

ANÁLISE DE FLUXO NO INTERIOR DE BARRAGENS DE TERRA A PARTIR DO MÉTODO DO POTENCIAL ESPONTÂNEO (SP)

Leonides Guireli Netto ¹; Walter Malagutti Filho²; Renata Augusta Sampaio Paes³; Marina Mendes Coura⁴

Resumo – A aplicação de métodos geoeletricos, como a polarização induzida (IP), a eletroresistividade e o potencial espontâneo, apresenta uma importante ferramenta indireta de estudo em diversas áreas da geologia, como a mineração, geotecnia e a geologia ambiental. O presente trabalho discorre sobre os resultados da aplicação do método do potencial espontâneo (SP) em barragens de terra de pequeno porte nas cidades de Cordeirópolis e Ipeúna, ambas no Estado de São Paulo. Os estudos de Engenharia de Barragens se intensificaram no final do século XX, graças ao alarmante número de casos de rompimento de barramentos. No Brasil, as barragens de pequeno porte ainda são maioria, cerca de 90% do total. Este trabalho apresenta resultados de levantamentos do potencial espontâneo em duas barragens de terra de pequeno porte, analisando a influência de estruturas clássicas de barragens, como vertedouros, sobre o método. Foram realizadas 3 linhas de 78 metros cada, com espaçamento de 2 metros entre os eletrodos na barragem de Cordeirópolis e 3 linhas de 122 metros cada, com espaçamento de 2 metros entre os eletrodos na barragem de Ipeúna. Em ambas as coletas foi utilizada a Técnica dos Potenciais (ou base fixa). Os dados coletados foram trabalhados em mapas 2D de potencial espontâneo e em perfis 3D, que permitiram identificar as zonas com maiores e menores valores de diferença de potencial, o fluxo preferencial dos fluidos subsuperficiais nas áreas e possíveis problemas na estrutura da barragem, que poderiam afetar a integridade física da estrutura.

Abstract – The application of geoelectric methods, such as induced polarization (IP), the electroresistance and the spontaneous potential (SP), presents an important indirect study tool in several areas of geology, such as mining, geotechnics and environmental geology. The present work deals with the results of the application of the spontaneous potential method (SP) in small earth dams in the cities of Cordeirópolis and Ipeúna, both in the State of São Paulo. The studies of Engineering of Dams intensified in the end of century XX, due to alarming numbers of dam disruptions. In Brazil, small dams are still the majority, around 90% of the total. This work presents results of surveys of the spontaneous potential in two small dams, analyzing the influence of classical dams structures, such as spillways, on the method. Three lines of 78 meters each were made, with a spacing of 2 meters between the electrodes in the Cordeirópolis dam and three lines of 122 meters each, spaced 2 meters between the electrodes in the Ipeúna dam. In both collections the Potential Technique (or fixed base) was used. The collected data were worked on 2D maps of spontaneous potential and 3D profiles, which allowed to identify the zones with greater and smaller values of potential difference, preferential flow of the subsurface fluids in the areas and possible problems in the structure of the dam, that could affect the physical integrity of the structure.

Palavras-Chave – Potencial espontâneo (SP). Barragens de terra. Engenharia de barragens.

¹ Geól., Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, (19) 99655-7366, netto.guireli@uol.com.br

² Geól., PhD Professor Titular, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, (19) 3526-9309, malaguti@rc.unesp.br

³ Geól., Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, (19) 98454-4445, renataspaes@yahoo.com.br

⁴ Geól., Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, (19) 98316-7287 marina.mcoura@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Barragens são caracterizadas como elementos estruturais, construídas de maneira transversal à direção de escoamento de um curso d'água, criando-se um reservatório artificial de acumulação de água. Estes podem ser divididos em três tipos em relação ao material utilizado: de terra, concreto e enrocamento. O presente projeto apresenta foco na integridade física de barragens de terra de pequeno porte localizadas em Ipeúna e Cordeirópolis, ambas no Estado de São Paulo.

De acordo com Souza (2013), as barragens possuem papel crucial no desenvolvimento das civilizações, devido, principalmente, a necessidade de armazenar água. Atualmente, as barragens de terra são o tipo mais comum de barramentos de pequeno porte e, mesmo com os avanços tecnológicos, ainda possuem problemas estruturais (CULLEN, 1964).

Dados da Agência Nacional de Águas (ANA) mostram que entre os anos de 2002 e 2010 foram registrados 800 incidentes com barragens, em sua maioria devido a problemas de infiltração e erosão interna.

