

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

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

Leonides Guireli Netto

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Rio Claro (SP)

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

LEONIDES GUIRELI NETTO

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

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,  
da Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Geólogo.

Rio Claro - SP  
2017

624.151 Guireli Netto, Leonides  
G965a Análise de fluxo no interior de barragens de terra a partir  
do método do potencial espontâneo (SP) / Leonides Guireli  
Netto. - Rio Claro, 2017  
88 f. : il., figs., tabs., quadros

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade  
Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Walter Malagutti Filho

1. Geologia de engenharia. 2. Potencial espontâneo (SP).  
3. Barragens de terra de pequeno porte. 4. Engenharia de  
barragens. 5. Fluxo no interior de barragens. I. Título.

LEONIDES GUIRELI NETTO

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

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,  
da Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Geólogo.

Comissão Examinadora

Walter Malagutti Filho (orientador)

César Augusto Moreira

João Carlos Dourado

Rio Claro, 06 de dezembro de 2017.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

Aos meus avôs, Leonides e Lino (*in memoriam*), os quais me guiam onde quer que estejam.

## AGRADECIMENTOS

Essa dissertação é resultado de um trabalho em conjunto, uma parceria. Eu, sozinho, jamais conseguiria realizá-lo. Por isso uso esse espaço para agradecer e creditar as respectivas honras a aqueles que fazem toda a diferença em minha vida. Porém, gostaria de frisar que somente uma página não é suficiente para expressar toda a minha gratidão.

Agradeço primeiramente meu pai Leonides e minha mãe Elisa pelos exemplos de vida que são. A minha irmã Lívia, pelo companheirismo e amizade há 21 anos. A segurança inabalável, a força inesgotável e o carinho único que emanam de vocês são cruciais e, com certeza, algo que jamais conseguirei retribuir. Obrigado só por tudo.

Ao Prof. Dr. Walter Malagutti Filho, por ter acreditado em mim desde o começo, por todo o apoio oferecido e, principalmente, pela confiança e assistência. Agradeço a Unesp por todo apoio e estrutura fornecida. Agradeço especialmente a mestre em geofísica, Syngra, sem a qual eu jamais teria preparado todo o equipamento necessário para levar em campo.

Aos colegas da Geologia 2012, pela caminhada desde o início, pelas aprovações e reprovações em conjunto. Aos colegas da Geologia 2013, em especial Breda (Caio), Pupu (Lucas R.), Simba (Tómas), Rafaela, 2D (Rodrigo), Salim (Leonardo) pelo acolhimento na etapa final, mas não menos importante.

A amiga e geóloga Narizinho (Marina), que foi extremamente importante nos dias de campo, essas histórias eu jamais esquecerei. Ao amigo e futuro geólogo Leitoa (Daniel), sem o qual eu jamais teria conseguido coletar os dados no último dia de campo, os motivos nós sabemos o porquê.

A família “Toca do Tiranossauro” que tive o prazer de morar nesses anos em Rio Claro. O Bode (Frederico), Nada (Eduardo), Lula (Rafael), Catarro (Vitor) e, meu colega de quarto, vida universitária e dupla eterna em trabalhos acadêmicos, Trafica (Henrique). Vocês são os irmãos que a vida me presenteou e, sem sombras de dúvida, me incentivaram a chegar até aqui.

As pessoas que entram em nossa vida e, por sorte, jamais saem. Meus parceiros de caminhada, Moça (Leonardo) e Frank (Nikolas), vocês fizeram tudo isso se tornar mais fácil e engraçado. A Renata, por todo o incentivo e por nunca ter descreditado em mim, principalmente, quando eu mesmo não acreditava mais.

*São as nossas escolhas, mais do que as  
nossas capacidades, que mostram quem  
realmente somos. (Dumbledore, Alvo, 2002).*

## RESUMO

A aplicação de métodos geoeletricos, como a polarização induzida (IP), a eletrorresistividade e o potencial espontâneo, apresenta uma importante metodologia 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 fluídos subsuperficiais nas áreas e possíveis problemas na estrutura da barragem, que poderiam afetar a integridade física da estrutura.

**Palavras-chave:** potencial espontâneo (SP). barragens de terra de pequeno porte. engenharia de barragens.

## ABSTRACT

The application of geoelectric methods, such as induced polarization (IP), the electroresistance and the spontaneous potential (SP), presents an important indirect study methodology 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.

**Key-words:** spontaneous potential (SP). small earth dams. physical integrity. engineering of dams.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Localização da área de estudo.....	14
<b>Figura 3.2.1:</b> <b>a)</b> Bloco de basalto sob forte processo de alteração no entorno da barragem; <b>b)</b> Bloco de basalto alterado próximo a valeta (apontada pela seta em amarelo).....	18
<b>Figura 3.2.2:</b> <b>(A)</b> Afloramento de beira de estrada mostrando um diamictito argiloso; <b>(B)</b> Grânulo de diamictito marcado pelo círculo em vermelho.....	19
<b>Figura 4.1.1:</b> Esquema de regularização de vazão em um curso d'água natural.....	21
<b>Figura 4.1.2:</b> Estreito Augusto César, em Marcelino Ramos antes e depois da área ser inundada para a construção da Usina Hidrelétrica de Itá.....	22
<b>Figura 4.2:</b> Barragem de rejeito em Mariana, Minas Gerais.....	23
<b>Figura 4.3.1.1:</b> Seção típica com os principais elementos de uma barragem de terra homogênea.....	26
<b>Figura 4.3.1.2:</b> Seção típica com os principais elementos de uma barragem de terra zonada.....	26
<b>Figura 4.3.2:</b> Seção esquemática típica de barragem de enrocamento com núcleo vertical de argila (membrana impermeável natural).....	27
<b>Figura 4.3.3:</b> Seção transversal característica de uma barragem de concreto de gravidade.....	29
<b>Figura 4.4.1:</b> Esquema da erosão regressiva em uma barragem de terra. <b>a)</b> Processo de infiltração e início da erosão no talude da jusante. <b>b)</b> Fim do processo, marcado pela criação do tubo ligando jusante com o reservatório.....	31
<b>Figura 4.4.2:</b> Esquema de galgamento ( <i>overtopping</i> ) em barragem de núcleo impermeável. <b>a)</b> Início do processo marcado pelo aumento do nível d'água e passagem do fluxo d'água pela crista da barragem. <b>b)</b> Consequência do galgamento: ruptura da barragem.....	32
<b>Figura 5.3.1.1:</b> Mecanismo esquemático do SP em mineralização de pirita ilustrando o fluxo de íons e elétrons que tornam a parte superior negativamente carregada e a inferior positivamente.....	36
<b>Figura 5.3.3.1:</b> Esquema do potencial de fluxo.....	38
<b>Figura 5.4.1:</b> Esquema da técnica dos gradientes.....	40
<b>Figura 5.4.2.1:</b> esquema do arranjo da técnica dos potenciais.....	41

<b>Figura 5.4.2.2:</b> Esquema da coleta de dados pela técnica dos potenciais (base fixa). a) arranjo da estação base ligada ao eletrodo fixo e ao eletrodo móvel. b) detalhamento para o eletrodo não-polarizável.....	42
<b>Figura 6.2.1:</b> Esquema da coleta de dados em ambas as barragens.....	44
<b>Figura 6.2.1.1:</b> Localização das linhas de SP na barragem de Cordeirópolis – SP.....	45
<b>Figura 6.2.1.2:</b> Esquema de localização das linhas de SP na barragem de Cordeirópolis – SP.....	45
<b>Figura 6.2.2.1:</b> Esquema de localização das linhas de SP na barragem de Ipeúna – SP.	46
<b>Figura 6.2.2.2:</b> Esquema das linhas de SP na barragem de Ipeúna – SP.....	47
<b>Figura 6.2.2.3:</b> Etapas da preparação do ensaio de SP. a) equipamento BISON 2390 previamente carregado. b) covas feitas com igual espaçamento entre si e linhas paralelas. c) estação de coleta pronta d) eletrodo móvel em operação. e) reabastecendo os eletrodos não-polarizáveis com sulfato de cobre de tempo em tempo.....	48
<b>Figura 6.3:</b> esquema dos eletrodos. a) eletrodo bastante umedecido ao redor. b) detalhe na seta vermelha para a cova a qual o eletrodo foi acoplado.....	49
<b>Figura 7.1.1:</b> Esquema do arranjo das linhas do potencial espontâneo em corte transversal a barragem em Cordeirópolis.....	51
<b>Figura 7.1.2:</b> Mapa do potencial espontâneo da barragem de Cordeirópolis – SP.....	53
<b>Figura 7.2.1:</b> Esquema do arranjo das linhas do potencial espontâneo em corte transversal a barragem em Ipeúna.....	54
<b>Figura 7.2.2:</b> Mapa do potencial espontâneo na barragem de Ipeúna – SP.....	55
<b>Figura 8.1.1:</b> Quadro da resistividade elétrica de rochas clássicas.....	56
<b>Figura 8.1.2:</b> Mapa do potencial espontâneo com destaque para a região com os maiores valores positivos x localização dos blocos de basalto.....	57
<b>Figura 8.1.3:</b> Mapa do potencial espontâneo com foco na região do vertedouro.....	58
<b>Figura 8.1.4:</b> Linha de imageamento elétrico com o método da eletrorresistividade.....	59
<b>Figura 8.1.5:</b> Esquema representando um possível fluxo d'água na estrutura da barragem gerando um evento de erosão interna.....	60
<b>Figura 8.1.6:</b> Mapa do potencial espontâneo sobre a estrutura da barragem com indicação de estruturas utilizadas na interpretação dos dados.....	61
<b>Figura 8.1.7:</b> Perfil das 3 linhas de aquisição mostrando a variação do SP x	

coordenadas, barragem de Cordeirópolis.....	62
<b>Figura 8.2.1:</b> Imagem da barragem de Ipeúna (vista de cima) ilustrando os pontos 42 até o 90 da linha 1, onde o nível d'água mais próximo a superfície do reservatório 1 gerou influência no mapa do potencial espontâneo.....	64
<b>Figura 8.2.2:</b> Esquema da barragem mostrando a influência do vertedouro.....	65
<b>Figura 8.2.3:</b> Mapa do potencial espontâneo orientado na barragem de Ipeúna - SP, com destaque para a estrutura do vertedouro.....	67
<b>Figura 8.2.4:</b> Perfil das 3 linhas de aquisição mostrando a variação do SP x coordenadas, barragem de Ipeúna.....	68

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 Objetivos .....	13
<b>2. ÁREA DE ESTUDO E ASPECTOS FIOGRÁFICOS</b> .....	14
<b>3. GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	16
3.1 Unidades litoestratigráficas relevantes ao estudo.....	16
3.1.1 Grupo Itararé.....	16
3.1.2 Formação Serra Geral .....	17
3.2 Geologia Local.....	18
3.2.1 Barragem de Cordeirópolis .....	18
3.2.2 Barragem de Ipeúna.....	19
<b>4. BARRAGENS – REVISÃO TÉCNICA</b> .....	20
4.1 Barragens de regularização .....	21
4.2 Barragens de rejeito na mineração .....	23
4.3 Tipos de barragens .....	24
4.3.1 Barragens de terra .....	24
4.3.2 Barragens de enrocamento.....	27
4.3.3 Barragens de concreto.....	28
4.4 Problemas gerais associados a barragens .....	29
<b>5. METODOLOGIA DO TRABALHO</b> .....	33
5.1 Introdução aos Métodos Geométricos.....	33
5.2 Método do Potencial Espontâneo (SP).....	33
5.3 Origens do Potencial Espontâneo .....	34
5.3.1 Potencial de Mineralização .....	35
5.3.2 Potencial de Difusão .....	36
5.3.3 Potencial de Fluxo (Streaming Potential) .....	37

5.4 Metodologia para aquisição dos dados.....	39
5.4.1 Técnica dos Gradientes (ou eletrodos móveis) .....	40
5.4.2 Técnica dos Potenciais (ou base fixa).....	41
<b>6. AQUISIÇÃO DE DADOS .....</b>	<b>43</b>
6.1 Trabalho pré-campo.....	43
6.2 Trabalho de Campo.....	43
6.2.1 Coleta de dados na Barragem de Cordeirópolis – SP .....	44
6.2.2 Coleta de dados na Barragem de Ipeúna – SP .....	46
6.3 Diminuição do erro durante a aquisição de dados .....	49
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
7.1 Barragem De Cordeirópolis - SP .....	50
7.2 Barragem de Ipeúna – SP.....	54
<b>8. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
8.1 Barragem de Cordeirópolis – sp.....	56
8.2 Barragem de Ipeúna – SP.....	63
8.3 Comparativo entre as barragens de Cordeirópolis e Ipeúna .....	68
8.3.1 Integridade física das barragens .....	69
<b>9. CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO I – TABELA DE DADOS SP – BARRAGEM CORDEIRÓPOLIS .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO II – TABELA DE DADOS SP – BARRAGEM IPEÚNA .....</b>	<b>82</b>

## 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.

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 Agencia Nacional de Águas (ANA, 2015) 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 Agencia Nacional de Aguas, 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 geoeletricos 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 barreamento.

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.

## 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 avaliar o potencial de fluxo a partir do potencial eletroquímico.

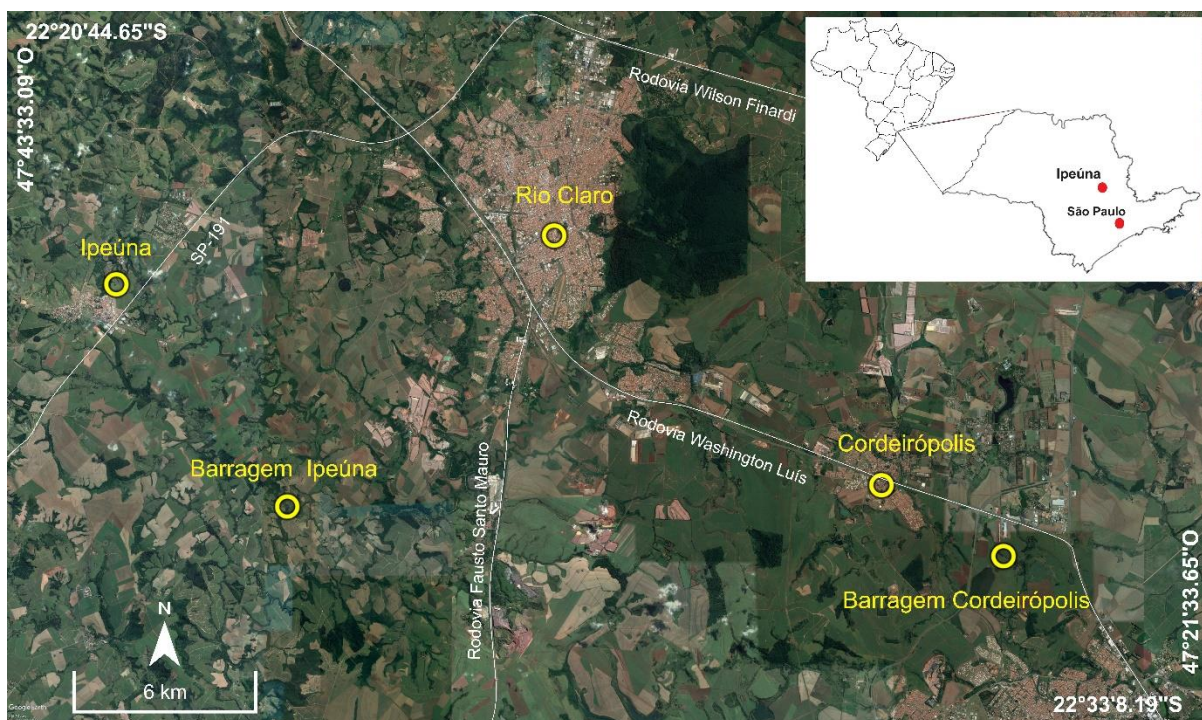
Por fim, buscou-se comparar os resultados obtidos nas duas barragens estudadas e interpretar a influência de barramentos construídos com litologias distintas nos valores do potencial espontâneo coletados.

## 2. ÁREA DE ESTUDO E ASPECTOS FISIOGRAFICOS

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 não foi feita de forma aleatória. Algumas características foram levadas em consideração, como o tamanho das barragens parecidas (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 2.1:** Localização da área de estudo.



**Fonte:** modificado de GOOGLE EARTH, 2017.

Quanto a geomorfologia, a região encontra-se no domínio da Depressão Periférica do Estado de São Paulo, que se encaixa entre terrenos pré-Cambrianos do Planalto Atlântico a Leste, e escarpas das Zonas da Cuesta do Planalto Ocidental a Oeste e Norte. Esse domínio possui como características morfológicas mais importantes o comportamento interplanáltico, pouco ondulado (SILVA, 1999).

Próximo ao município de Ipeúna, o relevo apresenta variação altimétrica de 500 a 650 metros, apresentando um terreno pouco acidentado, com colinas de topo aplainado, tabulares e convexos, de declividades baixas e alta densidade de drenagem. As camadas mergulham suavemente para noroeste, condicionando algumas saliências topográficas que marcam cuevas (ALMEIDA, 1964).

Já no município de Cordeirópolis, o relevo apresentava-se de maneira mais plana, ou seja, pouca variação altimétrica, sendo um terreno pouco acidentado (ALMEIDA, 1964).

