ), que foi definido de acordo com o arranjo utilizado (Koefoed, 1979). Os equipamentos usados na aquisição geofísica foram duas unidades SAS 4000 da fabricante ABEM com configuração de 64 canais, composto de unidade de controle e unidade seletora. O software utilizado para processamento dos dados foi o Res2DInv versão 3.59 da Geotomo.

Após a aquisição dos dados elétricos, estes foram interpretados e integrados a fim de entender o comportamento eletrorresistivo do maciço da barragem. A interpretação ocorreu juntamente ao projeto de engenharia da B1, a fim de verificar se a resposta geofísica do maciço foi compatível com o material presente na localização das seções. Com esta verificação foi possível encontrar respostas elétricas incompatíveis com o substrato existente, que poderiam corresponder com eventuais falhas na estrutura da barragem.

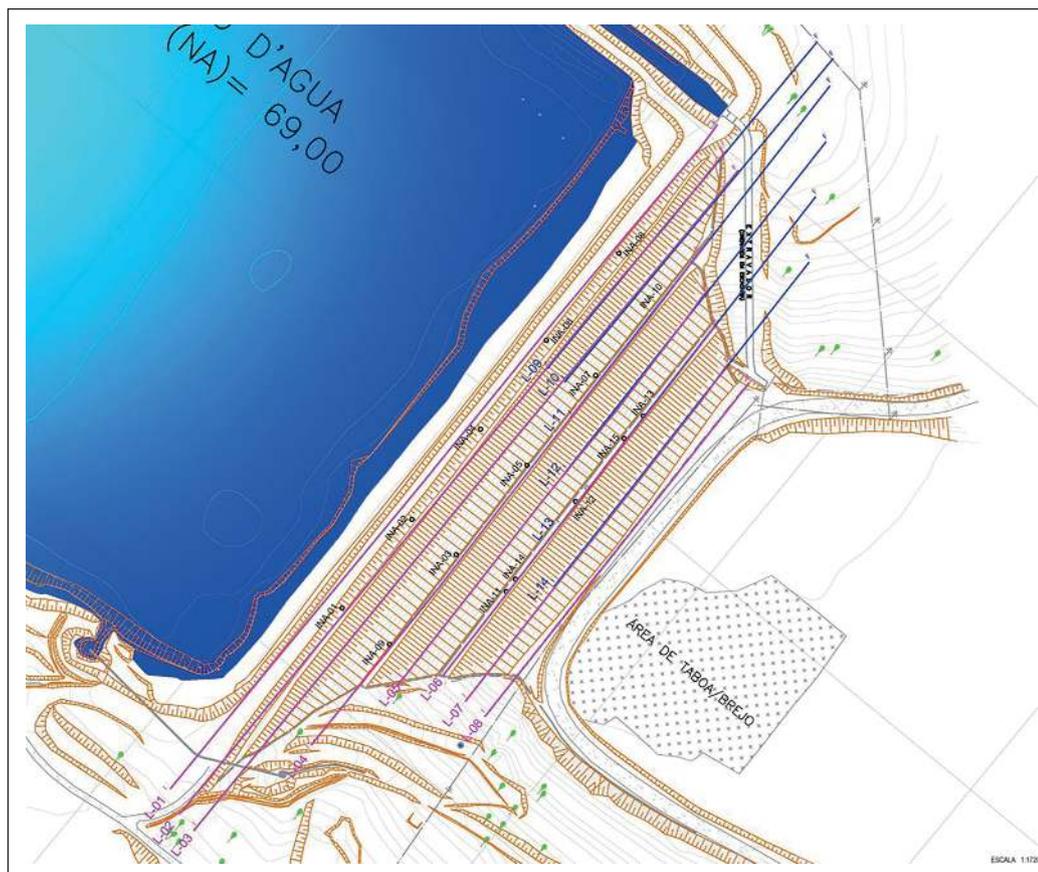


Figura 6 Localização das seções de eletrorresistividade (linhas em rosa e azul) paralelas ao eixo da barragem. As linhas em rosa, correspondem as linhas L01 a L08. No topo da crista da barragem é a L01, descendo sucessivamente até o pé da barragem chegando a linha L08, junto à área de brejo. As linhas azuis, correspondem à segunda fase de aquisição de seções de eletrorresistividade (L09 a L14), junto à ombreira esquerda. A linha mais ao topo da barragem é a L09, descendo sucessivamente até a L14.