No segundo semestre de 2015, uma das três barragens de rejeito da mineradora Samarco rompeu-se, dizimando praticamente todo o município de Bento Rodrigues – MG. Segundo dados dos próprios diretores da empresa, aproximadamente 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram liberados no meio ambiente, atingindo áreas a até 100 km de distância (IBAMA, 2015).

No Brasil, segundo Oscar Moraes, diretor da Agência Nacional de Águas, a grande maioria dos recursos são direcionados para pesquisas geotécnicas e elaboração de projetos técnicos em barragens de médio a grande porte. Porém, encontram-se 10 mil barragens de médio a grande porte no território nacional, em um total de 200 mil barragens.

No presente estudo foi analisado a integridade física de duas barragens de pequeno porte através do método do potencial espontâneo, afim de comparar com outros métodos geotécnicos e geofísicos que também foram realizados na área, como o imageamento elétrico e a sísmica de refração, buscando encontrar zonas de fraquezas ou possíveis áreas de percolação de água na estrutura do barramento.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do projeto foi aplicar o método do potencial espontâneo em duas barragens de terra, de pequeno porte, com a finalidade de correlacionar eventuais anomalias, com direções preferenciais de fluxo e zonas de infiltração de água, que poderiam comprometer a integridade físicas das mesmas.

Por fim, buscou-se comparar os resultados obtidos nas duas barragens estudadas e interpretar a influência de barramentos construídos com litologias distintas nos valores do potencial espontâneo coletados.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Barragens de terra de pequeno porte: Ipeúna e Cordeirópolis (SP)

A área de estudo contempla várias barragens de terra no interior do Estado de São Paulo, das quais duas foram escolhidas para essa pesquisa. A primeira encontra-se na zona rural do município de Ipeúna – SP a 195 km da capital, localizada mais precisamente no Pesqueiro “Quilombo”, enquanto que a segunda se encontra no município de Cordeirópolis – SP a 160 km da capital do Estado, com fácil acesso pela Rodovia Washington Luís SP-310, próximo ao Km 156 no sentido Sul (Figura 2.1).

A escolha das barragens foi feita levando algumas características em consideração, como o tamanho das barragens parecidos (ambas de pequeno porte), diferença entre a litologia que compõe a estrutura do barramento, afim de se comparar uma possível influência do material nos valores obtidos, além de ambas as barragens terem um fácil acesso.



Figura 1. Localização da área de estudo.

2.2 Caracterização física e geotécnica das barragens

A escolha das barragens não foi feita sem critérios. Primeiramente, levou-se em consideração o material de construção das barragens, embora ambas sendo barragens de terra existem diferenças na litologia do material utilizado no corpo da barragem e era desejado essa diferenciação uma vez que buscava-se notar a influência do mesmo no resultado do método do potencial espontâneo.

A barragem localizada em Cordeirópolis – SP apresenta uma litologia bastante presente na região. Blocos residuais da Formação Serra Geral encontram-se ao longo do barramento, resultando em valores elevados de diferença de potencial. O solo laterítico argiloso marrom avermelhado/amarelado é típico da alteração de rochas básicas e esperava-se obter valores de d.d.p altos nesse ponto, que de fato ocorreu.

Em contrapartida, a barragem localizada em Ipeúna – SP apresenta um material bem diferente de solo laterítico argiloso em sua composição. Por se tratar de um barramento construído em uma área a qual se encontram afloramentos do Grupo Itararé, o material utilizado foi um diamictito argiloso bastante compactado e em sua maioria bastante seco, além de camada de siltito de cor cinza claro também característico da região.

Porém, ambas as barragens são construídas através da compactação do material, sem a instalação de enrocamento para aumentar a impermeabilidade e proteção da estrutura. Essa maneira simples de construção talvez seja a realidade da grande maioria das barragens de terra de pequeno porte da região.

Em relação as condições geotécnicas, a barragem de Cordeirópolis – SP possui aproximadamente de 3 a 4 metros de altura, com uma crista de 5 metros de largura e comprimento de 70 metros. O barramento é responsável pelo armazenamento de água para irrigação de plantações de cana de açúcar presente no local.