Em relação a hidrografia, as barragens encontram-se localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba. A barragem de Cordeirópolis pertence ao afluente do Ribeirão do Tatu que desagua no Rio Piracicaba, enquanto que a barragem de Ipeúna é formada por dois lagos construídos no Pesqueiro “Quilombo” com o intuito de pesca esportiva.

### **3. GEOLOGIA REGIONAL**

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 1.700.000km<sup>2</sup> 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 1.000.000km<sup>2</sup>, sendo 160.000km<sup>2</sup> no Estado de São Paulo, e estendendo-se para a Argentina, Uruguai e Paraguai (SCHNEIDER et al. 1974 apud ZAINE, 1994). Trata-se de uma bacia simétrica com acumulação de rochas sedimentares e vulcânicas de idades entre o Ordoviciano e o Cretáceo (CORDANI et al.1984). Apresenta uma espessura aproximada de 7.000 metros e possui uma forma ovalada segundo NNE-NSW, com eixo maior na direção N-S (MILANI et al. 2007).

Assim, a Bacia possui um preenchimento sedimentar composto por materiais siliciclásticos com intrusão de um derrame de lavas basálticas. Segundo Zalán et al. (1990), as rochas sedimentares e vulcânicas representam a superposição de pacotes deposicionais em três ambientes tectônicos ocorrido durante o tectonismo do Gondwana.

Na área de estudo, as rochas aflorantes são de idade permo-Carbonífero a Cretáceo.

#### **3.1 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS RELEVANTES AO ESTUDO**

##### **3.1.1 Grupo Itararé**

Os sedimentos da unidade constituem a unidade basal da sequência permo-carbonífera da Bacia do Paraná, aflorando a base da coluna em áreas de fundo de vales dos rios da região de Rio Claro e Ipeúna, por exemplo (ZAINE, 1994).

No Estado de São Paulo, encontram-se vários tipos de rochas numa complexa relação entre elas, como arenitos de granulometria variada, dispostos em

lentes ou camadas; também ocorrem pacotes expressivos de diamictitos e sedimentos pelíticos, representados por siltitos, folhelhos e ritmitos, podendo conter ainda seixos e blocos erráticos (SOARES, 1972; ZAINE, 1994). PERINOTTO & ZAINE (2008) atribuem uma espessura de cerca de 900 metros.

Essa unidade registra influências de processos glaciais, iniciando sua deposição em condições continentais, de alta energia, transgredindo para um ambiente marinho, a partir da instalação de lobos deltaicos e fácies pelíticas plataformais, alternando fluxos de massa subaquosos e turbiditos. Apresenta como fósseis mais frequentes restos de vegetais, podendo ocorrer bivalves, gastrópodes e braquiópodos (ZAINE, 1994).

Na região de estudo o Grupo Itararé é limitado na base pelo contato com rochas cristalinas pré silurianas, enquanto que o contato superior se dá com a Formação Tatuí, de forma discordante (SOUZA, 2002).

### **3.1.2 Formação Serra Geral**

A Formação Serra Geral é constituída por rochas vulcânicas básicas toleíticas, de coloração preta a cinza esbranquiçada, com camadas delgadas de rochas constituídas por arenitos entre derrames (ZAINE, 1994). Soleiras e diques ocorrem associados aos derrames basálticos (SOUSA et al.1999; ZAINE, 1994).

Na Bacia do Paraná, a ocorrência da unidade é generalizada, podendo atingir espessuras de aproximadamente 1530 metros (SCHNEIDER et al., 1974).

A Formação Serra Geral resulta da extrusão de lavas a partir de um intenso magmatismo fissural, na primeira fase de Reativação Wealdeniana (ALMEIDA, 1967). Segundo dados geocronológicos em rochas desta Formação obtidos por Nardy (1999), a atividade vulcânica tem idade próxima ao Eocretáceo, há 132 milhões de anos.

## 3.2 GEOLOGIA LOCAL

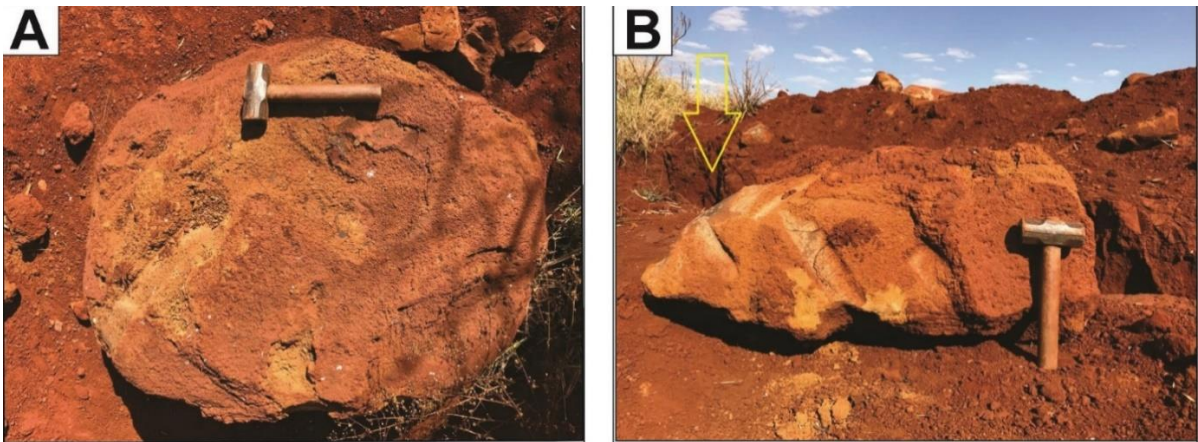
### 3.2.1 Barragem de Cordeirópolis

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 3.2.1 a).

No extremo Sul da barragem, ocorre uma valeta cortando a estrada e possui, aproximadamente, 2 metros de profundidade. Nesse local é possível encontrar blocos e matacões de basalto, que acabam ocorrendo por todo o entorno da estrutura (Figura 3.2.1 b). Todo a região é utilizada para o cultivo de cana de açúcar.

**Figura 3.2.1:** a) Bloco de basalto sob forte processo de alteração no entorno da barragem;  
b) Bloco de basalto alterado próximo a valeta (apontada pela seta em amarelo).



Fonte: arquivo pessoal.

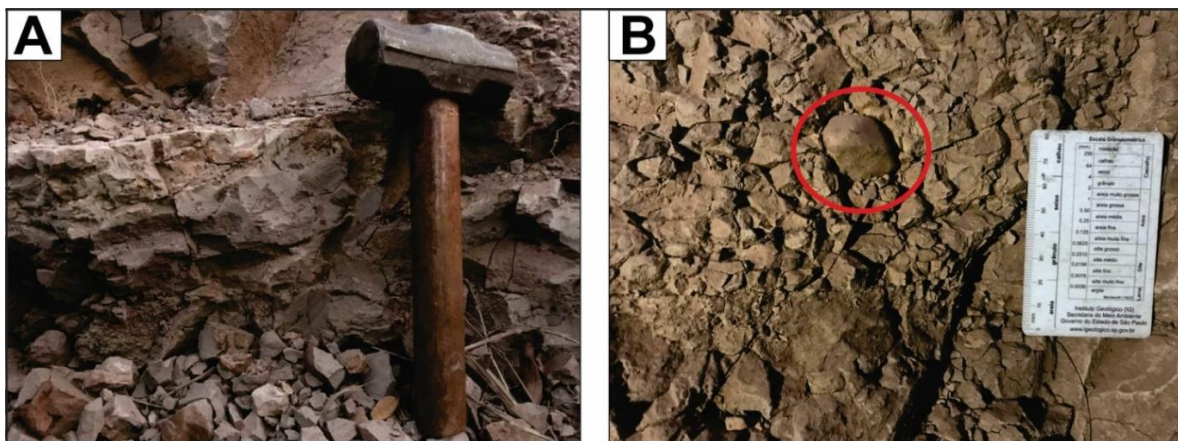
### 3.2.2 Barragem de Ipeúna

A barragem de Ipeúna está localizada entre dois lagos utilizados para pesca esportiva e lazer. O Rio Passa Cinco corre bem próximo da região de coleta dos dados, inclusive em épocas de grande número de chuvas o mesmo transborda e alcança os dois lagos.

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 solos de rochas básicas na estrutura do barramento, na barragem de Ipeúna é possível identificar afloramentos característicos do Grupo Itararé.

Foram encontrados afloramentos de diamictitos argilosos com grânulos de aproximadamente 4 centímetros ao redor da barragem (Figura 3.2.2), litologia típica do Grupo Itararé.

**Figura 3.2.2:** (A) Afloramento de beira de estrada mostrando um diamictito argiloso; (B) Grânulo de diamictito marcado pelo círculo em vermelho.



Fonte: arquivo pessoal.

#### **4. BARRAGENS – REVISÃO TÉCNICA**

De acordo com o artigo 2º inciso I da lei 12.334/2010 da Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelece que o termo “barragem” refere-se a qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

De maneira mais simplificada, as barragens podem ser compreendidas como elementos estruturais, construídos de maneira transversal ao sentido principal de um fluxo d’água tendo como objetivo o armazenamento artificial de água.

Segundo dados da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), as barragens inicialmente eram planejadas e construídas para fins de fornecimento de água, irrigação e controle de enchentes. Somente no final do século XIX, ocorreu um aumento do uso dos barramentos para obtenção de energia elétrica e navegação.

Atualmente, os projetos de barragens focam no conceito de “barragens de usos múltiplos”, pois nesse caso as populações, principalmente de países em desenvolvimento, recebem benefícios domésticos e econômicos de um único investimento.

Ainda segundo registros da ICOLD, as barragens de uso único dominam o cenário com aproximadamente 72% das barragens no mundo todo, embora haja um número crescente de 28% de barragens de uso múltiplo. Devido ao caráter histórico, a irrigação permanece como a principal função das barragens (50%), seguido pela hidroeletricidade (17%), suprimento de água (13%) e controle de enchentes (10%), outras funções completam a lista.

No Brasil, existem inúmeros barramentos de diversas dimensões e destinados a diferentes usos, tais como barragens de infra-estrutura para acumulação de água, geração de energia, aterros ou diques para retenção de resíduos industriais, barragens de contenção de rejeitos de mineração, entre outros (DUARTE, 2008).

A seguir são descritas algumas das finalidades mais utilizadas para barragens.

## 4.1 BARRAGENS DE REGULARIZAÇÃO

A falta de constância no regime temporal das chuvas resulta na variabilidade da vazão dos rios. Por consequência, ocorre o déficit hídrico natural, quando o fornecimento de água pelo curso d'água é inferior ao necessário para o suprimento de determinados usos.

Com o intuito de diminuir o efeito da variabilidade temporal da vazão busca-se, através da construção de um reservatório de acumulação de água, a regularização do nível d'água. Assim, compensando as deficiências hídricas dos períodos de estiagem, o reservatório acumula parte da água dos períodos chuvosos conseguindo, portanto, regularizar as vazões naturais (Figura 4.1.1).

**Figura 4.1.1:** Esquema de regularização de vazão em um curso d'água natural.



**Fonte:** BARBOSA JR, 2010.

O armazenamento de água é o principal objetivo na construção de uma barragem. Esse represamento, quando bem feito, busca a regularização da vazão do curso d'água e com isso pode ser utilizado para diversas atividades, como uso doméstico, uso industrial, piscicultura, controle de enchentes, navegação fluvial, irrigação agrícola, ou no fornecimento de energia elétrica através de uma hidrelétrica.

As vantagens na construção de uma barragem são inúmeras: o potencial de exploração econômica da região é bem alto, uma vez que os barramentos podem se tornar pontos turísticos, como é o caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada em Foz do Iguaçu - PR, que aquece não só a economia, com empregos, mas também o mercado imobiliário local. Em menor escala, o controle da vazão e armazenamento

de água pode ser utilizado na piscicultura em comunidades locais e na navegação fluvial de moradores locais.

Entretanto, as desvantagens da construção de barragens, principalmente as de grande porte, estão ligadas com questões ambientais. A fauna local normalmente sofre com a implantação do projeto, uma vez que ocorre toda uma mudança no comportamento da área, como a redução da concentração de gás oxigênio na água, uma vez que esta agita-se muito menos. A flora em si sofre diretamente, já que a área alagada tende a ser bastante larga, cobrindo grandes áreas de florestas muitas vezes. Outro fator menos mencionado, mas também importante refere-se aos pontos turísticos, visto que a área alagada pode cobrir pontos que antes eram explorados turisticamente, como é o caso do município de Marcelino Ramos no Rio Grande do Sul, que em 2000 teve o Estreito Augusto César inundado para a construção da Usina Hidrelétrica de Itá (Figura 4.1.2).

**Figura 4.1.2:** Estreito Augusto César, em Marcelino Ramos antes e depois da área ser inundada para a construção da Usina Hidrelétrica de Itá.



**Fonte:** Portal de Marcelino, junho de 2015.

## 4.2 BARRAGENS DE REJEITO NA MINERAÇÃO

Na mineração existem dois tipos de barragens: (1) as utilizadas na contenção de sedimentos e (2) as utilizadas para armazenar rejeitos.

As barragens de rejeito são construídas com o intuito de reter os resíduos sólidos gerados nos processos de beneficiamento de minério e água a ser reutilizada na indústria. Normalmente são construídas em vales a jusante das operações e podem ter também a função de conter sedimentos finos (DOMINGUES; BOSON; ALÍPAZ, 2006).

Porém, devido aos recentes desastres ocasionados pelo rompimento de barragens de rejeito, em especial ao evento ocorrido no município de Bento Rodrigues – MG em 2015 (Figura 4.2), onde 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram liberados no meio ambiente, atingindo áreas a até 100 km de distância, atualmente a disposição de rejeitos tem sido um aspecto muito focalizado nos estudos e investimentos de uma empresa de mineração.

**Figura 4.2:** Barragem de rejeito em Mariana, Minas Gerais.



**Fonte:** DNPM, 2016.

### 4.3 TIPOS DE BARRAGENS

Existem diversas maneiras de se classificar uma barragem, de acordo com o seu objetivo, seu potencial hidráulico e os tipos de materiais utilizados na sua construção. Com relação a este último aspecto, as barragens podem ser classificadas em: terra, enrocamento e concreto.

#### 4.3.1 Barragens de terra

As barragens de terra são consideradas as mais elementares obras de barragens. Inicialmente, foram construídas com a finalidade de armazenar água para a irrigação, como é o caso da barragem no Ceilão, arquitetada no ano de 504 A.C, contendo cerca de 17 quilômetros de comprimento e 21 metros de altura (ARTHUR, 1973).

No Brasil, segundo dados do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), o registro da primeira barragem de terra construída em território brasileiro data do final do Século XVI, onde hoje é a área urbana de Recife – PE, conhecida como açude Apipucos.

No início dos projetos, devido ao baixo nível tecnológico e pouco conhecimento em obras de engenharia, as barragens eram construídas a partir de métodos empíricos, resultando em elevados números de acidentes e casos de ruptura. Estes incidentes foram responsáveis por chamar a atenção na necessidade em se criar uma engenharia de obra específica para barragens (Vargas, 1977).

Na década de 50, devido aos avanços da Mecânica dos Solos, somado ao desenvolvimento de um procedimento para a construção desse tipo de barragem, como uma pré-investigação detalhada sobre as condições de fundação e materiais, aplicação de técnicas e habilidades específicas para a realização do projeto e planejamento dos métodos de construção, aumentaram consideravelmente a segurança e vida destas estruturas (Arthur, 1973).

Atualmente, tais procedimentos permitem o aumento na altura dos barramentos e, por consequência, aumento da capacidade de armazenamento, com

estruturas de mais de 150 metros. No Estado de São Paulo, por exemplo, a barragem de Xavantes no Rio Paranapanema possui 90 metros de altura (Marangon, 2004).

Além do projeto ser mais simples que outros tipos de barramentos, as barragens de terra possuem outras vantagens, como utilizar material na sua estrutura do próprio local de instalação, amortizando os custos da obra; além de resistirem mais ao assentamento do que estruturas mais rígidas, sendo mais adequadas para áreas onde os movimentos do solo são comuns.