## 5 Resultados

### 5.1 Batimetria

Após o processamento dos dados, mapas batimétricos foram confeccionados com o intuito de evidenciar a altura da lâmina d'água existente na área do reservatório a jusante do barramento.

Os resultados da batimetria mostram que o lago vem sendo preenchido formando um fundo bastante regular, com gradiente suave das áreas mais rasas a oeste para as áreas mais profundas, a nordeste, sendo as maiores profundidades encontradas próximo à barragem junto à ombreira esquerda (Figura 7). As profundidades máximas apresentam valores entre 4 e 5 metros. Porém, no restante do reservatório, as profundidades ficam entre 2 e 3 metros.

### 5.2 Eletrorresistividade

Os perfis levantados, L01 a L14, atingiram profundidades de 30 a 40 metros, e foram eficientes na detecção de anomalias de baixa e alta resistividade.

Nas seções L01 e L02, observa-se uma zona de baixa resistividade (ZBR), com valores abaixo de 84 ohm.m, da superfície até a altura das cotas 60 m e 65 m respectivamente. Isso pode ser observado na Figura 8, onde L01 está destacada.

As seções L03 a L05, apresentaram distribuições semelhantes de ZBR em relação às seções L01 e L02, fazendo uma transição entre estas e as seções L06 e L08; por isso não estão aqui destacadas.

Pode ser notado na Figura 8 que as seções L06 e L08 apresentam uma expressiva ZBR logo abaixo da elevação de 40 m, levando a crer que deva se estender para a região das ombreiras. A seção L07 apresentou resultados inconsistentes com seções adjacentes, como pode ser observado na Figura 8. Em razão disso, concluiu-se que houve problemas na aquisição elétrica, acarretando assim, no seu descarte.

Foram observadas nas seções L01 a L04 regiões de baixa resistividade tanto junto à ombreira direita bem como junto à ombreira esquerda, como é possível notar na L01 mostrada na Figura 8. Para

Caracterização de Barragens de Rejeito Usando Geofísica Rasa: Aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo

Roberto Albuquerque; Marco Antônio Braga; Lorena Andrade Oliveira;  
Leonardo Santana de Oliveira Dias; Luis Antônio Pinto Almeida; Arildo Henrique de Oliveira & Silvana Brandão

Figura 7 A Batimetria mostra que o lago é mais profundo próximo à barragem, principalmente junto à ombreira esquerda (modificado de Google Earth, 2017).