Já a barragem de Ipeúna – SP, por sua vez, apresenta um comprimento maior, cerca de 110 metros de comprimento, com largura da crista de 4 metros aproximadamente e altura de 3 a 4 metros. Outra característica própria é a presença de armazenamento de água tanto a jusante como a montante. Por se tratar de um pesqueiro, a barragem foi instalada com o intuito de represar água na cota topográfica mais alta e, no caso do reservatório utilizado para a criação de

peixes (mais baixo topograficamente) necessitar de reabastecimento, o tanque de cima poderia suprir essa necessidade não comprometendo o funcionamento do estabelecimento.

Ambas as barragens possuem vertedouro de superfície. No caso da barragem de Cordeirópolis, o vertedouro era retangular e encontrava-se vazio, o que foi comprovado pelo método. Já na barragem de Ipeúna, o reservatório localizado na cota superior possuía um vertedouro cilíndrico vertical, que controlava o fluxo d'água redirecionando o caminho da água até o reservatório localizado mais abaixo canalizando o fluxo d'água por dentro do corpo da barragem, que também foi comprovado pelo método do potencial espontâneo.

2.3 Caracterização geológica

A área de estudo encontra-se inserida na Bacia Sedimentar do Paraná, a qual está localizada no centro-leste da América do Sul, cobrindo cerca de 1.700.000km² e territorialmente inclui porções do Paraguai, Argentina, Uruguai e Brasil.

Classifica-se como uma bacia intracratônica extensa estabelecida sobre a Placa Sul-Americana. Em território brasileiro, situa-se em grande parte na porção meridional ocupando aproximadamente 1.000.000km², sendo 160.000km² no Estado de São Paulo, e estendendo-se para a Argentina, Uruguai e Paraguai (SCHNEIDER et al. 1974 apud ZAINÉ, 1994).

2.3.1 – Caracterização geológica local

2.3.2 – Barragem de Cordeirópolis (SP)

Em Cordeirópolis o barramento encontra-se em litologia clássica da Formação Serra Geral.

A estrutura da barragem apresenta um solo laterítico argiloso com uma coloração marrom amarelado bem característico oriundo da alteração de rochas básicas, em alguns casos os blocos apresentam esfoliação esferoidal (Figura 2.2.2).

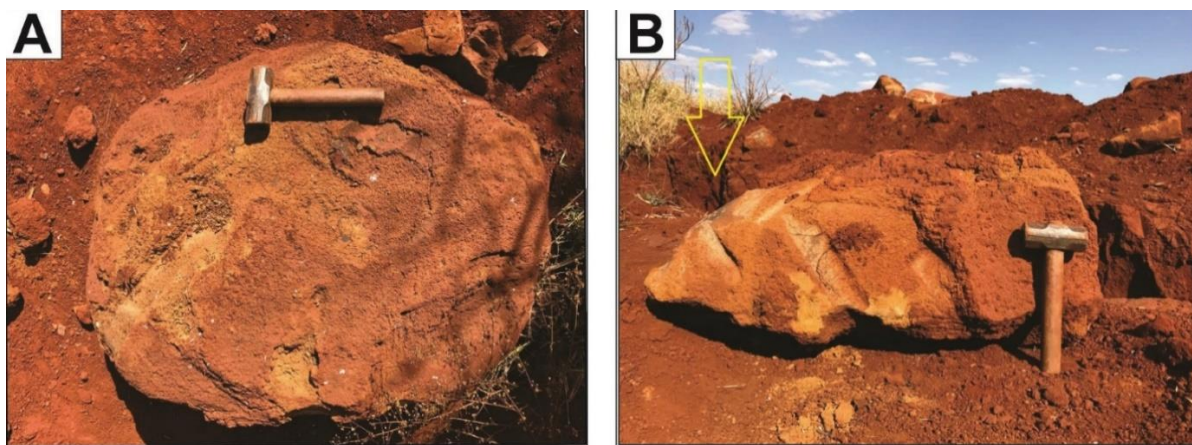


Figura 2.2.2. a) Bloco de basalto sob forte processo de alteração no entorno da barragem; b) Bloco de basalto alterado próximo a ravina (apontada pela seta em amarelo).

2.2.3 – Barragem de Ipeúna (SP)

A barragem de Ipeúna apresenta litologia distinta da barragem de Cordeirópolis, sendo este um dos motivos para a sua escolha. Enquanto na barragem de Cordeirópolis encontram-se rochas básicas na estrutura do barramento, na barragem de Ipeúna é possível identificar afloramentos característicos do Grupo Itararé (Figura 2.2.3).