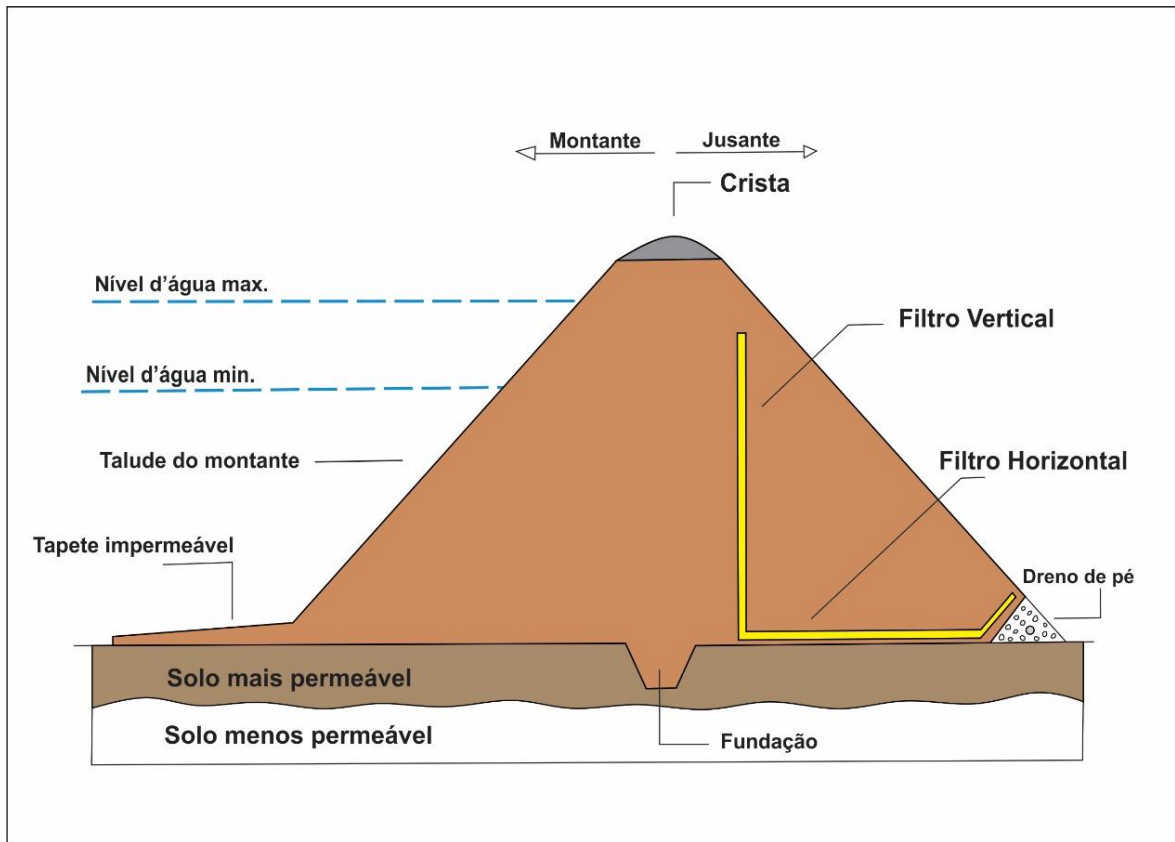
Este conjunto de fatores fez com que as barragens de terra se tornassem o tipo de barragem mais comum no mundo todo. No Brasil, por exemplo, as barragens de enrocamento e terra representam 82% do total e somente 18% das barragens são de concreto (Sayão, 2009).

Devido ao grande número de obras de barragens de terra ao longo do tempo e o fato da tecnologia de Engenharia de Barragens ter avançado, os barramentos de terra conheceram melhorias. Atualmente, dividem-se as barragens de terra em dois tipos: homogêneas ou zonadas.

- *Barragem Homogênea*: constituída praticamente por um único material, compactado, com permeabilidade suficientemente reduzida permitindo níveis aceitáveis de percolação (Figura 4.3.1.1). É mais indicada se no local da barragem existirem grandes quantidades de solo argiloso ou areno-siltoso/argiloso.

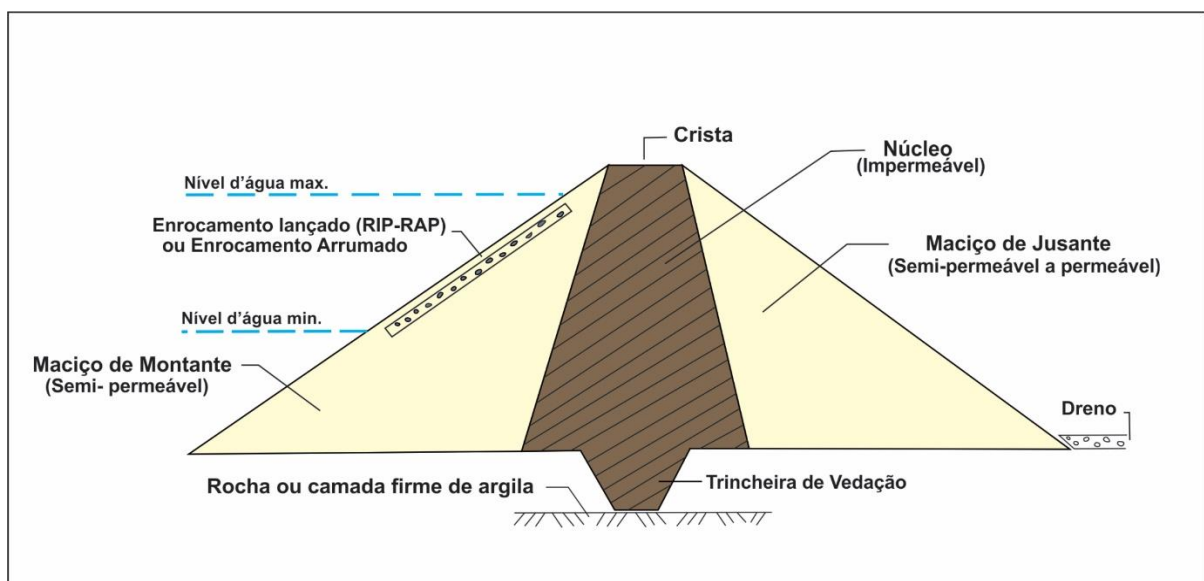
- *Barragem Zonada*: apresenta um núcleo central impermeável, com zonas de material de composição mais permeável, com o intuito de suportar e proteger o núcleo. As zonas podem ser compostas por areia, cascalho ou fragmentos de rocha, por exemplo (Figura 4.3.1.2).

**Figura 4.3.1.1:** Seção típica com os principais elementos de uma barragem de terra homogênea.



**Fonte:** alterado de Carvalho, 2011.

**Figura 4.3.1.2:** Seção típica com os principais elementos de uma barragem de terra zonada.



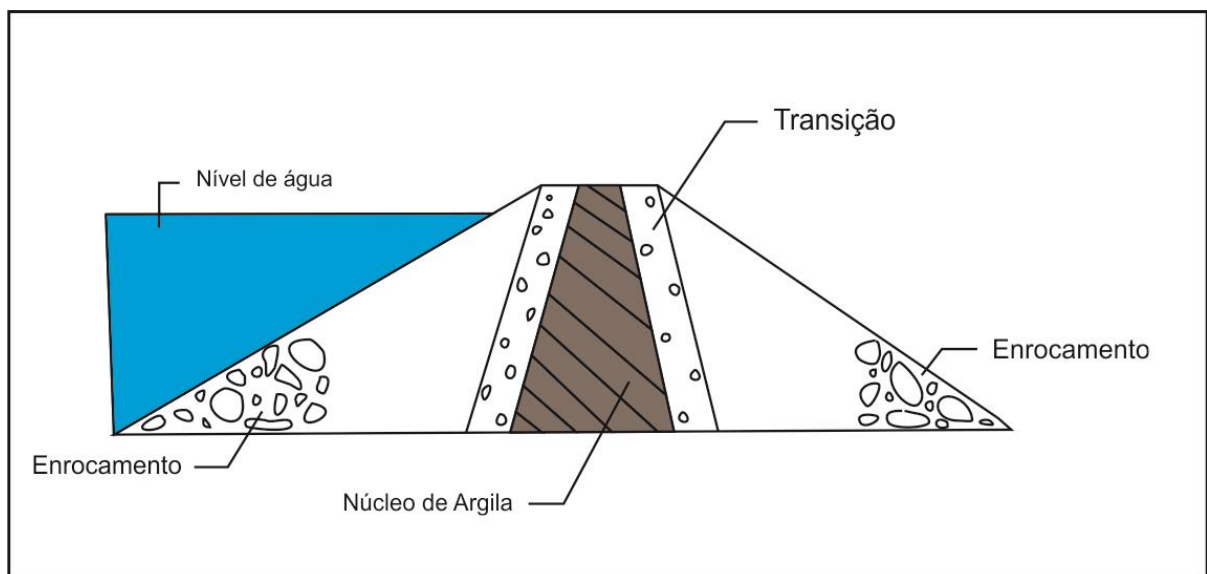
**Fonte:** alterado de FAO, 2001.

### 4.3.2 Barragens de enrocamento

A barragem de enrocamento possui uma composição de blocos de rochas de diferentes tamanhos somado a uma membrana impermeável na face de montante ou um núcleo impermeável (Figura 4.3.2). Devido a necessidade de grandes quantidades de rochas na sua estrutura, esse tipo de barragem só é viável economicamente quando a obtenção de concreto é muito elevada ou ocorresse escassez de materiais terrosos e disponibilidade de rocha dura e resistente. (Marangon, 2004).

Dessa forma, as rochas ideais para esse tipo de barramento devem ser resistentes ao intemperismo físico e químico, sendo assim dificilmente desintegradas ou quebradas. A organização dos blocos também é crucial para o sucesso da barragem, sendo necessário colocá-los cobrindo o maior contato possível entre suas superfícies e, por fim, preenche-se os vazios com o mesmo material, porém em tamanho menor (Costa, 2012).

**Figura 4.3.2:** Seção esquemática típica de barragem de enrocamento com núcleo vertical de argila (membrana impermeável natural).



**Fonte:** alterado de Marangon, 2004.

### 4.3.3 Barragens de concreto

A utilização do concreto na estrutura de barragens de aproveitamento hidráulico começou a se desenvolver na metade do século XIX, mais precisamente em 1887, com a construção da primeira barragem unicamente de concreto em San Mateo, nos Estados Unidos da América (CBGB, 1989).

No Brasil, segundo o Comitê Brasileiro de Barragens, a construção de barragens de concreto iniciou-se em meados da década de 60, conhecido como os anos dourados de combate a seca principalmente na região Nordeste.

Devido a investimentos em tecnologia e avanço dos cálculos de engenharia, as barragens tanto de terra, enrocamento concreto ou mistas começaram a evoluir a estrutura, principalmente verticalmente, atingindo alturas e volumes cada vez maiores (CBGB, 1989).

Atualmente, as barragens de concreto normalmente estão associadas a grandes obras e podem ser divididas em três tipos importantes:

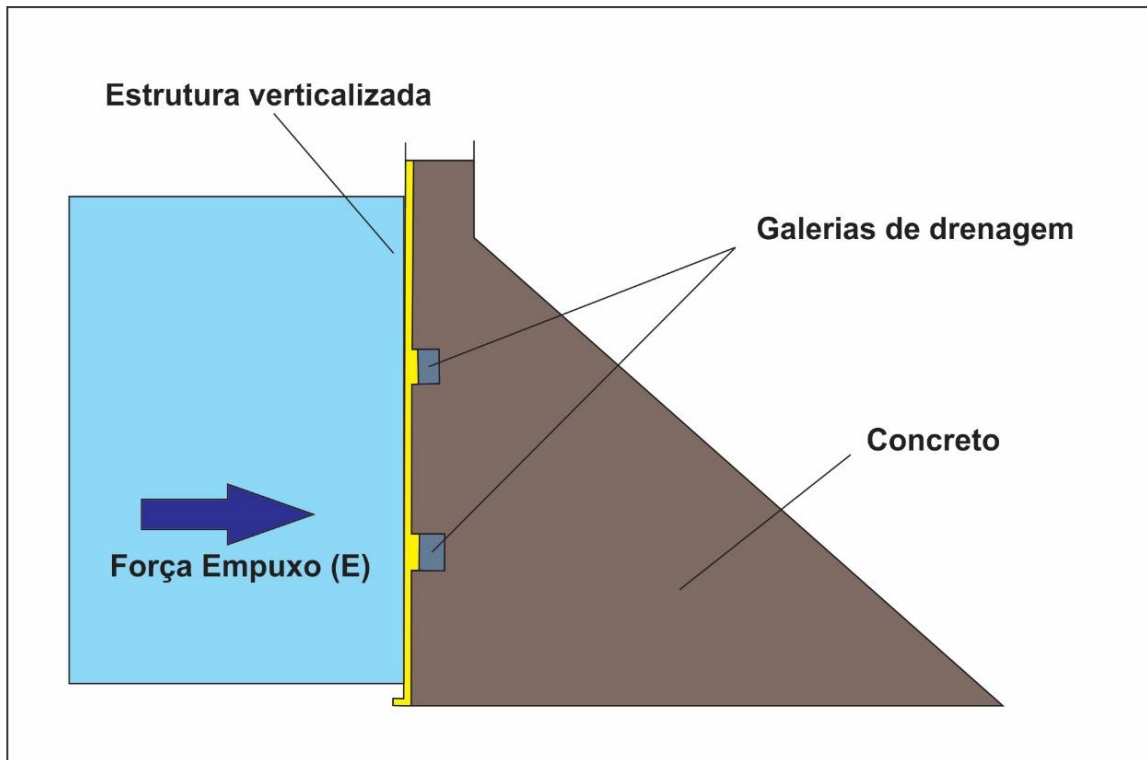
a) **Barragem de concreto de gravidade:** estrutura maciça e com pouca armação, o que faz jus ao nome, uma vez que a principal força atuante é a gravidade comprimindo a estrutura e assegurando a compactação do material. Pode apresentar um traçado retilíneo ou em arco. A base de toda estrutura e o fator que assegura o sucesso da obra é o seu próprio peso, que mantém a estabilidade, transmitindo as forças das águas a montante para o solo (Figura 4.3.3) (COSTA, 2012).

b) **Barragens de concreto a gravidade aliviada:** a principal diferença entre este tipo e o anterior é que a estrutura da barragem de gravidade aliviada é oca, o que resulta em uma economia de concreto e diminui a carga no maciço de fundação. Porém, justamente devido a estrutura vazada, esta barragem recebe maior tensão de tração, necessitando-se de maior uso de armação para resistir a este esforço (COSTA, 2012).

c) **Barragens de concreto do tipo Arco:** são as mais raras, pois o comprimento deve ser pequeno em relação à sua altura, exigindo, portanto, um

material rochoso de resistência elevada nas encostas de vale para suportar os esforços a elas transmitidos. Devido a presença de vales profundos e estreitos, esse tipo de barragem é mais comum na Europa (Marangon, 2004).

**Figura 4.3.3:** Seção transversal característica de uma barragem de concreto de gravidade.



**Fonte:** alterado de Marques Filho, 2012.

#### 4.4 FATORES QUE AFETAM A INTEGRIDADE FÍSICA DE BARRAGENS

As barragens são obras indispensáveis na sociedade e, por se tratarem de estruturas, muitas vezes, de grande porte, são associadas a um elevado potencial de risco graças a possibilidade de ruptura, que geraria danos ao meio ambiente, fauna, flora e, principalmente, perda de vidas humanas e econômicas.

Como dito anteriormente, até meados do século XIX, a construção de barragens era baseada em métodos empíricos, onde as seções transversais adotadas apresentavam elevados volumes, pois seguiam basicamente o princípio da contenção do reservatório pela massa da barragem (Bretas et al., 2010).

Quase no fim do século XIX, surgem os trabalhos científicos pioneiros nesta área. Porém, somente em 1979, em Nova Delhi, durante o Congresso Internacional

de Grandes Barragens, o *Internacional Commission on Large Dams* (ICOLD) decidiu pela intensificação do desenvolvimento em segurança de barragens (CBDB, 2001).

Entretanto, mesmo com os avanços tecnológicos, a Engenharia de Barragens não é uma ciência exata a ponto de tornar os acidentes nulos. No século XX, por exemplo, foram registrados 200 casos notáveis de falhas em reservatórios em todo o mundo, com numeros alarmantes de 250.000 mortes de pessoas em desastres desse tipo (Mccully, 2001).

As causas para o rompimento de uma barragem são diversas, podendo um acidente ocorrer por um fato isolado ou um conjunto de fatores combinados. Segundo Lou (1981), as causas que podem conduzir a ruptura de um barramento são divididas em dois grandes grupos: causas de origem humana e causas de origem não humana.

No primeiro grupo encontram-se as deficiências e erros na construção e/ou projeto, a exploração incorreta da albufeira (área coberta de água retida pela construção da represa), localização imprópria da barragem e atos de guerra (Lou, 1981).

No segundo grupo enquadram-se, no caso de barragens de aterro, o galgamento da barragem, a erosão interna no corpo da barragem (*piping*) e/ou fundações, escorregamentos de aterros ou fundações, assentamentos e sismos (Lou, 1981). Já no caso de barragens de concreto, as brechas devido a pressão do corpo d'água na estrutura da barragem podem ser um dos motivos causadores de ruptura.

As principais causas de rupturas de barragens são: a instabilidade de taludes, erosão interna do barramento (*piping*) e galgamento (*overtopping*). Sendo que os dois últimos modos representam juntos 95% do casos (Foster et al., 2000).