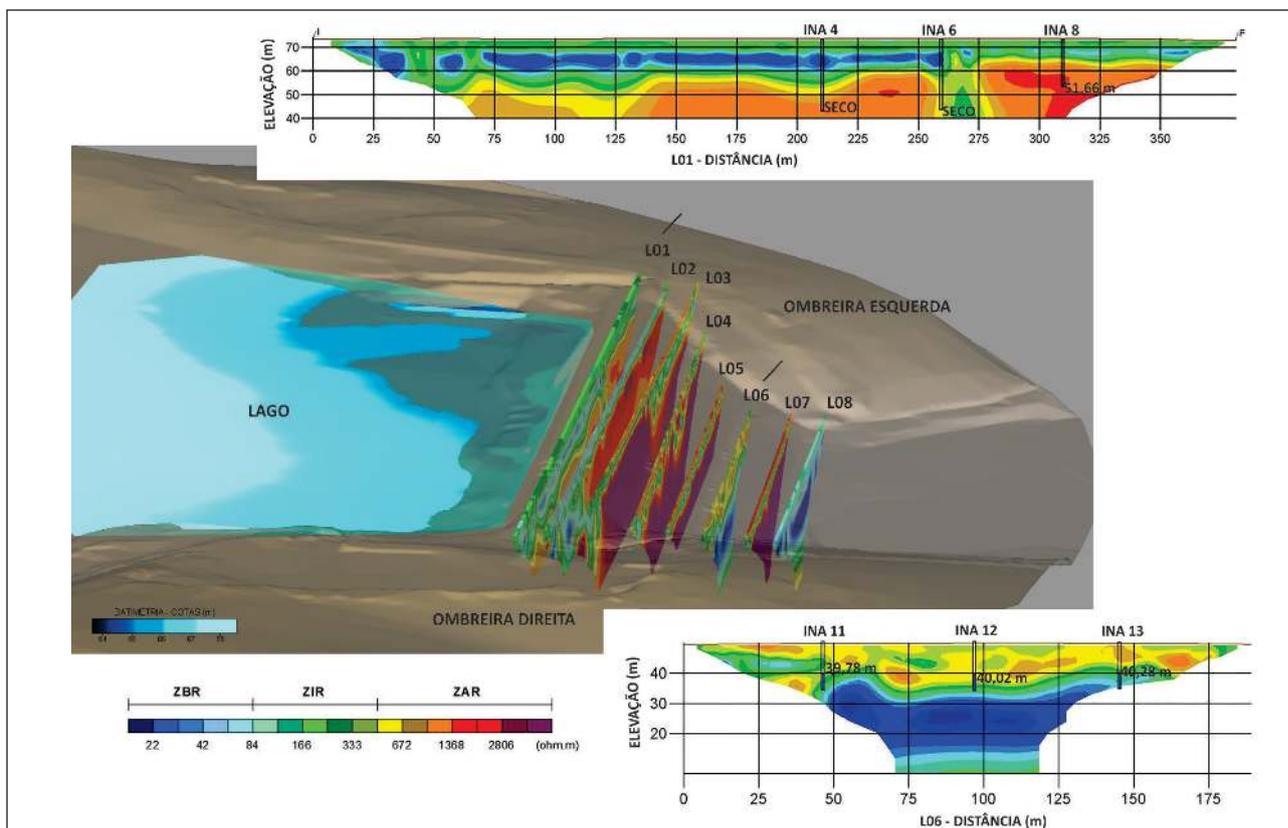
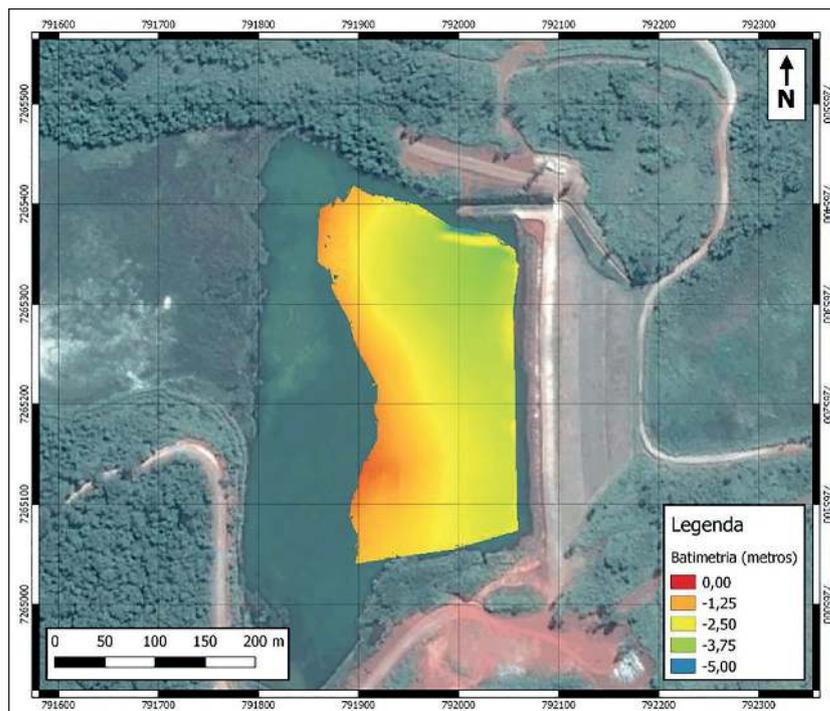


Figura 8 Seções de eletrorresistividade (L01 – L08) em perspectiva com modelo batimétrico, destacando as linhas L01 e L06. As seções L01 a L05, apresentam distribuição de zonas de resistividade similares, com ZBR próximas a superfície, e aumento progressivo da resistividade a medida que diminui a elevação. Nas linhas L06 e L08 há notável ZBR abaixo da cota de 40 m. A linha L07, apresentou resultados incoerentes com as demais seções.

melhor compreensão destas ZBR, uma nova campanha foi feita cobrindo a ombreira esquerda (Figura 6), resultando nas seções de L09 até a L14. Observam-se ZBR presente em todas as seções, indicando um provável caminho preferencial de água (Figura 9).