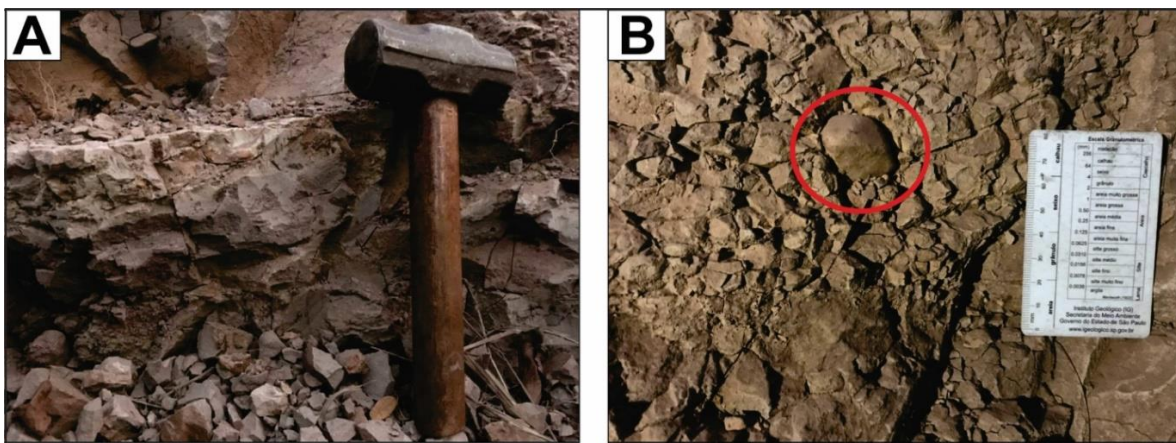


Figura 2.2.3. (A) Afloramento de beira de estrada mostrando um diamictito argiloso; (B) Grânulo de diamictito marcado pelo círculo em vermelho.

3 AQUISIÇÃO DOS DADOS

A aquisição de dados de SP ocorreu em dois dias em cada barragem, totalizando quatro dias de trabalho de campo. O primeiro dia utilizado para preparar as linhas de ensaio, abrindo pequenas covas de 2 em 2 metros para facilitar a aquisição de dados pelo milivoltímetro, já que no caso do método do SP é necessário tomar esse cuidado para prevenir eventuais ruídos que podem atrapalhar a veracidade dos dados. Por fim, o segundo dia foi focado na coleta dos dados com o uso dos equipamentos.

Em ambas as barragens se realizou a coleta de dados ao longo de três linhas dispostas paralelamente e com espaçamento de dois metros entre si. Em relação aos eletrodos, utilizaram-se dois, sendo um utilizado como eletrodo referência (fixo) e o outro como eletrodo itinerante, realizando as medidas a cada dois metros de distância.

3.1 – Coleta de dados na barragem de Cordeirópolis (SP)

No segundo dia de trabalho na barragem de Cordeirópolis foram levantados 234 metros de dados do potencial espontâneo, divididos em três linhas dispostas paralelamente a crista da barragem e sua região de maior alongamento. Assim, cada linha possuía 78 metros de comprimento, contendo no total 39 eletrodos distribuídos entre si a cada 2 metros de distância (Figura 3.1).



Figura 3.1. Localização das linhas de SP na barragem de Cordeirópolis – SP.

3.2 – Coleta de dados na barragem de Ipeúna (SP)

No segundo dia de trabalho na barragem de Ipeúna e último dia de coleta de dados foram adquiridos 366 metros de dados do potencial espontâneo, divididos em três linhas dispostas paralelamente a crista da barragem e sua região de maior alongamento. Assim, cada linha possuía 122 metros de comprimento, contendo no total 61 eletrodos distribuídos entre si a cada 2 metros de distância (Figura 3.2).



Figura 3.2. Esquema de localização das linhas de SP na barragem de Ipeúna – SP.

4 RESULTADOS

Os dados do potencial espontâneo coletados em dois dias de trabalho de campo foram processados de maneira separada. Foram gerados um mapa para cada barragem por meio da utilização do programa *Surfer 9 (Golden Software Inc.)* com o intuito de gerar um mapa de SP.

No mapa de SP busca encontrar um fluxo principal de sentido da água subterrânea, anomalias na estrutura da barragem e/ou ainda um fluxo anômalo, muitas vezes, indicativo de infiltração no corpo do barramento.