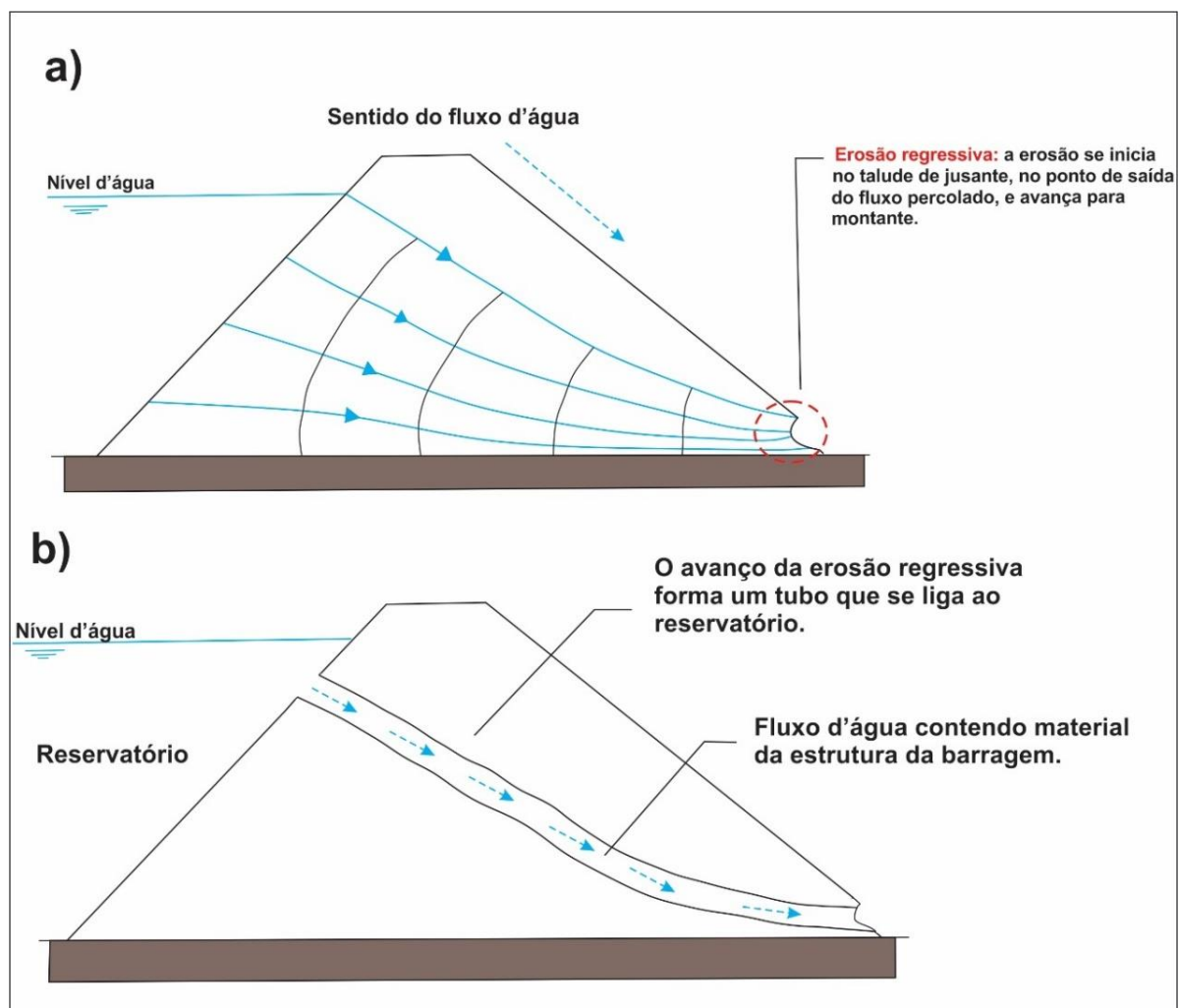
A perda de estabilidade de um talude em uma barragem pode ocorrer de diversas maneiras. Em barragens de terra, por exemplo, solos fracos ou mal compactados causam aumento da infiltração e elevam o nível freático, enfraquecendo a estrutura do barramento. Assim, barragens projetadas de maneira correta possuem um sistema de drenagem interna (filtros de areia e um dreno encoberto) para prevenir que a infiltração de água consiga mover o material da estrutura, melhorando a estabilidade do talude (Instituto Minere, 2016).

A ruptura de uma barragem de terra devido ao *piping* ocorre graças a erosão regressiva de jusante para montante, criando um tubo que carrega partículas

de solo pelo maciço, já que o fluxo d'água se torna intenso e sem controle (Figura 4.4.1).

A erosão interna é mais recorrente em barragens de terra homogênea, uma vez que a presença de filtros e drenos internos aumenta o controle sobre a percolação, fator crucial para se evitar o início do *piping* (Foster et al., 2000).

**Figura 4.4.1:** Esquema da erosão regressiva em uma barragem de terra. **a)** Processo de infiltração e início da erosão no talude da jusante. **b)** Fim do processo, marcado pela criação do tubo ligando jusante com o reservatório.



**Fonte:** modificado de Perini, 2009.

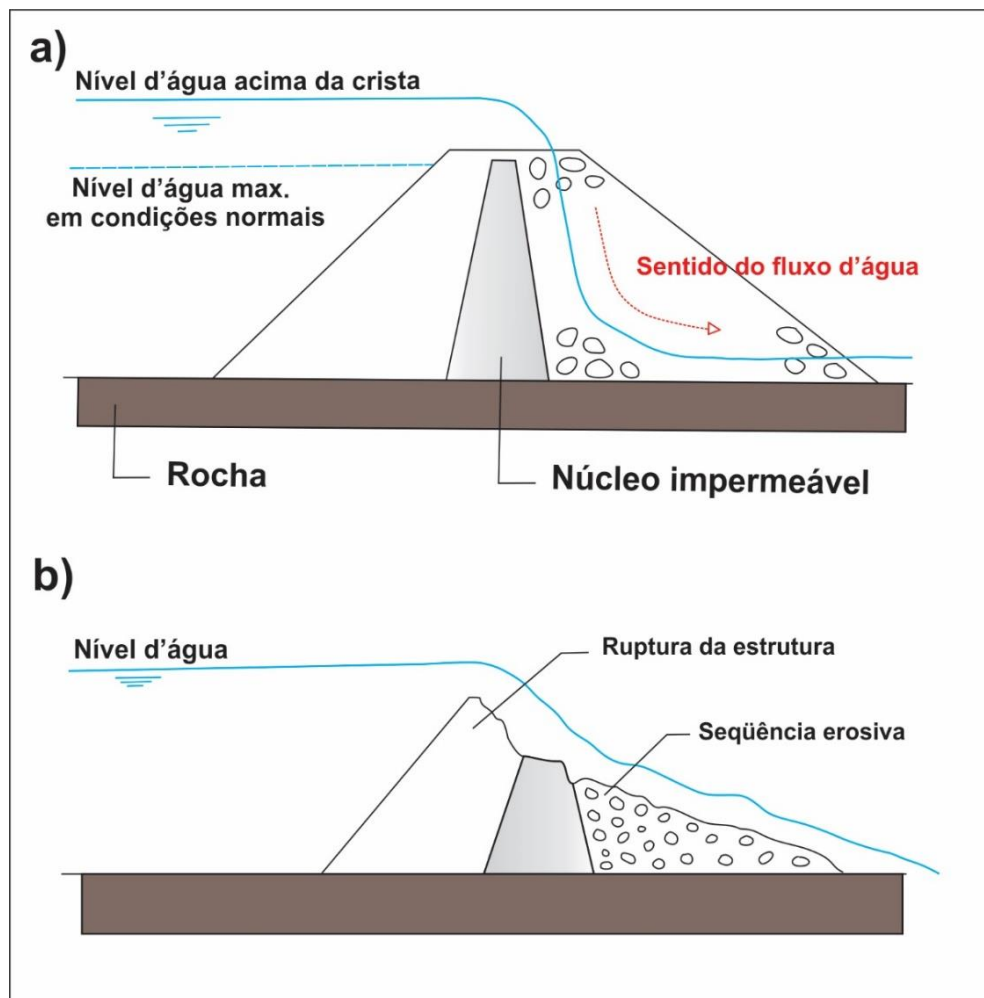
O galgamento (ou *overtopping*) ocorre quando o fluxo de água à montante tem seu regime alterado e acaba ultrapassando a crista da barragem atingindo a região do talude de jusante. Alguns fatores podem ser os responsáveis por isso

acontecer, como a falta de capacidade do vertedor e/ou avaliações equivocadas da vazão ainda durante a construção.

Devido a velocidade que o fluxo d'água pode atingir a partir do momento que cruza a crista da barragem, o galgamento é um processo que causa danos na estrutura da barragem, sendo responsável por 40% dos rompimentos de barragens (Figura 4.4.2) (McCully, 2001).

**Figura 4.4.2:** Esquema de galgamento (*overtopping*) em barragem de núcleo impermeável.

- a) Início do processo marcado pelo aumento do nível d'água e passagem do fluxo d'água pela crista da barragem. b) Consequência do galgamento: ruptura da barragem.



**Fonte:** modificado de Powledge et al., 1988.

## 5. METODOLOGIA DO TRABALHO

### 5.1 INTRODUÇÃO AOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS

A origem dos métodos geoeletricos está relacionada com a descoberta sobre a resistividade das rochas por Gray & Wheeler no século XVIII e sobre a condutividade do solo por Watson, em 1746 (Orellana, 1972).

Historicamente, os métodos geoeletricos, como a polarização induzida (IP) e eletroresistividade possuíam um leque de atuação bastante restrito, mais focado na área de prospecção mineral. Com a evolução dos equipamentos geoeletricos, aumentou-se o número de trabalhos científicos publicados em outras áreas, como geologia ambiental (Elis, 2001) e geotecnia (Braga, 1997; Malagutti, 1991).

O método do potencial espontâneo, por sua vez, tem sua descoberta realizada em 1815, por Robert Fox, sendo considerado o método geoeletrico mais antigo. Fox, a partir da análise de depósitos de certos minerais, notou que os mesmos emitiam naturalmente correntes elétricas de baixa intensidade e que estas podiam ser detectadas a partir da superfície terrestre. Eva e Keys (1954), afirmam que Fox, em 1830, havia descoberto depósitos de sulfeto de cobre medindo potenciais naturais com eletrodos e um galvanômetro.

Desde então, o método foi se aprimorando, sendo utilizado pela primeira vez com êxito em 1913, quando Conrad Schlumberger descobriu um depósito de sulfetos na Sérvia (Eva e Keys, 1954).

Portanto, inicialmente, o método do potencial espontâneo se mostrava bastante útil na prospecção mineral. Entretanto, atualmente, é utilizado em outras aplicações, como geologia de engenharia, hidrogeologia e aplicações ambientais.

### 5.2 MÉTODO DO POTENCIAL ESPONTÂNEO (SP)

O método do potencial espontâneo – também conhecido como método SP (*Spontaneous Potential* ou *Self Potential*) ou método natural – define que é possível medir a diferença de potencial entre dois eletrodos situados no terreno. Ou

seja, trata-se de um método natural, uma vez que não há necessidade de induzir corrente elétrica em subsuperfície, capaz de ler a diferença de potencial (d.d.p) através da utilização de um milivoltímetro (Corwin, 1990; Gallas, 2000).

O potencial espontâneo em si, como o próprio nome diz, nada mais é que qualquer potencial originado de maneira espontânea no solo, sendo gerado, na maioria das vezes, por atividade eletroquímica ou mecânica, através do fluxo de fluidos, de calor ou íons que também é capaz de gerar um potencial espontâneo (Gallas, 2000).

Os potenciais podem estar também associados com o contato entre rochas com propriedades elétricas diferentes, corrosão, gradientes térmicos e de pressão nos fluidos de subsuperfície e atividade bioelétrica de materiais orgânicos - estudos recentes de Revil et al. (2010), por exemplo, sugerem que o desenvolvimento de estruturas orgânicas condutoras e a geração do sinal de potencial espontâneo estão ligados.

Nos primeiros usos, o método do potencial espontâneo era bastante focado na prospecção mineral, uma vez que os corpos de sulfetos maciços são condutores e criam anomalias negativas facilmente identificadas durante a interpretação (Telford et al., 1978).

Quanto a sua utilização em estudos ambientais ou de engenharia, busca-se identificar possíveis zonas de percolação de água em subsuperfície e as fontes que geraram as mesmas. No primeiro caso, por exemplo, identificar o sentido do fluxo d'água é crucial, já que, normalmente, utiliza-se o método em casos de contaminação do solo, assim saber o sentido da pluma de contaminação é o primeiro passo para a remediação do problema (Gallas, 2000; CETESB, 2001).

### 5.3 ORIGENS DO POTENCIAL ESPONTÂNEO

O método do potencial espontâneo resulta-se da diferença de potencial entre dois eletrodos introduzidos na superfície. Através dessa medição de potencial, é possível identificar as anomalias de SP, que por sua vez, possuem distintas maneiras de ocorrerem em subsuperfície, como fluxo de fluidos ou de calor e sua origem está ligada com a sua fonte.

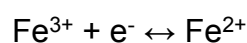
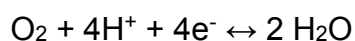
Devido a diferença entre os motivos da formação das anomalias SP, divide-se os potenciais em potencial de mineralização, para os casos ligados a prospecção mineral, e potenciais de difusão e de fluxo para casos ligados a geologia de engenharia, hidrogeologia e geologia ambiental.

### 5.3.1 Potencial de Mineralização

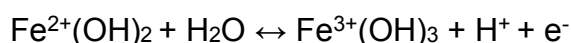
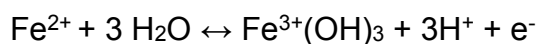
O potencial de mineralização refere-se a um dos primeiros casos da utilização do método SP. De natureza essencialmente eletroquímica, esse tipo de potencial ocorre normalmente em zonas de sulfetos, grafita e magnetita (Telford et al., 1978).

A teoria mais aceita é descrita no trabalho de Sato & Mooney (1960), a qual conclui que as anomalias SP associadas as mineralizações sulfetadas são oriundas de dois tipos de reações eletroquímicas (Figura 5.3.1.1). Estas encontram-se em diferentes cotas da interface mineralização/rocha encaixante, sendo uma acima e outra abaixo do lençol freático, enquanto que o corpo sulfetado possui um papel de ligante elétrico entre as posições/reações.

Portanto, nesse caso as reações acima do lençol freático são de caráter redutor, com captura de elétrons das substâncias dissolvidas próximas ao corpo mineralizado, graças a presença de um pH mais ácido e a existência de oxigênios livres em abundância (Orellana, 1972). As reações de redução nesse ponto são da seguinte maneira:



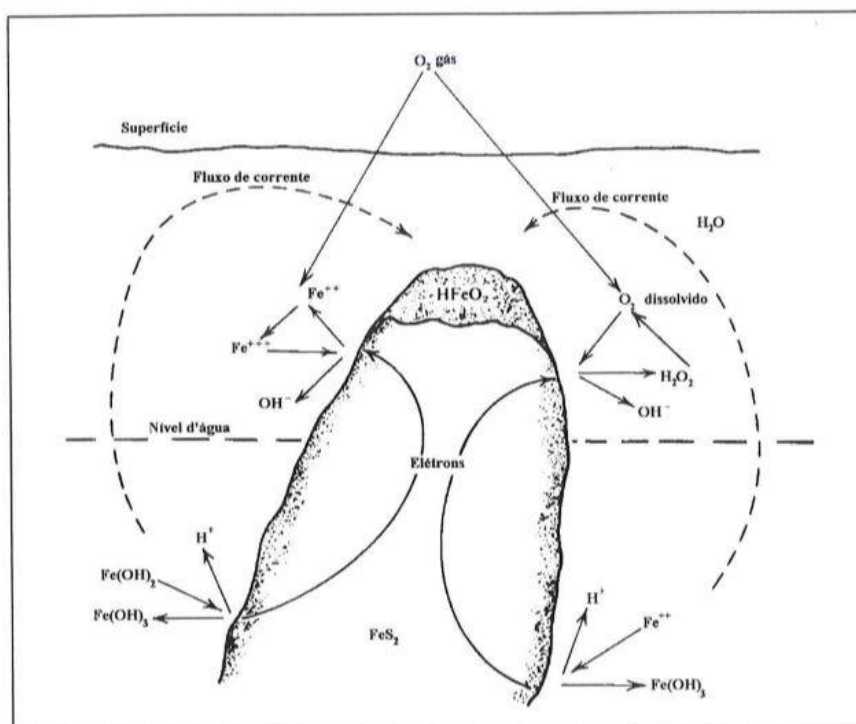
Já abaixo do nível freático, ocorre o processo de oxidação, assim as substâncias próximas ao corpo mineralizado cedem elétrons ao corpo, segundo a reação:



Portanto, a diferença do valor do potencial redox gera uma corrente elétrica entre a zona saturada e a zona não saturada, e todo o funcionamento das reações acima está ligada com os elétrons que utilizam o corpo condutor para se

locomover. Segundo Orellana (1972), é necessário que a rocha encaixante esteja alterada, facilitando a passagem dos íons no seu interior, caso contrário, a compactação elevada não permite o fenômeno do potencial espontâneo.

**Figura 5.3.1.1:** Mecanismo esquemático do SP em mineralização de pirita ilustrando o fluxo de íons e elétrons que tornam a parte superior negativamente carregada e a inferior positivamente.



**Fonte:** original de Sato & Mooney, 1960.

### 5.3.2 Potencial de Difusão

O potencial de difusão é uma teoria que tenta explicar as origens e aplicações do método do potencial espontâneo em áreas distintas da prospecção mineral, como a hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental.

A base dessa teoria é fundamentada na existência de diferenças de concentração de um mesmo eletrólito nos poros do substrato ou quando diferentes eletrólitos em contato (Gallas, 2000).

Como os íons de sinais opostos apresentam mobilidade diferentes, os mais móveis se propagam com maior velocidade, enquanto que os menos móveis se

difundem de maneira mais lenta, o resultado é a formação de regiões compostas de íons de sinais opostos.