## 6 Discussão

O levantamento batimétrico forneceu informações conclusivas relacionados com a dinâmica de sedimentação do lago de rejeito. Os dados de batimetria mostram que o preenchimento da barragem vem ocorrendo de oeste para leste, com uma boa uniformidade, indicada pelo baixo gradiente nessa direção e pela ausência de perturbações morfológicas no substrato do lago. A água tem um baixo nível de turbidez indicando a eficácia da sedimentação.

Comparando os resultados obtidos com os dados do projeto de engenharia e de monitoramento da barragem, pode-se observar notável coerência com os resultados de eletrorresistividade. As ZBRs vistas nas seções L01 e L02 correspondem à região do aterro argiloso e do filtro de areia longitudinal ao eixo, como pode ser observado na Figura 3. O aterro argiloso, devido suas propriedades físicas, apresenta

naturalmente um teor de umidade bem mais elevado em comparação ao aterro de calcário observado na parte mais profunda destas seções.

Nas seções L06 e L08, a ZBR está coerente com os níveis de água observados nos INA's 11, 12 e 13, em torno de 40 m de elevação (Figura 8), sendo esta, provavelmente, já a cota do lençol freático, que aflora no brejo a jusante do pé da barragem, com cota pouco inferior a 39 m. Na seção L08 (Figura 8), a ZBR começa desde a superfície, mostrando que o lençol freático está praticamente aflorando.

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 mantidas durante as obras. São antigos canais de descarga extravasores, sendo preenchidos por um tapete drenante, formado por brita corrida e areia, que passaram a servir de drenos junto à ombreira esquerda (Figura 10). O final de um desses drenos, pode ser visto na caixa onde deságua o extravasor atual junto à ombreira esquerda (Figura 11).