4.1 Resultados barragem de Cordeirópolis (SP)

Na figura 4.1 é apresentado o mapa do potencial espontâneo resultado da combinação das 3 linhas de 78 metros cada. As primeiras impressões que chamam a atenção são os altos valores positivos obtidos na porção sul do barramento, região oposta a qual ficou fixada o eletrodo base e, portanto, por onde terminaram todas as linhas.

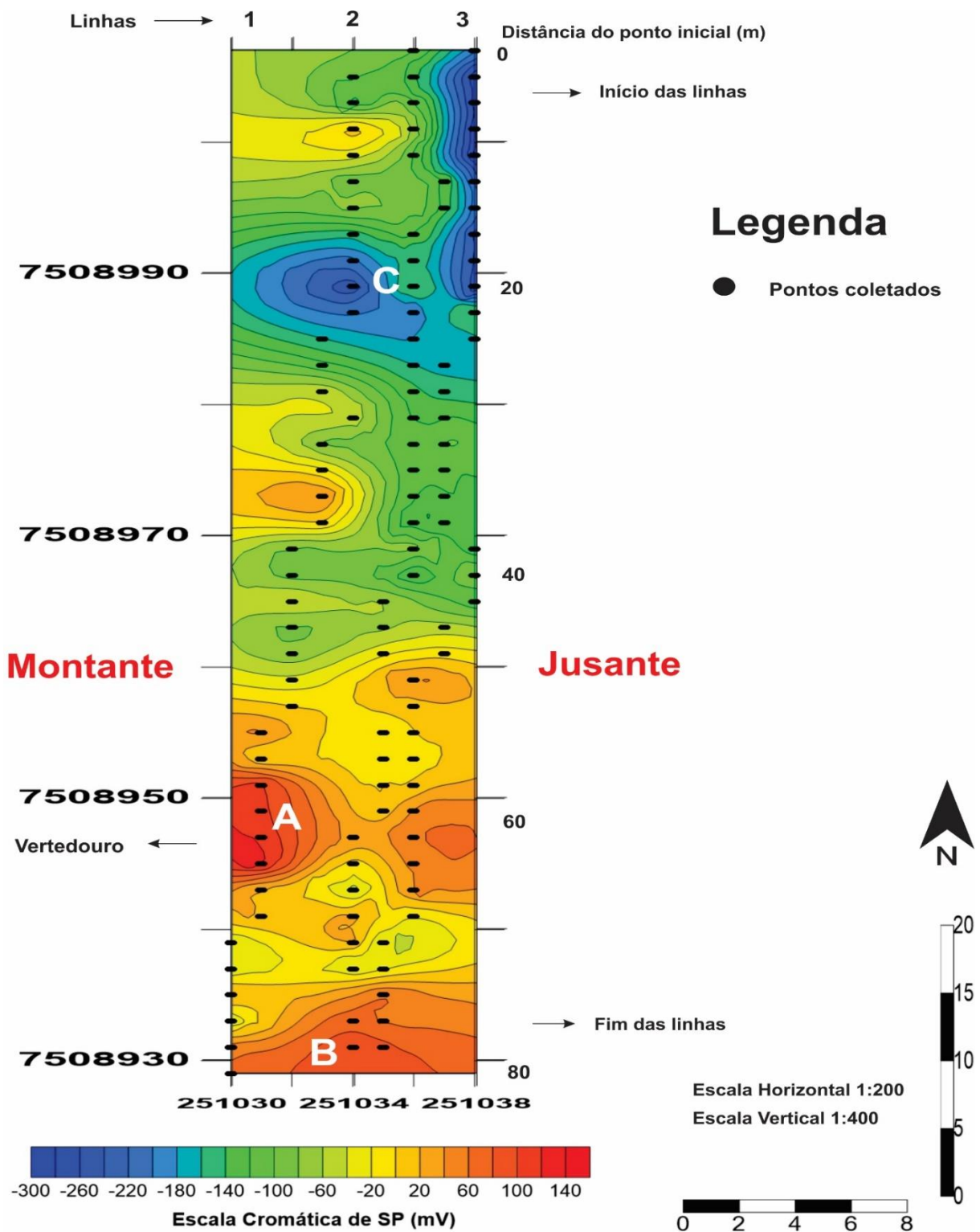


Figura 4.1. Mapa do potencial espontâneo da barragem de Cordeirópolis (SP)

4.2 Resultados barragem de Ipeúna (SP)

A fim de padronizar a coleta de dados, na barragem de Ipeúna também foi estabelecido o espaçamento de 2 metros entre as linhas do potencial espontâneo. Estas possuem 122 metros de comprimento e iniciaram-se ao Norte caminhando para Sul. Assim, em cada linha foram dispostos 61 eletrodos espaçados a cada 2 metros.