A criação de duas zonas de sinais opostos resulta no estabelecimento de um diferencial de potencial  $\Delta V$  (d.d.p). É possível expressar essa diferença de potencial através da seguinte maneira:

$$\Delta V = \frac{u - v}{u + v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2}$$

onde:  $u, v$  = mobilidade dos cátions e ânions.

$n$  = valência dos íons.

$R = 8,314$  joules/mol.K (constante de gases).

$T$  = temperatura absoluta (°K).

$F = 96.487$  Coulombs/mol (constante de Faraday).

$C_1, C_2$  = concentrações dos eletrólitos em contato.

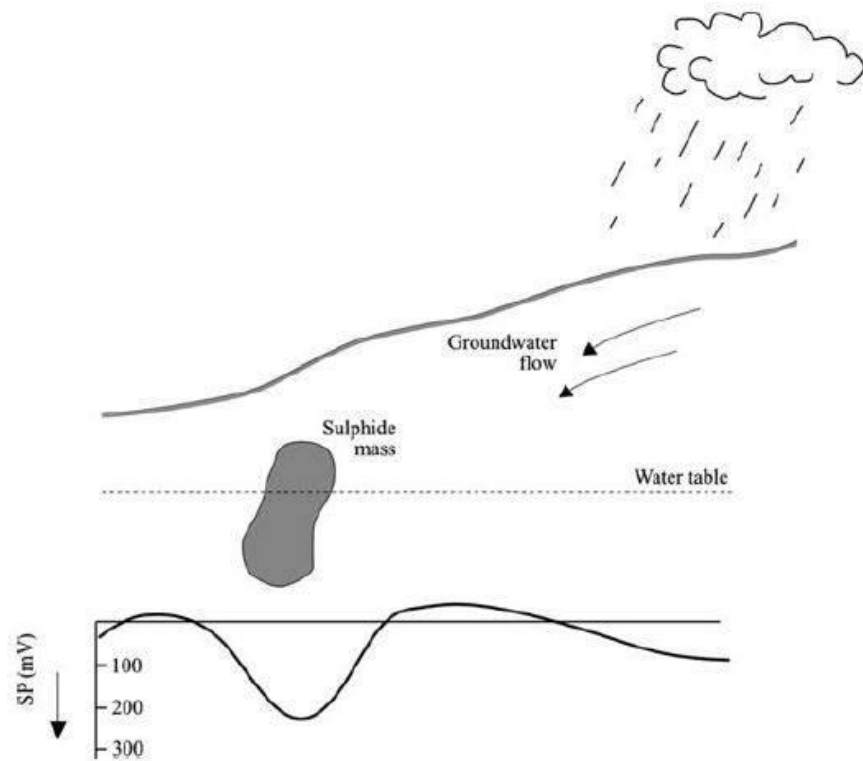
O potencial de difusão possui grande importância e uso em perfilagens elétricas de poços, nas quais as condições dos eletrólitos contidos na rocha alvo encontra-se em contato com a lama da sondagem. Assim, neste caso, a técnica permite encontrar a porosidade das litologias próximas (Gallas, 2005).

### **5.3.3 Potencial de Fluxo (*Streaming Potential*)**

O potencial de fluxo é a teoria com maior interesse em aplicações de hidrogeologia, geologia de engenharia e questões ambientais que envolvam o método do potencial espontâneo, auxiliando no mapeamento de divisores de água, direção de fluxo e na detecção dos caminhos da água subterrânea (Gallas, 2000).

A base dessa teoria é a criação do potencial pelo movimento de fluídos em subsuperfície. Neste caso, o substrato, por ser poroso, atuaria como uma espécie de membrana por onde passariam as águas subterrâneas. Esta membrana atuaria selecionando os íons, os ânions são absorvidos pelas paredes da estrutura e irão atrair os cátions, gerando uma dupla camada elétrica, que nada mais é que uma diferença de potencial entre os dois lados da membrana (Figura 5.3.3.1).

**Figura 5.3.3.1:** Esquema do potencial de fluxo.



**Fonte:** MILSOM, J.; ERIKSEN, A., 2011.

A diferença de potencial nessa teoria é expressa pela equação de Helmholtz, vista a seguir:

$$\Delta V = \frac{\zeta \epsilon P}{\eta \sigma}$$

onde:  $\zeta$  = diferença de potencial na dupla camada.

$\epsilon$  = constante dielétrica.

$\sigma$  = condutividade.

$\eta$  = viscosidade do eletrólito.

$P$  = diferença de pressão hidrostática entre os extremos do capilar – responsável pelo movimento do eletrólito.

Devido ao fato do potencial de fluxo estar ligado com o movimento de fluídos, em áreas com consideráveis zonas de fraturas e/ou falhas, solos

arenosos, litologias bastante porosas ou topografias acidentadas é mais comum ocorrer o fenômeno (Gallas, 2000).

Segundo Orellana (1972), os potenciais de fluxo podem ser classificados em dois tipos: “per ascensum” ou “per descensum”.

O potencial de fluxo de maior destaque é o “per descensum”, que é basicamente a infiltração das águas da chuva em terrenos com boa permeabilidade ou ao longo de fraturas e falhas.

O movimento da água faz com que os cátions sejam removidos do solo ou rocha, e, devido a topografia, em regiões mais elevadas topograficamente ocorre o aparecimento de concentrações eletricamente negativas.

#### 5.4 METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS

A metodologia utilizada na coleta de dados do método do potencial espontâneo é dividida em duas técnicas: (1) a técnica dos potenciais e (2) a técnica dos gradientes, sendo a primeira a mais recomendada e praticada, tendo sido usada nessa pesquisa.

Em ambas as técnicas são utilizados eletrodos não-polarizáveis, cabos condutores e milivoltímetro. Este último necessita ter elevada impedância de entrada (de preferência maior que  $10^8 \Omega$ ), precisão de pelo menos 1mV nas leituras e capaz de medir resistências de contato.

Os eletrodos não-polarizáveis, por sua vez, são preenchidos por uma solução de sulfato de cobre e possuem base porosa, normalmente uma cerâmica, facilitando o contato lento e controlado da solução do eletrodo com o solo. O eletrodo possui ainda uma haste de metal para conectar a linha receptora do sinal acoplada ao carretel e depois ao milivoltímetro.

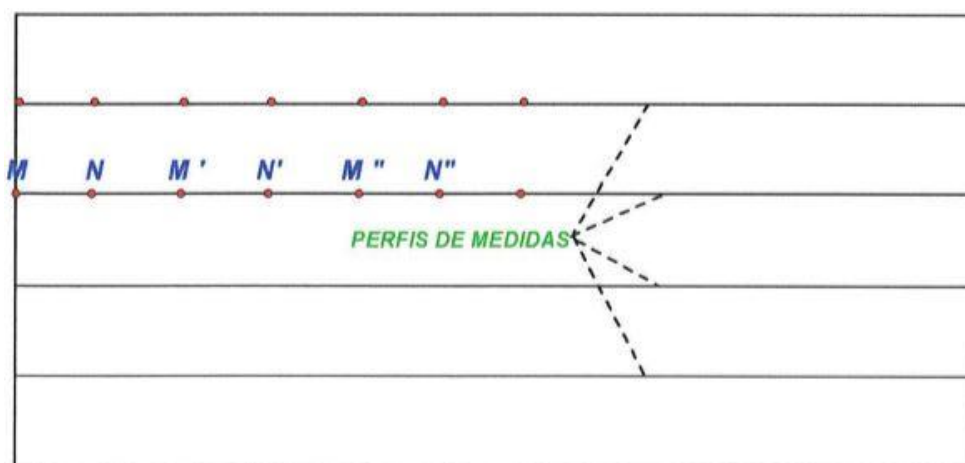
É importante utilizar apenas um par de eletrodos para a realização do trabalho, visando diminuir o erro cumulativo. No início e no final do trabalho, mede-se os valores obtidos no eletrodo base (fixo) para dividir a diferença entre os valores inicial e final entre todos os outros dados coletados, amortizando o erro.

### 5.4.1 Técnica dos Gradientes (ou eletrodos móveis)

Segundo Telford et al. (1990), a técnica dos gradientes é baseada na medida sucessiva das diferenças de potencial entre dois pontos contíguos em um perfil, através de dois eletrodos ligados ao milivoltímetro.

Após a primeira medida entre os pontos, todo o arranjo é deslocado no perfil previamente estabelecido e são realizadas outras medidas a intervalos regulares e iguais, como mostra a Figura 5.4.1.

**Figura 5.4.1:** Esquema da técnica dos gradientes.



**Fonte:** Gallas, 2000.

As vantagens do método estão relacionadas com a operação. Por se tratar de uma configuração mais próxima entre os eletrodos necessita de fios mais curtos, sendo assim mais fácil e rápido o deslocamento do arranjo. Porém, por não dispor de um eletrodo base (fixo), o erro acumulativo tende a ser maior nesse arranjo, sendo alta a probabilidade do aparecimento de anomalias indesejadas (Gallas, 2000).

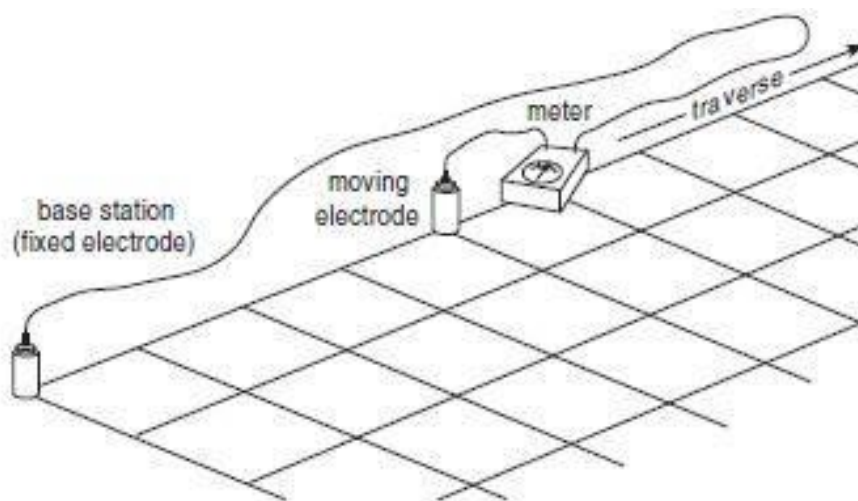
Outras causas de erros acumulativos são os efeitos de polarização dos eletrodos com o tempo, porém é possível minimizar o erro através da inversão dos eletrodos. No entanto, nessa metodologia os outros erros são praticamente impossíveis de se corrigir (Telford et al., 1990)

### 5.4.2 Técnica dos Potenciais (ou base fixa)

A técnica dos potenciais, diferentemente da técnica dos gradientes, opera com um dos eletrodos fixos em uma espécie de estação base, próxima ao aparelho de medida. O outro eletrodo, por sua vez, percorre toda a malha de levantamento ponto após ponto.

Esta primeira informação já evidencia que uma das vantagens encontrada na técnica anterior não se adequa aqui. Na técnica dos potenciais, o cabo de conexão, acoplado ao eletrodo móvel que realizará a coleta ponto a ponto, deve ter no mínimo o comprimento do perfil a ser levantado, ou seja, requer-se muito mais cabo (Figura 5.4.2.1).

**Figura 5.4.2.1:** esquema do arranjo da técnica dos potenciais.

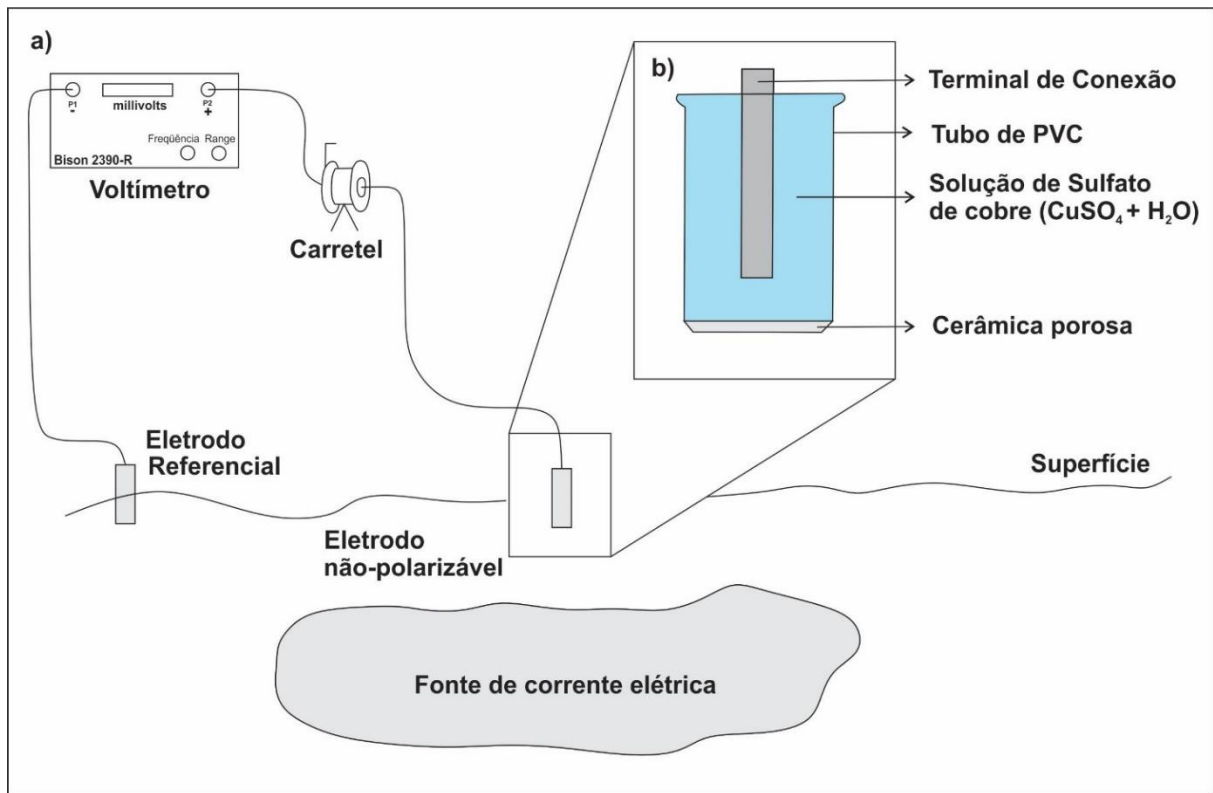


**Fonte:** MUSSET, A.E; KHAN, M. A., 2000.

Toda a coleta dos dados é realizada da seguinte maneira: um dos eletrodos permanece fixo, próximo à estação base e conectado ao milivoltímetro. O outro eletrodo, chamado de “móvel”, é conectado na linha de transmissão, que está ligada na outra entrada do equipamento receptor (Figura 5.4.2.2)

A grande vantagem desse método é a diminuição do erro cumulativo, uma vez que a base permanece fixa, diminuindo possíveis alterações nos valores coletados. Assim, a possibilidade de medir anomalias causadas por ruídos “espúrios” é consideravelmente inferior se comparada com a técnica anterior (Gallas, 2005).

**Figura 5.4.2.2:** Esquema da coleta de dados pela técnica dos potenciais (base fixa). **a)** arranjo da estação base ligada ao eletrodo fixo e ao eletrodo móvel. **b)** detalhamento para o eletrodo não-polarizável.



Fonte: o autor.

## **6. AQUISIÇÃO DE DADOS**

### **6.1 TRABALHO PRÉ-CAMPO**

Anteriormente a coleta de dados nas barragens de terra propriamente mencionadas, foram realizados dois ensaios geelétricos na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Campus de Rio Claro – SP, a fim de se proceder um treinamento na operação dos equipamentos e de técnicas de campo a serem utilizadas para diminuir eventuais erros.

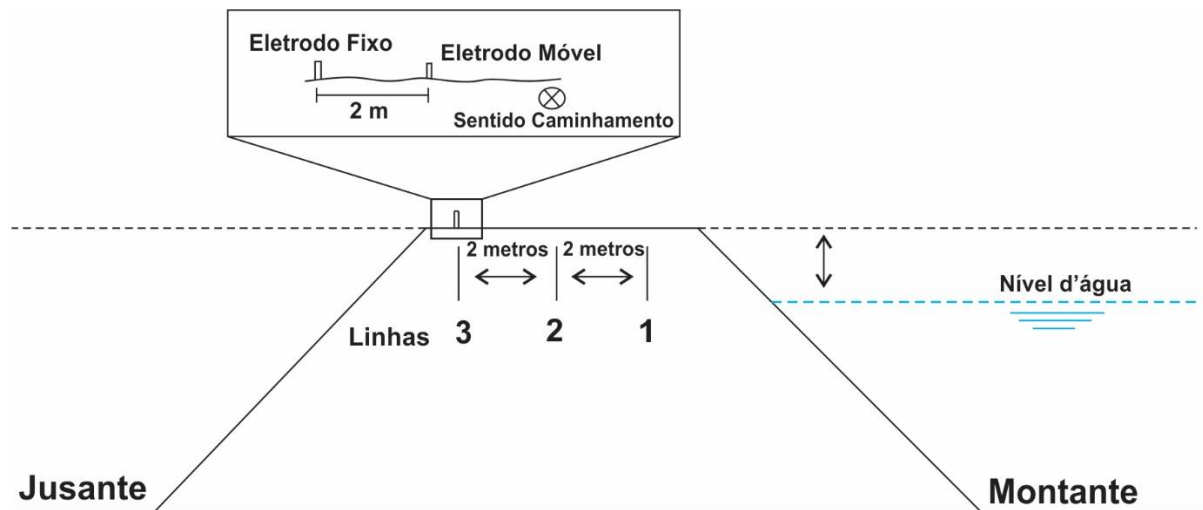
Realizou-se também uma visita nas barragens de Cordeirópolis e Ipeúna – SP com o intuito de conhecer a área e acessos e organizar toda a logística de equipamentos necessária.