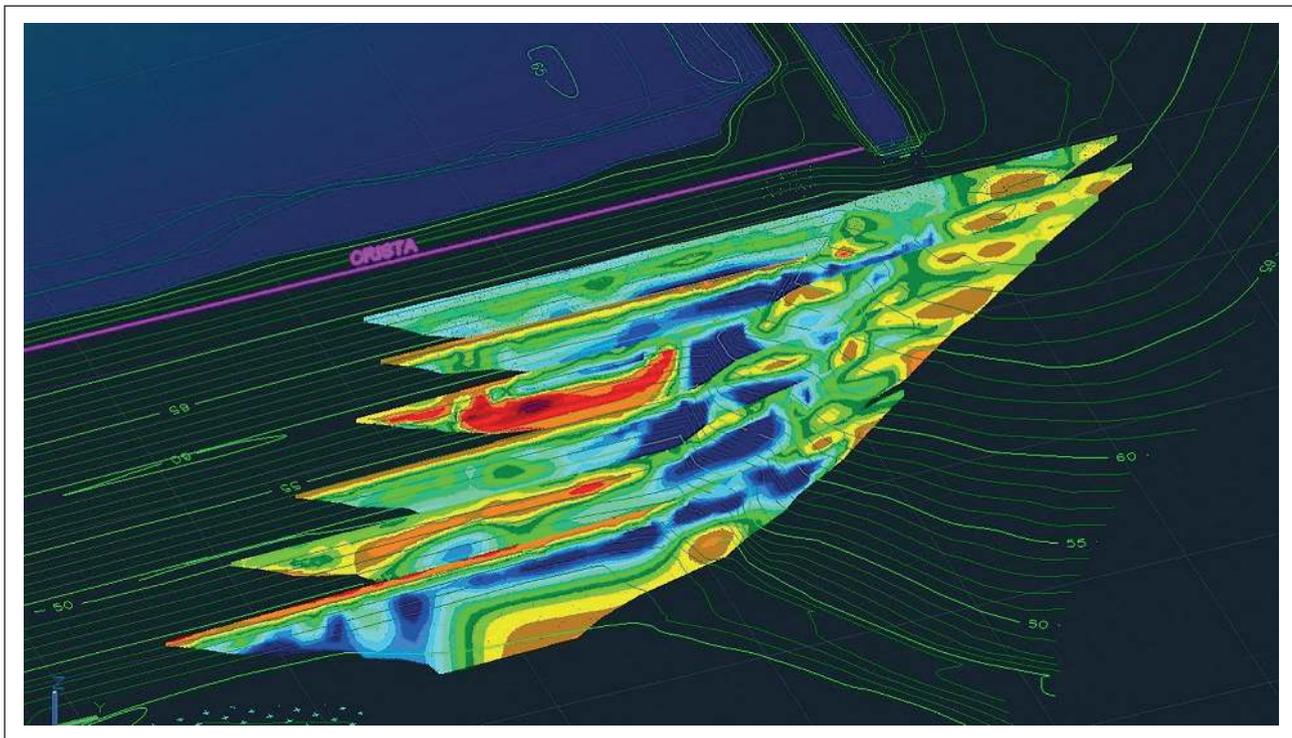


Figura 9 Seções de Eletrorresistividade de L09 até L14. Observam-se Zonas de Baixa Resistividade presente em todas as seções, indicando um provável caminho preferencial de água.

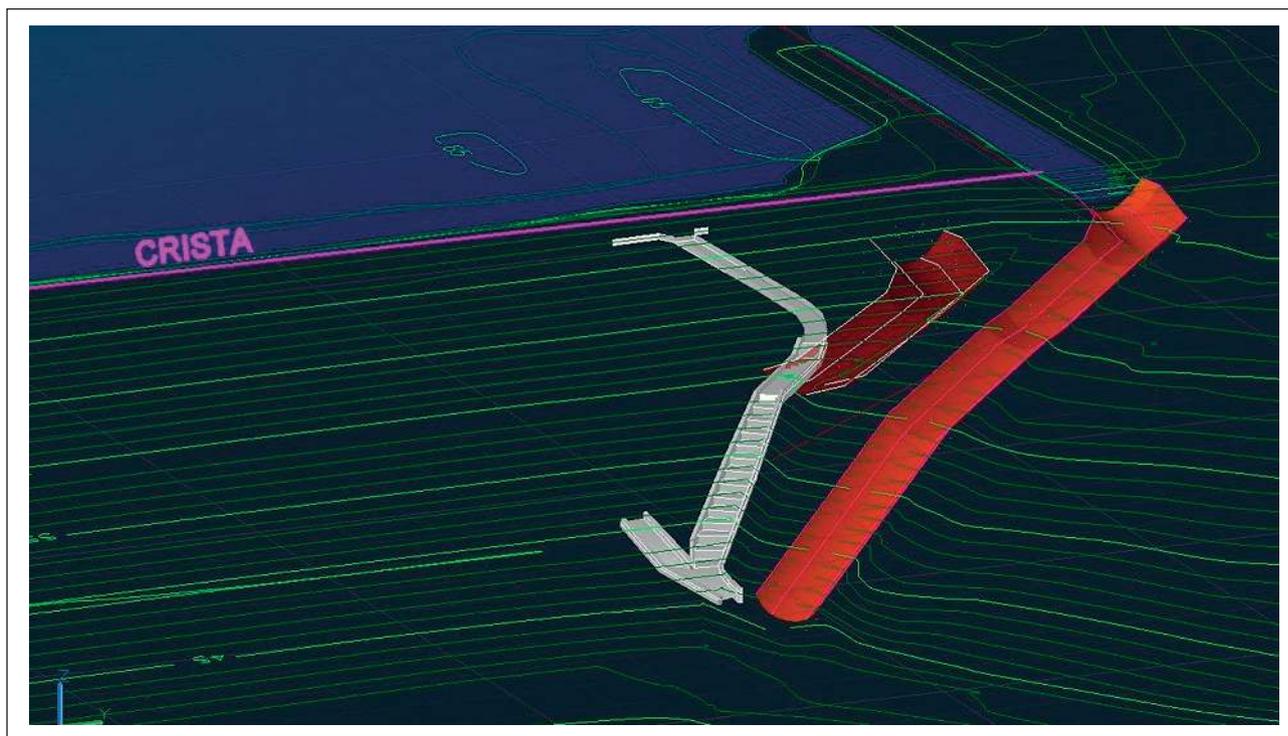


Figura 10 Estruturas de antigos canais extravasores que foram preenchidas com brita corrida e areia e mantidas como drenos junto à ombreira esquerda.