Na figura 4.2 é apresentado o mapa do potencial espontâneo resultado da combinação das três linhas de 122 metros cada. No barramento de Ipeúna, por se tratar de uma barragem que represa água em seus dois lados, chama atenção um forte traço de valores negativos de d.d.p na linha 1 entre os pontos de 50 a 100 metros a partir do ponto inicial (Ponto A na Figura 4.2).

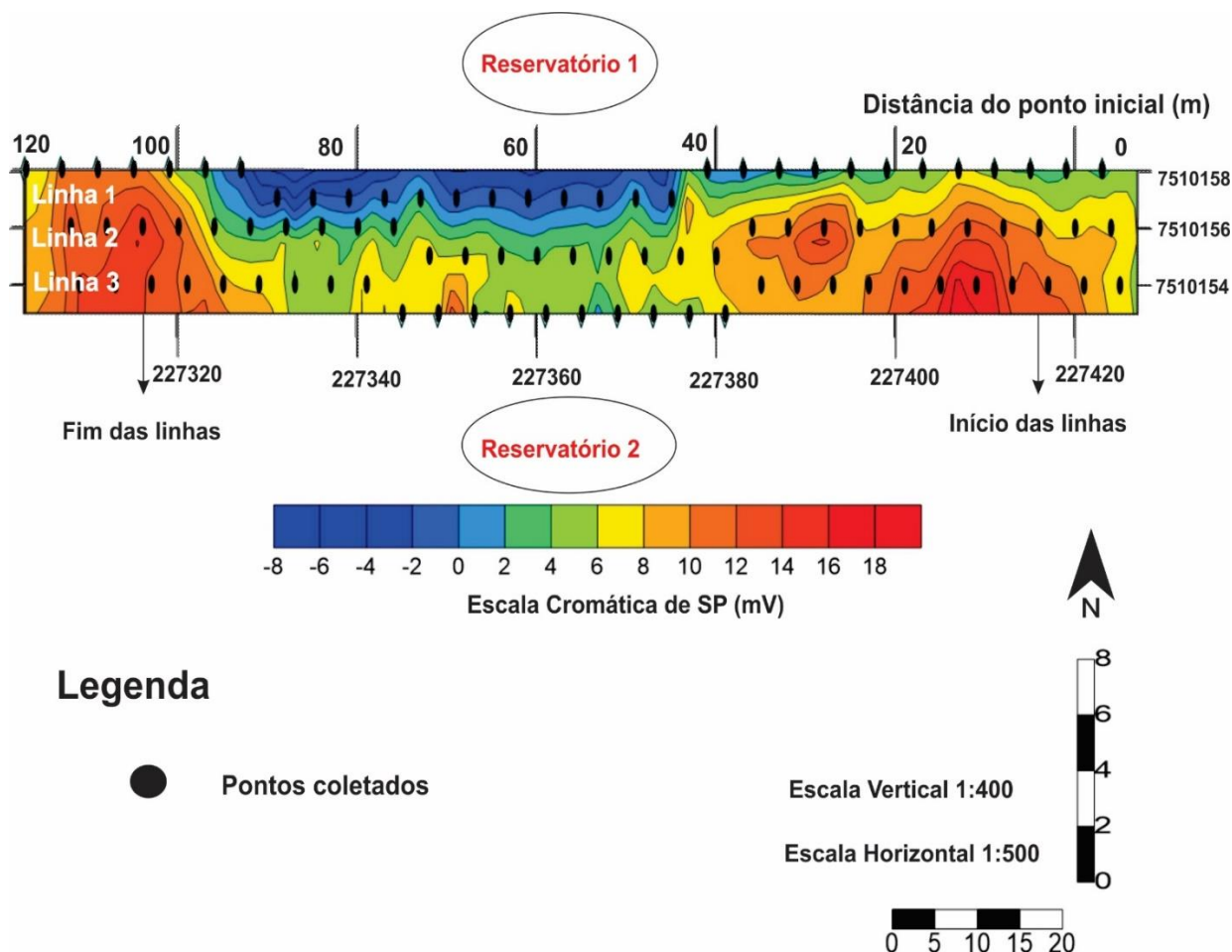


Figura 4.2. Mapa do potencial espontâneo na barragem de Ipeúna (SP).