### **6.2 TRABALHO DE CAMPO**

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 como mostra a Figura 6.2.1.

**Figura 6.2.1:** Esquema da coleta de dados em ambas as barragens.



Fonte: Dados da pesquisa.

### 6.2.1 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 6.2.1.1).

As linhas foram dispostas na parte alta da crista da barragem, sendo que a linha 1 localiza-se mais próxima à montante do barramento, enquanto que a linha 3 mais próxima à jusante; por fim, a linha 2 encontra-se entre as outras duas (Figura 6.2.1.2).

**Figura 6.2.1.1:** Localização das linhas de SP na barragem de Cordeirópolis – SP.



**Fonte:** adaptado do Google Earth 2017.

**Figura 6.2.1.2:** Esquema de localização das linhas de SP na barragem de Cordeirópolis – SP.



**Fonte:** arquivo pessoal.

## 6.2.2 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 6.2.2.1).

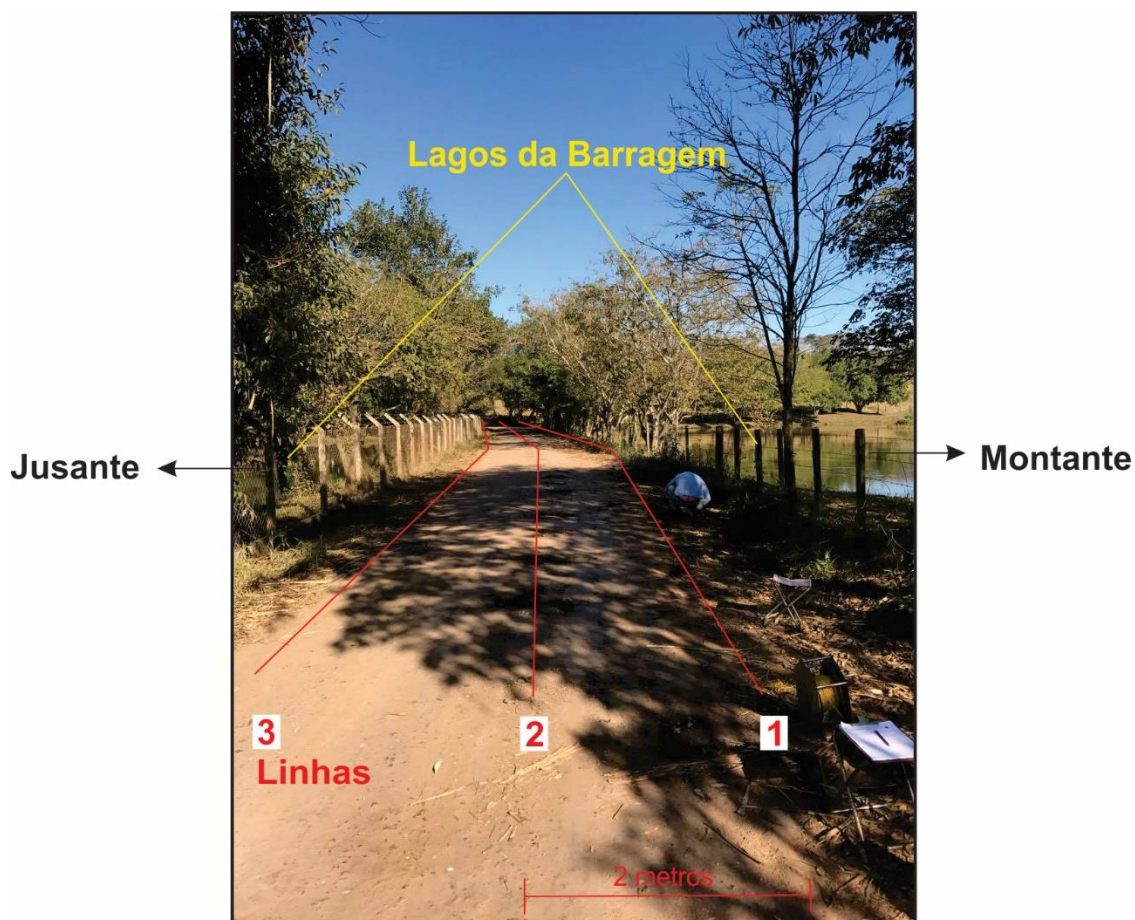
**Figura 6.2.2.1:** Esquema de localização das linhas de SP na barragem de Ipeúna – SP.



**Fonte:** adaptado do Google Earth 2017.

A barragem de Ipeúna possui uma crista menos larga que a barragem de Cordeirópolis, mesmo assim, a fim de se manter um padrão, foi possível realizar 3 linhas na parte alta da crista, com a linha 1 mais próxima ao reservatório 1, a linha 3 mais próxima ao reservatório 2 e a linha 2 entre elas como mostra a Figura 6.2.2.2.

**Figura 6.2.2.2:** Esquema das linhas de SP na barragem de Ipeúna – SP.



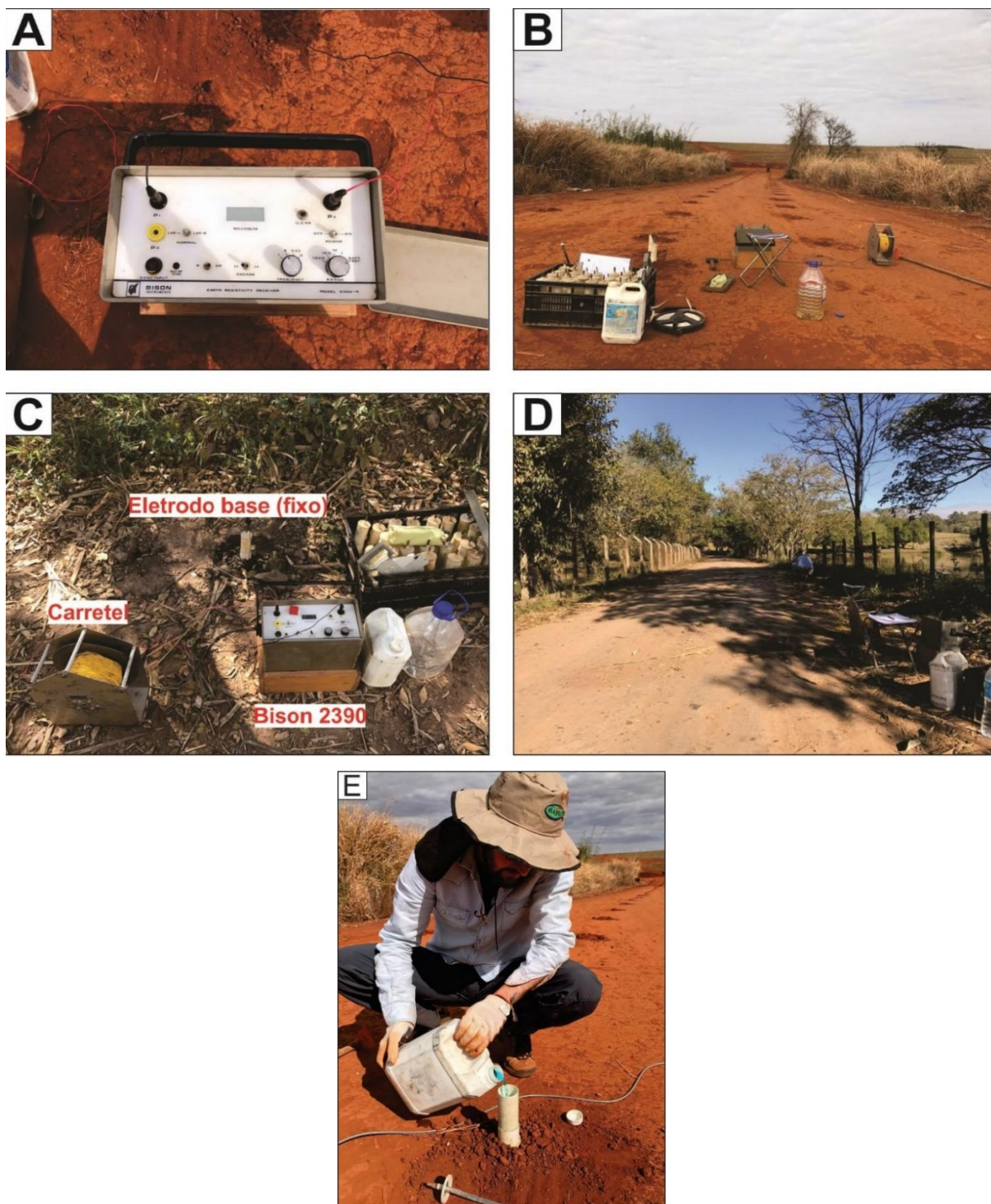
**Fonte:** arquivo pessoal.

Em ambas as barragens o equipamento utilizado para a coleta de dados foi o mesmo, o módulo de medição de potencial do resistivímetro BISON 2390.

A aquisição de dados tanto na barragem de Cordeirópolis- SP como em Ipeúna- SP foi realizada com dois eletrodos não-polarizáveis preenchidos de solução aquosa de sulfato de cobre, um deles servindo de eletrodo base (fixo) enquanto o outro era itinerante.

Devido as condições do solo estarem bastantes secas, foi necessário reabastecer o eletrodo com solução de tempo em tempo, caso contrário o equipamento não conseguia captar o sinal emitido e realizar a leitura.

**Figura 6.2.2.3:** Etapas da preparação do ensaio de SP. **a)** equipamento BISON 2390 previamente carregado. **b)** covas feitas com igual espaçamento entre si e linhas paralelas. **c)** estação de coleta pronta **d)** eletrodo móvel em operação. **e)** reabastecendo os eletrodos não-polarizáveis com sulfato de cobre de tempo em tempo.



Fonte: arquivo pessoal

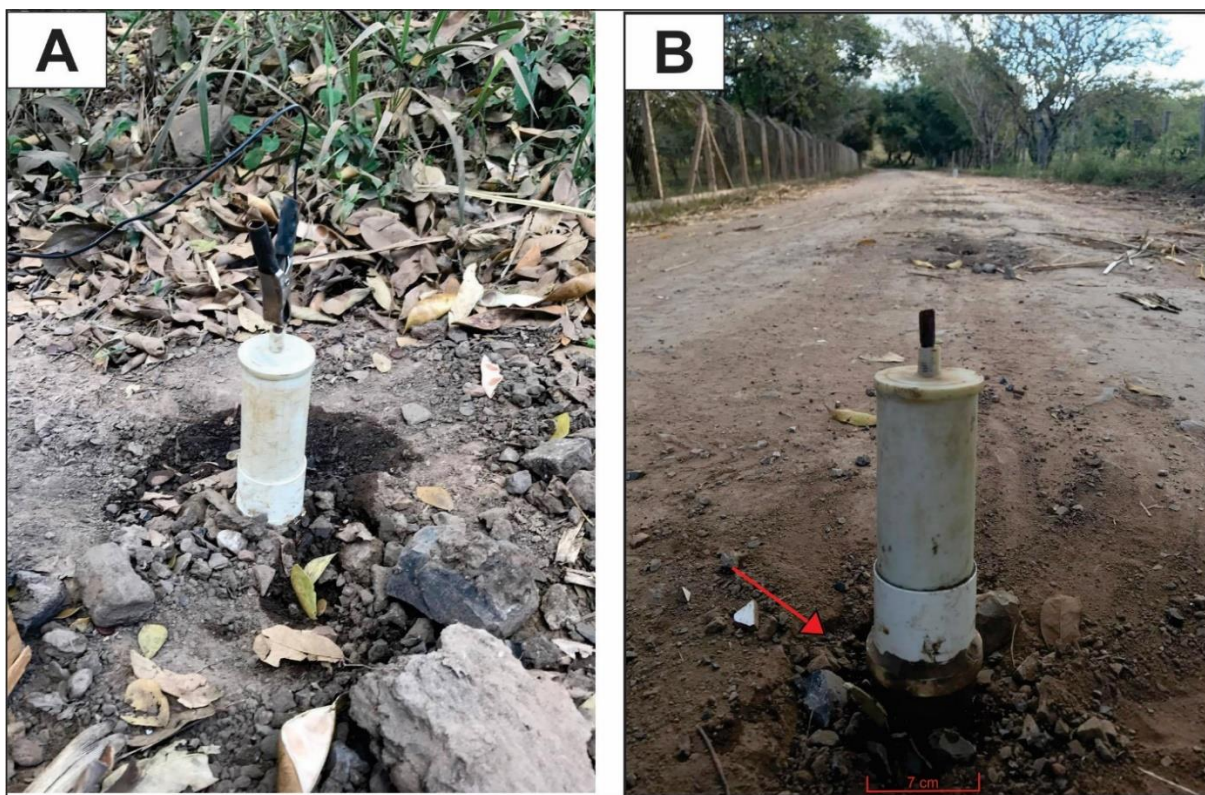
### 6.3 PROCEDIMENTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O método do potencial espontâneo apresenta oscilações nos valores medidos causadas, principalmente, pela mudança do eletrodo de um ponto ao outro. As variações na compactação do solo, da condutividade e da umidade de ponto a ponto interferem na qualidade dos dados obtidos (Gallas, 2000).

Com o intuito diminuir essa limitação, o eletrodo foi acoplado em uma pequena cova, diminuindo, portanto, o contato com a parte superior do solo, normalmente, mais seca e evitando também as variações de temperaturas que podem afetar o método.

Outra técnica utilizada, foi a inserção constante de água no solo. Umedecer o solo proporciona condições mais homogêneas e resultaram em uma maior facilidade na estabilização dos valores por parte do equipamento em ambas as barragens (Figura 6.3)

**Figura 6.3:** esquema dos eletrodos. **a)** eletrodo bastante umedecido ao redor. **b)** detalhe na seta vermelha para a cova a qual o eletrodo foi acoplado.



Fonte: arquivo pessoal.

## 7. 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.

Nessa etapa é necessário cuidado com o manuseio dos dados, uma vez que uma interpolação errada pode retirar anomalias SP presentes na área ou ainda criar anomalias que não são verdadeiras.

O programa dispõe de vários métodos para projetar a malha de interpolação, definindo limites máximos e mínimos, além do espaçamento entre os pontos ou número de linhas tais como a Krigagem, Mínima Curvatura, Distância a Potência (*Inverse Distance to a Power*), entre outros (Surfer, 1999).

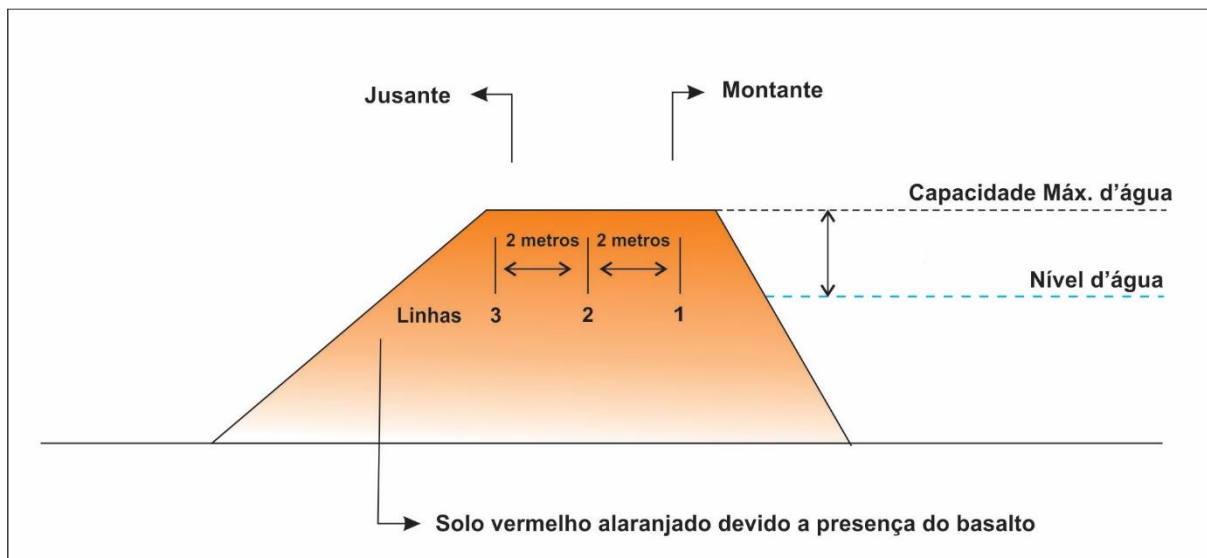
Na confecção dos mapas deste projeto optou-se por utilizar o método da Krigagem, uma vez que os valores de diferença de potencial coletados quando gerados por esse método foram capazes de realçar os extremos, enquanto que o método da Mínima Curvatura suavizou os extremos, ilustrando curvas de SP bastante agudas, criando, em alguns casos, anomalias que não eram reais.