Figura 11 Água saindo de um dreno feito a partir de um antigo canal extravasor, desaguando na caixa do extravasor mais novo.

A Figura 12 mostra, em um modelo 3D do maciço da barragem B1, a localização das seções de eletrorresistividade.

É possível perceber que as ZBR coincidem com a localização dos antigos canais extravasores, demonstrando que, a alta porosidade do material em que foram preenchidas (brita corrida e areia), possibilita percolação de água, acarretando em zonas pouco resistivas nas seções elétricas.

## 7 Conclusão

Observa-se que os dados obtidos com a aplicação de Eletrorresistividade estão coerentes com as informações existentes sobre a estrutura do maciço, estando em harmonia com as medições dos instrumentos que monitoram a barragem. A geofísica, complementando a instrumentação, dá uma visão ampla sobre a distribuição de umidade e/ou água no maciço, mostrando o seu comportamento em trechos que não são cobertos pela instrumentação.

A Geofísica pode fornecer uma rica informação que deve levar os profissionais que trabalham

no monitoramento e em avaliação de estabilidade de barragens de rejeitos a refinarem as suas análises a partir de uma visão mais abrangente dessas estruturas tão importantes.

## 8 Agradecimentos

Agradecemos a Mosaic Fertilizantes por financiar este trabalho e permitir o acesso aos dados da Barragem B1.

## 9 Referências

- Anterrieu, O.; Chouteau, M. & Aubertin, M. 2010. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69: 533-548.
- 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*. Universidade Estadual Paulista, Tese de livre-docência, 121p.
- Camarero, P.L. & Moreira, C.A. 2017. Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique. *REM - International Engineering Journal*, 70(1): 47-52.
- Campbell, D.L. & Fitterman, D.V. 2000. *Geoelectrical Methods*