5 CONCLUSÕES

Os recentes rompimentos de barragens no Brasil ligaram um alerta sobre a necessidade de investir mais em estudos de barragens, sejam estas de grande porte ou menor porte. Alinhado a esse pensamento, os métodos geoeletricos e geofísicos podem fornecer suporte durante a fase de construção da obra e/ou durante a fase de monitoramento, analisando se a integridade física da estrutura permanece dentro dos parâmetros mesmo com o passar do tempo.

Sabe-se que a grande maioria das barragens construídas no país são de terra e pequeno porte, semelhantes as duas barragens analisadas no presente trabalho. Porém, a utilização do método do potencial espontâneo não se restringe somente as barragens com estas dimensões.

Os resultados obtidos mostraram a grande aplicabilidade do método do potencial espontâneo na área da geologia de engenharia, como é o caso das barragens, e deixou bem claro que este método pode ser utilizado em conjunto com outros métodos geoeletricos e/ou geofísicos, como eletrorresistividade, polarização induzida e sísmica.

A aplicação do método do potencial espontâneo resultou em dados bem satisfatórios, possibilitando identificar um possível processo de erosão interna (*piping*) na barragem de Cordeirópolis e outro possível processo de infiltração na barragem de Ipeúna, ambos os casos poderiam ser confirmados com certeza caso fossem utilizados outros métodos em conjunto.

Outra informação que foi possível coletar com a aplicação do método do potencial espontâneo é a direção de fluxo preferencial dos fluidos subsuperficiais na área, podendo localizar o fluxo d'água indesejado, uma vez que uma percolação de água na estrutura de um barramento seja ele de terra ou concreto pode comprometer toda a integridade física da obra.

Além do método utilizado se mostrar bastante útil e eficaz no estudo de barragens, o método do potencial espontâneo apresenta outras vantagens que devem ser levadas em consideração. A primeira delas é o custo de operação, já que métodos geoeletricos, como eletrorresistividade, magnetometria e o potencial espontâneo apresentam baixo custo. A segunda é o fato do método ser de operação simples, visto que o manuseio do milivoltímetro é bastante intuitivo e prático.

Portanto, ficou clara a importância do uso da geofísica como método indireto de avaliação da integridade física de barragens, tanto na fase de construção da obra e também como mecanismo de acompanhamento e manutenção da estrutura de corpos de barragem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa, e ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" (UNESP) pelo equipamentos e laboratórios, bem como os professores Drs. César Augusto Moreira e João Carlos Dourado pelo suporte durante toda a etapa do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ARTHUR, H. G. **Design of small dams**. 2. Ed. A Water Resources Technical Publication – United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. 1973.
- CAMARERO, P.L.; **Análise de integridade física de barragens de terra a partir da integração do método geofísico da eletrorresistividade com ensaios geotécnicos**, Dissertação de Mestrado, UNESP, 2016.
- CETESB. **Água Subterrânea e Poços Tubulares**. 3. Ed. São Paulo 1978
- CHIOSSI, NIVALDO; **Geologia de Engenharia**. 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- CULLEN, A. H. **Rios Prisioneiros: A História das Barragens**. Belo Horizonte: Ed. Editora Itatiaia Limitada de Belo Horizonte, 1964.
- DUARTE J.M.B., Torres H.A., Ramos H.G.C. & Lemes, M.R.S. 2003. **Efeito de uma usina hidrelétrica sobre a mortalidade de cervos-do-pantanal (*blastocerus dichotomus*)**. Em Duarte J.M.B. Projeto cervo-do-pantanal de Porto Primavera. Relatório Final. CD-Rom UNESP/Jaboticabal.
- GALLAS, J. D. F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. 2000. 174f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2000.
- GOOGLE MAPS. [Localização da área de estudo]. 2015. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acesso em: 12 jul. 2017.
- IBAMA. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/publicadas/onda-de-rejeitos-da-samarcoatingiu-663-km-de-rios-e-devastou-1469-hectares-de-terras>>. Acesso em 14/12/2015.
- McNEILL, J. D. **Electrical conductivity of soils and rocks**. [s.l.]. Geonics Limited. Technical Note TN-5. 1980. 22pp.
- McCully, P. 2001. **Silenced rivers: the ecology and politics of large dams**. London: Zed Books