Os valores da diferença de potencial são coletados com o milivoltímetro, portanto são expressos em mV, e representados em uma escala cromática que ilustra a variação dos valores obtidos.

### 7.1 BARRAGEM DE CORDEIRÓPOLIS - SP

Os resultados do potencial espontâneo foram classificados de acordo com as linhas de aquisição: em linha 1, linha 2 e linha 3. Foram coletados 234 metros de dados de diferença de potencial ao longo da barragem, que cobriram toda a área do barramento, dividindo-se em montante, crista e jusante (Figura 7.1.1).

**Figura 7.1.1:** Esquema do arranjo das linhas do potencial espontâneo em corte transversal a barragem em Cordeirópolis.



**Fonte:** o autor.

Na figura 7.1.2 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.

É possível notar ainda uma região, mais precisamente entre os pontos de 58 e 60 metros de distância do início da linha, que apresentam os maiores valores positivos de diferença de potencial. Vale ressaltar que essa região coincide com a presença de um vertedouro de concreto na estrutura da barragem (Ponto **A** na Figura 7.1.2).

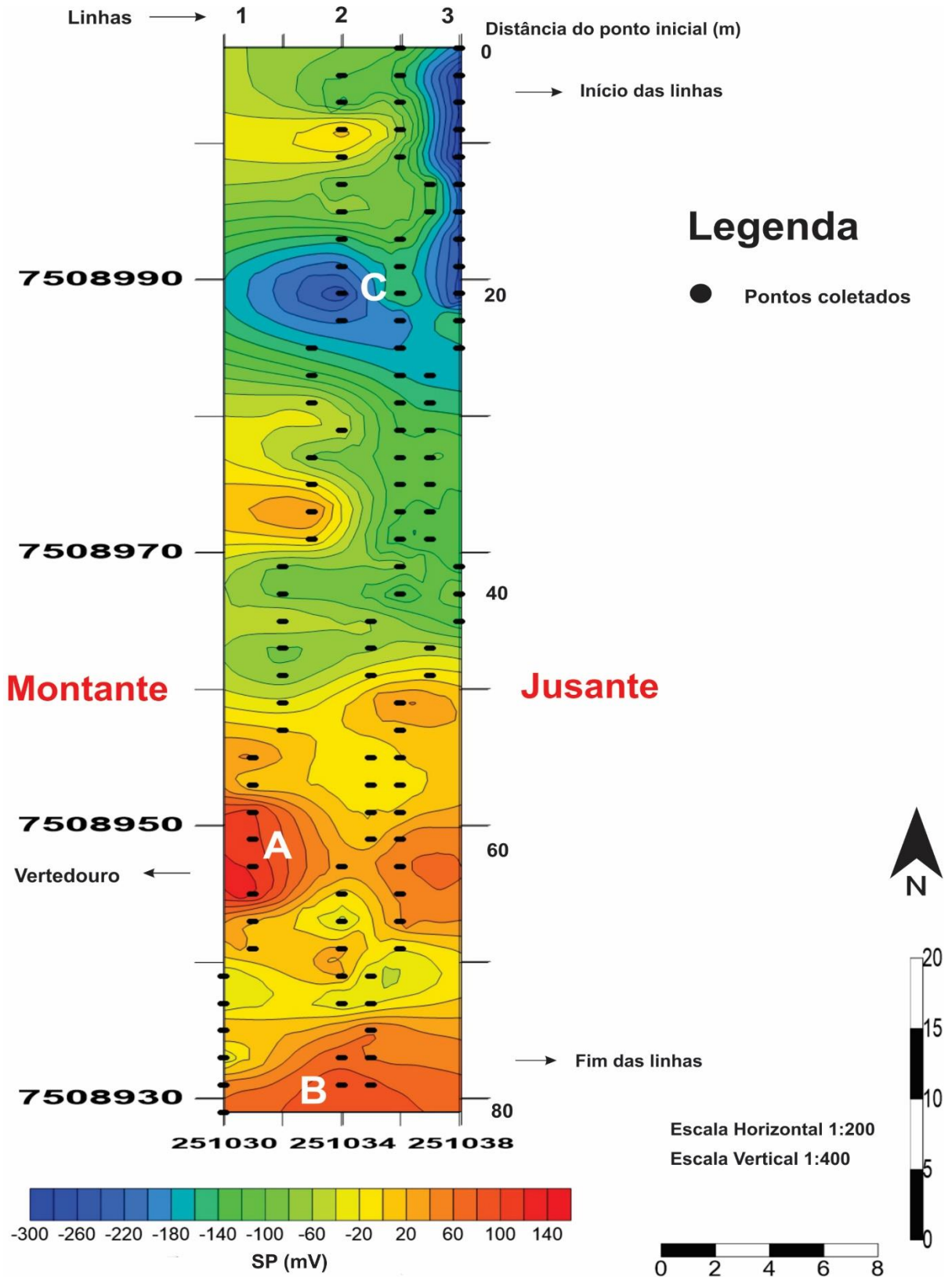
Entretanto, o vertedouro encontrava-se fechado, não havendo percolação de água nele no sentido do montante para jusante, porém, como a estrutura atravessa a barragem de maneira transversal, mesmo que seco, pode apresentar registro nos valores coletados.

Continuando a análise dos valores positivos elevados que se destacam, próximo aos marcos de 74 e 76 metros de distância do ponto inicial das linhas, é possível identificar valores de aproximadamente 100mV, possivelmente graças a

presença dos blocos/matacões de basalto encontrados justamente nesse local (Ponto **B** na Figura 7.1.2).

Outro fator que se destaca no mapa obtido é uma grande concentração de valores negativos entre -200mV e -250mV ao norte do barramento (Ponto **C** na Figura 7.1.2), região a qual iniciaram-se as coletas e, tal padrão de valores negativos foram mantidos no início de todas as linhas.

Figura 7.1.2: Mapa do potencial espontâneo da barragem de Cordeirópolis – SP.

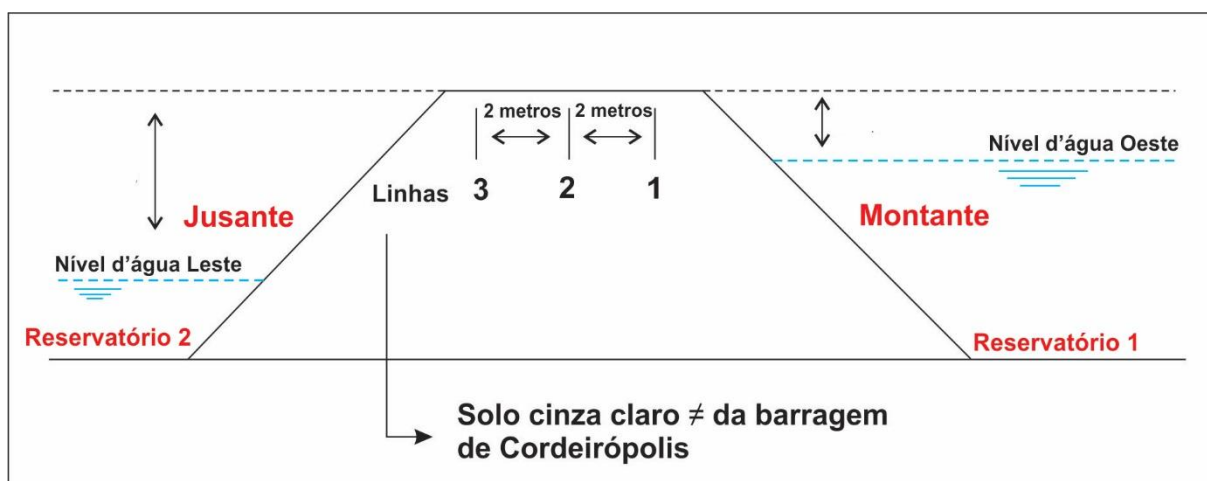


Fonte: Dados da pesquisa.

## 7.2 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. Em Ipeúna, o barramento possui água represada em ambos os lados, tanto a oeste como a leste como mostra a Figura 7.2.1.

**Figura 7.2.1:** Esquema do arranjo das linhas do potencial espontâneo em corte transversal a barragem em Ipeúna.



Fonte: o autor.

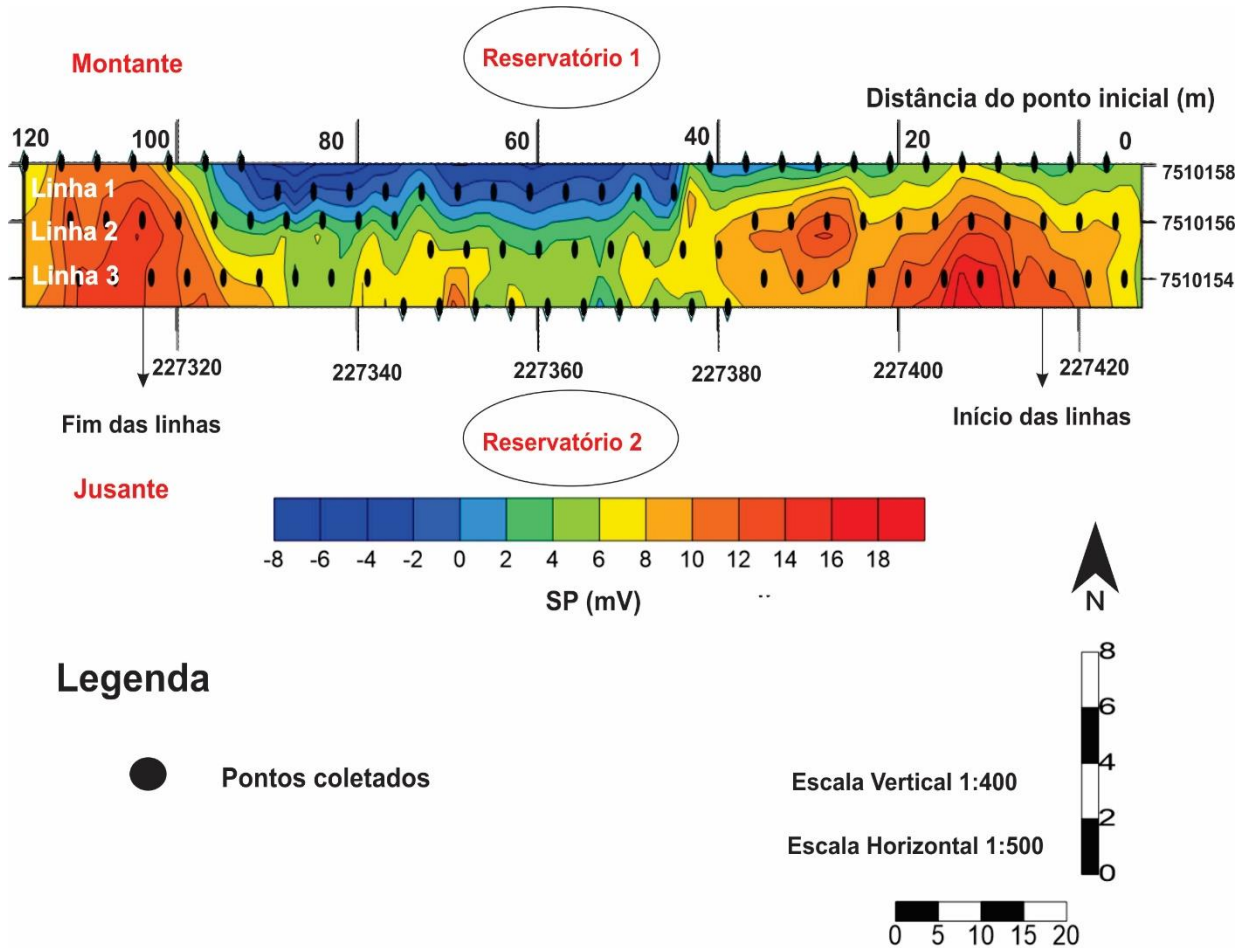
Na figura 7.2.2 é apresentado o mapa do potencial espontâneo resultado da combinação das três linhas de 122 metros cada. No barramento de Ipeúna, por se tratar de uma barragem que represa água em seus dois lados, chama atenção um forte traço de valores negativos de d.d.p na linha 1 entre os pontos de 50 a 100 metros a partir do ponto inicial (Ponto **A** na Figura 7.2.2)

Outra feição no mapa de potencial espontâneo que chama a atenção é um lineamento negativo cruzando a área no sentido norte-sul próximo ao centro da barragem, mais precisamente no ponto de 56 metros de distância do ponto inicial das linhas (Ponto **B** na Figura 7.2.2).

Já em relação aos valores positivos encontrados no mapa do potencial espontâneo da barragem de Ipeúna, existem duas grandes concentrações e ambas

ocorrem nas extremidades da barragem: uma na extremidade Sul e a outra na extremidade Norte. Os valores atingidos nessas duas regiões são de aproximadamente 17mV (Ponto C na Figura 7.2.2).

**Figura 7.2.2:** Mapa do potencial espontâneo na barragem de Ipeúna – SP.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

De modo geral, os resultados coletados na barragem de Ipeúna possuem valores relativamente baixos, variando de  $-8\text{mV}$  a  $18\text{mV}$ , com predominância de valores positivos nas áreas onde terminam os reservatórios. Além do grande lineamento negativo de aproximadamente 30 - 40 metros na linha 1, que merece destaque.

## 8. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### 8.1 BARRAGEM DE CORDEIRÓPOLIS – SP

Na barragem de Cordeirópolis, a primeira característica que rapidamente chama a atenção é a coloração do solo e do material que estrutura a barragem. Todo o barramento está localizado em uma região marcada pela Formação Serra Geral, composta por rochas ígneas básicas, como basaltos, e devido as características físico-químicas dessa litologia era esperado encontrar algumas características clássicas dessa litologia no mapa final do potencial espontâneo.

As rochas ígneas básicas apresentam resistividade entre 100 – 10.000  $\Omega\text{m}$ , ou seja, se comparado com outras litologias como xistos argilosos, que possuem resistividade elétrica entre 20 –  $10^4$   $\Omega\text{m}$ , os basaltos possuem elevada resistividade elétrica, portanto, dificultam a passagem da corrente elétrica no seu interior (Figura 8.1.1).

**Figura 8.1.1:** Quadro da resistividade elétrica de rochas clássicas.

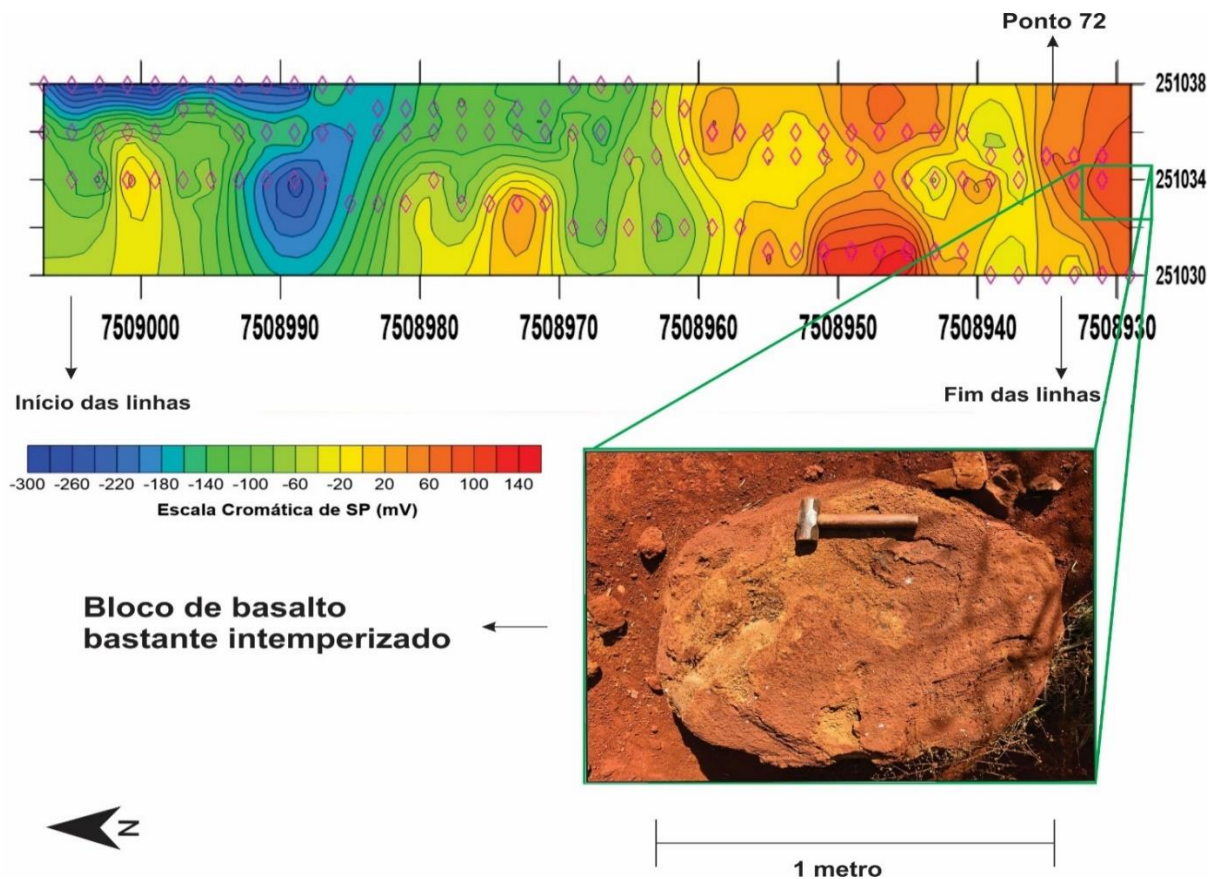
<b>Rocha</b>	<b>Resistividade (ohm.m)</b>
Granito	$4,5 \times 10^3$
Gabro	$10^3 - 10^6$
Xisto	$20 - 10^4$
Argilito	10 – 800
Argila (úmida – seca)	1 – 100

**Fonte:** TELFORD et al, 1990.

O mapa do potencial espontâneo ilustra a diferença de potencial (d.d.p) presente no material analisado. A diferença de potencial, medida pelo milivoltímetro, pode ser denominada de tensão e corresponde ao trabalho feito para deslocar cargas elétricas entre dois pontos. Assim, quanto maior a resistividade elétrica de um material, maior será o trabalho necessário para deslocar as cargas elétricas no seu corpo e, portanto, maior será o valor apresentado no mapa do potencial espontâneo.