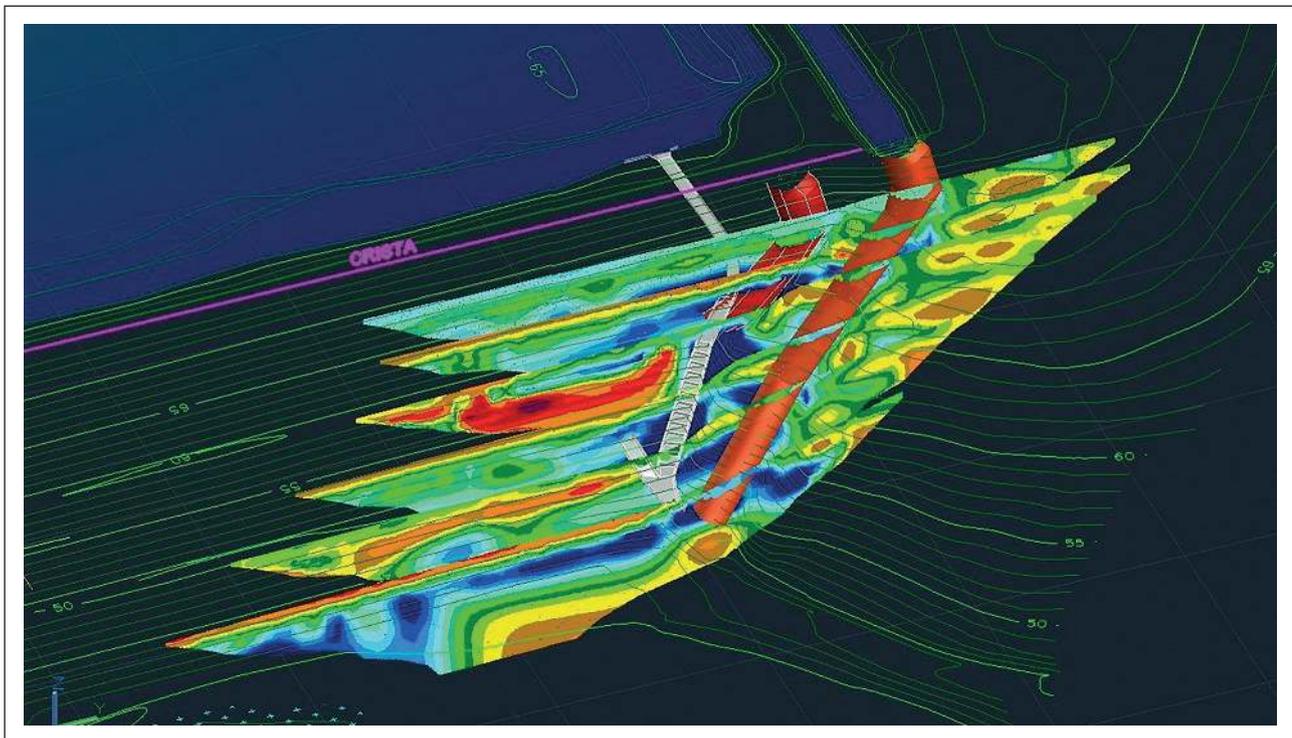


Figura 12 Seções de eletrorresistividade sobrepostas no modelo 3D do maciço da barragem B1. As ZBR coincidem com a localização dos antigos canais extravasores, permitindo a associação das ZBR com a água percolante nessas estruturas.

## Caracterização de Barragens de Rejeito Usando Geofísica Rasa: Aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo

Roberto Albuquerque; Marco Antônio Braga; Lorena Andrade Oliveira;

Leonardo Santana de Oliveira Dias; Luis Antônio Pinto Almeida; Arildo Henrique de Oliveira & Silvana Brandão

- for Investigating Mine Dumps. *In: International Conference on Acid Rock Drainage*, 5, Lilleton, 2000. Proceedings, Lilleton, SME, p. 1513-1524.
- ESRI 2017. World Imagery Basemap – ArcGis (Internet) *In: https://www.arcgis.com*, ESRI - Environmental Systems Research Institute, Redlands, California.
- Geoconsultoria 2017. *Manual de Operação da Barragem B1*, vol. 1. 18 p. (Relatório Técnico SR25-RT-01, Rev. 1), São Paulo, Geoconsultoria.
- Johansson, S. 1997. *Seepage Monitoring in Embankment Dams*. Royal Institute of Technology Stockholm, Department of Civil and Environmental Engineering, Doctoral Thesis, 50p.
- Koefoed, O. 1979. *Geosounding Principles Resistivity Sounding Measurements*, vol.1. Amsterdam, Elsevier Science Publishing Company. 276 p.
- LEME Engenharia 2016. *Relatório de Inspeção de Segurança Regular*, Revisão 0, São Paulo, LEME Engenharia. 41 p.
- Loke, M.H.; Chambers, J.E.; Rucker, D.F.; Kuras, O. & Wilkinson, P.B. 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95: 135-156.
- Mainali, G. 2006. *Monitoring of Tailings Dams with Geophysical Methods*. Luleå University of Technology, Division of Ore Geology and Applied Geophysics, Licentiate Thesis, 74 p.
- Martini, R.J.; Caetano, T.R.; Santos, H.A. & Aranha, P.R.A. 2016. Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios: uma aplicação do método GPR. *Revista Ambiente & Água*, 11(4): 878-890.
- Miguens, A.P. 1996. Instrumentos Náuticos. *In: MIGUENS, A P. (ed.). Navegação: a ciência e a arte. v. 1 – Navegação Costeira, Estimadas e em Águas Restritas*. Rio de Janeiro: DHN, Brasil, cap. 11 p. 227-274.
- Panthulu, T.V.C.; Krishnaiah, C. & Shirke, J.M. 2001. Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. *Engineering Geology*, 59: 281-295
- Poisson, J.; Chouteau, M.; Aubertin, M. & Campos, D. 2009. Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. *Journal of Applied Geophysics*, 67: 179-192.
- Sjö Dahl, P.T.; Dahlin, S.; Johansson, S. & Loke, M.H. 2005. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. *Environmental Geology*, 49: 267-273.
- Sjö Dahl, P.T.; Dahlin, S.; Johansson, S. & Loke, M.H. 2008. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics*, 65: 155-164.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.A. 1990. Applied geophysics, 2nd edition: Cambridge Univ. Press, 792 p.