Por se tratar de uma barragem de solo laterítico argiloso, resultado da alteração de rochas básicas, era esperado encontrar altos valores de SP na maioria da área, o que de fato ocorreu. O mapa do potencial espontâneo da barragem de Cordeirópolis possui valores bem elevados, justamente no local onde havia a maior concentração de blocos de basalto alterado (após o ponto 72) (Figura 8.1.2).

**Figura 8.1.2:** Mapa do potencial espontâneo com destaque para a região com os maiores valores positivos x localização dos blocos de basalto.



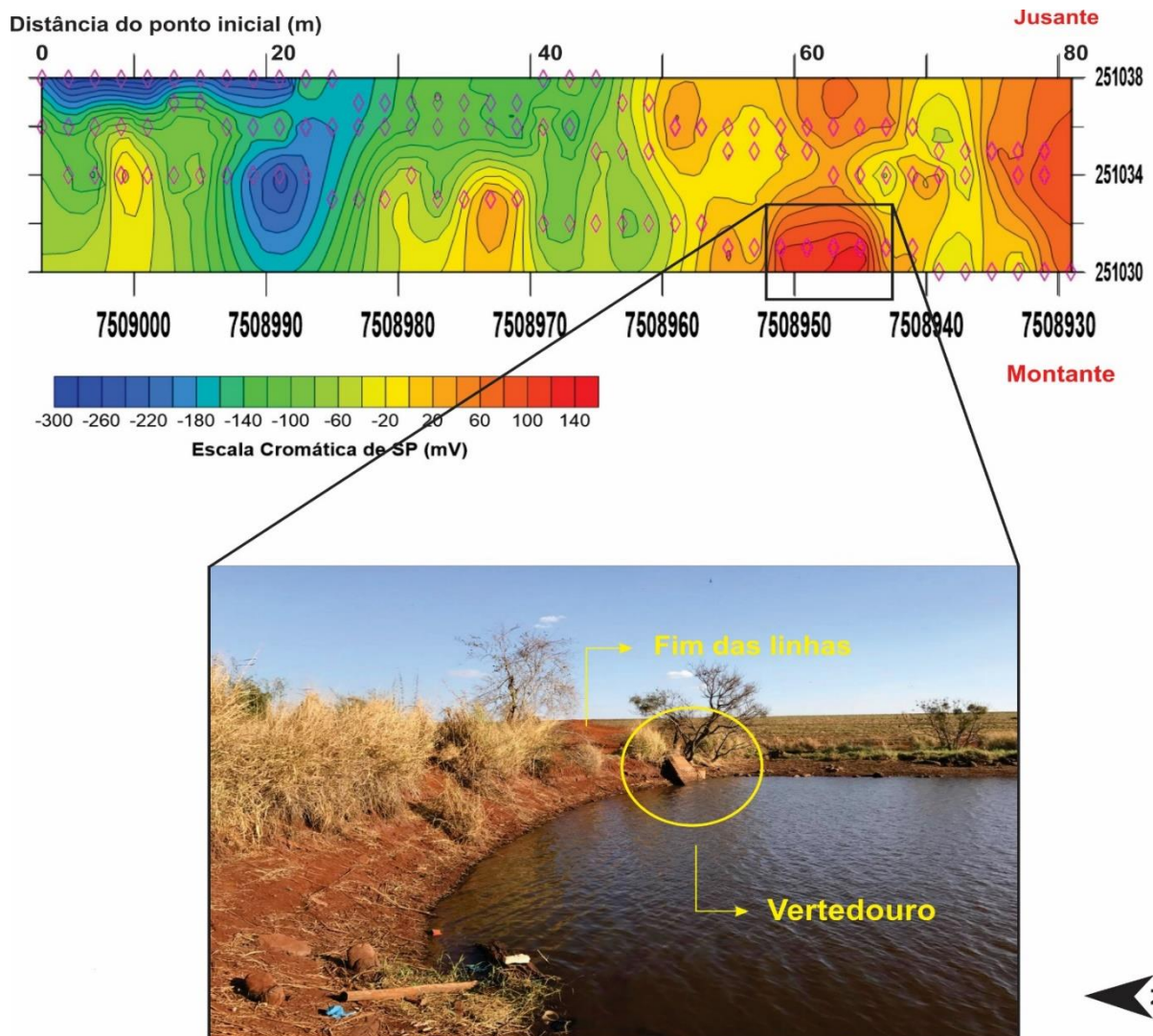
**Fonte:** Dados da pesquisa.

Outro dado importante é a alta concentração de valores positivos com elevada diferença de potencial entre os pontos 58 e 60 metros, mais precisamente no ponto de coordenada 7508947 N 251030 E, essa região marca os maiores valores encontrados na estrutura, variando de 120 a 135mV.

A explicação mais aceita para os altos valores de SP é a presença de um vertedouro na estrutura da barragem. A explicação ganha fundamento já que os altos

valores de SP cortam toda a estrutura do barramento, aparecendo em todas as linhas de medição, como é possível ver na Figura 8.1.3

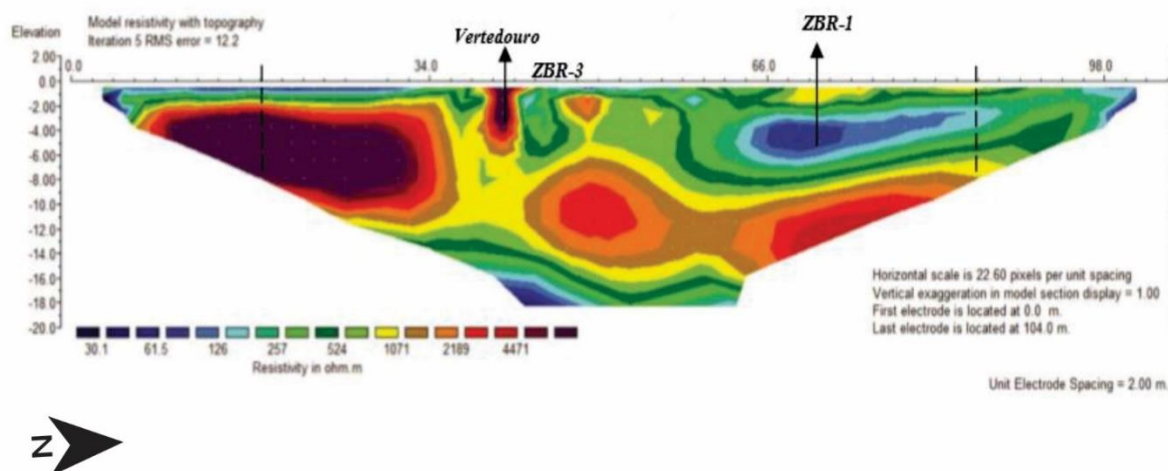
**Figura 8.1.3:** Mapa do potencial espontâneo com foco na região do vertedouro.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

Segundo o trabalho de Camarero (2016), que utilizou o método geoeletrico da eletrorresistividade em 3 linhas de 104 metros cada também na barragem de Cordeirópolis, a região do vertedouro apresentou alta resistividade, bem como a região sul da barragem. Comparativamente, regiões caracterizadas por valores de alta resistividade, apresentam também no mapa do potencial espontâneo valores elevados de d.d.p, fato justificado pela dificuldade que a carga elétrica apresenta em transitar pelo material nesses dois pontos (Figura 8.1.4).

**Figura 8.1.4:** Linha de imageamento elétrico com o método da eletrorresistividade.



**Fonte:** Camarero, 2016.

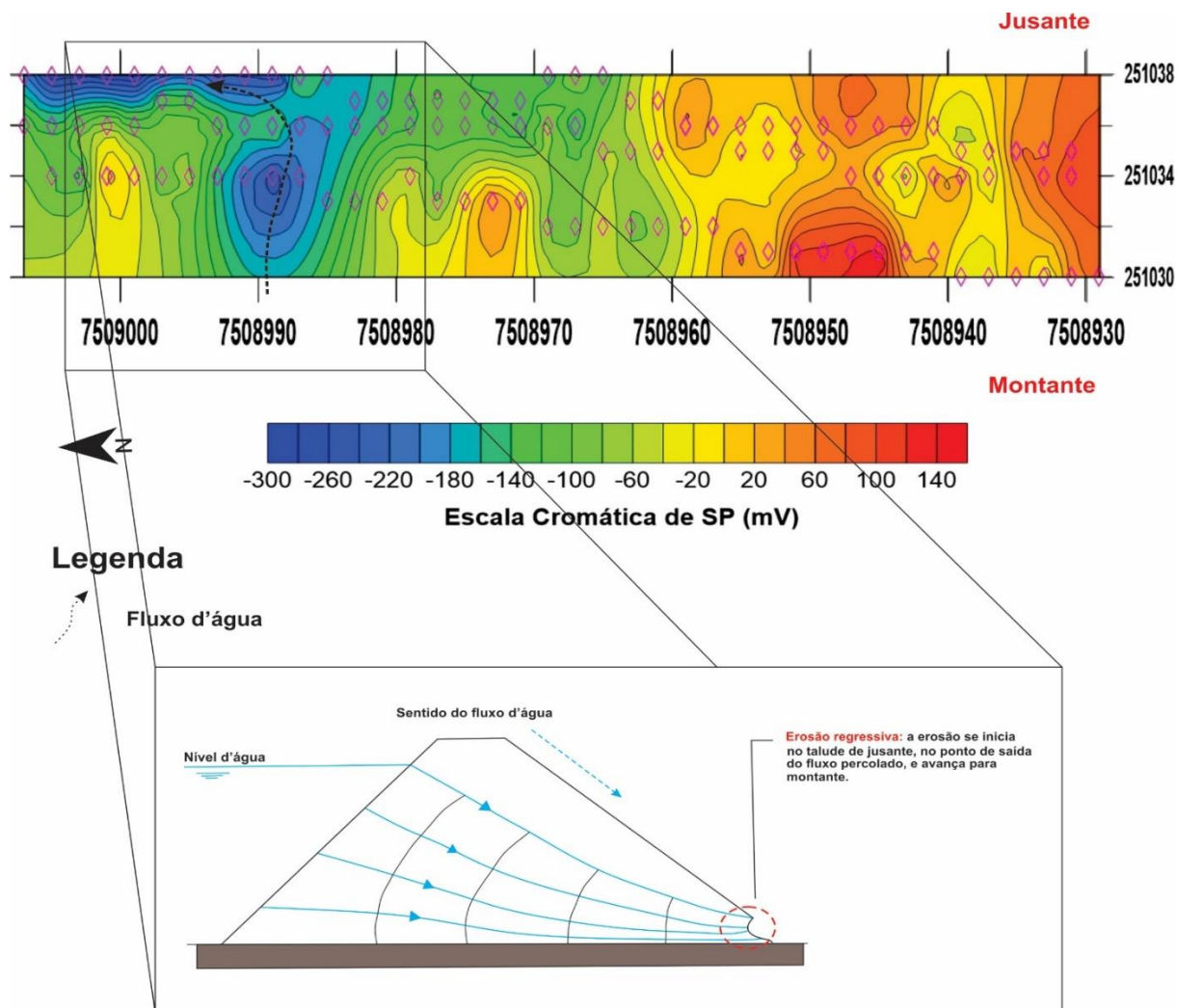
Já a região mais ao norte da barragem, classificada como Zona ZBR-1 no trabalho de Camarero, 2016 (Figura 8.1.4), apresenta valores negativos de diferença de resistividade elétrica, que são condizentes com os valores de potencial espontâneo encontrados nesse trabalho, oscilando entre -140 e -280mV.

O fluxo d'água no corpo do material analisado, normalmente gera valores negativos nos mapas de potencial espontâneo, uma vez que a água apresenta facilidade em trocar cargas elétricas e, justamente por isso, apresenta baixa resistividade.

No caso do barramento de Cordeirópolis, nota-se uma maior concentração de valores negativos a jusante com um caminhamento desses valores no sentido do montante. Justamente por apresentar valores negativos maiores a jusante com uma regressão dos valores a montante pode ter se instalado um processo de *piping* na estrutura da barragem. Este processo erosivo é o mais recorrente em barragens de terra, é classificado como uma erosão interna que se inicia a jusante e caminha para montante devido a infiltração de água na estrutura do barramento.

Na figura 8.1.5, a fim de se ilustrar melhor o evento do *piping*, foi traçado o fluxo d'água no interior da barragem marcando as áreas com maiores valores negativos de diferença de potencial, predominantes a jusante, facilitando assim a observação do decréscimo dos valores para montante, indicando a erosão interna.

**Figura 8.1.5:** Esquema representando um possível fluxo d'água na estrutura da barragem gerando um evento de erosão interna.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

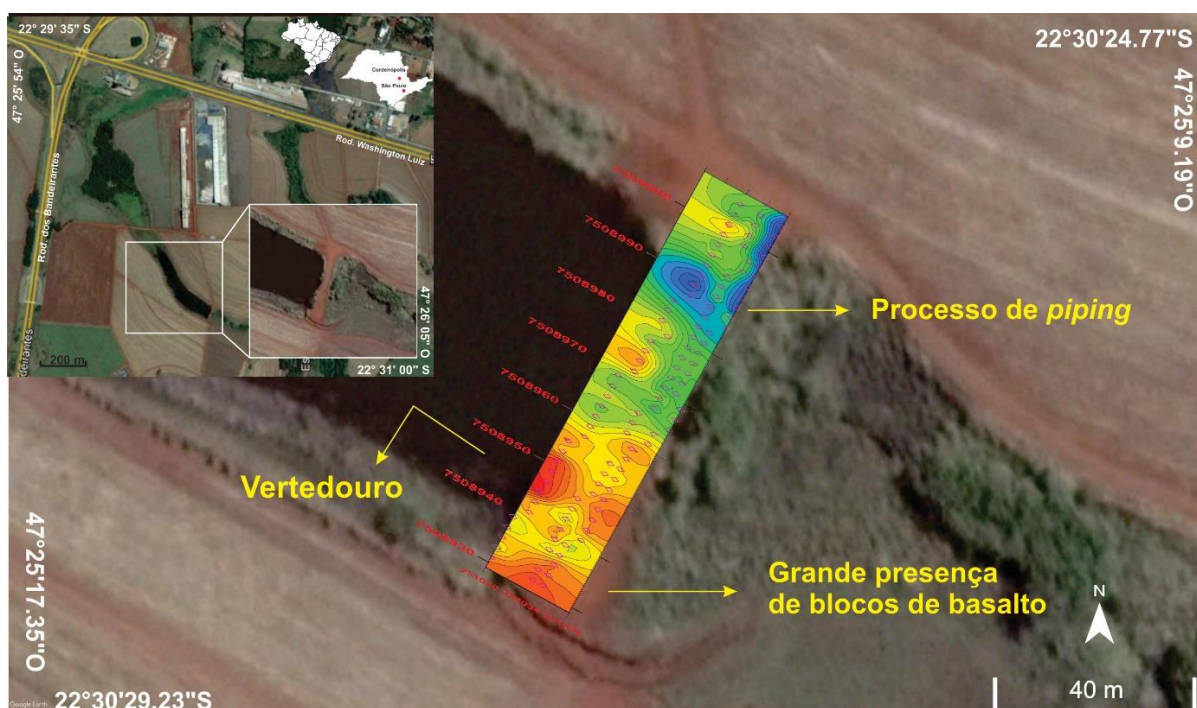
Buscando facilitar a visualização do mapa do potencial espontâneo na barragem de Cordeirópolis, foi sobreposto o mapa na estrutura da barragem (Figura 8.1.6). A figura também ressalta feições utilizadas na interpretação do mapa final, como um possível processo de *piping*, a influência da área com os blocos de basalto e a estrutura do vertedouro, que mesmo seco mostrou alta resistência de diferença de potencial.

Outro ponto importante é comparar o sentido do fluxo do potencial espontâneo com a topografia da região. No caso da barragem de Cordeirópolis, a região com maior topografia coincide com os menores valores de diferença de potencial, enquanto que os maiores valores de d.d.p encontram-se na região mais

baixa topograficamente, o que é condizente, uma vez que o fluxo do potencial espontâneo caminha dos valores menores para os maiores.

Assim, a fim de melhorar a visualização do mapa do potencial espontâneo na área foi sobreposto o mapa final do SP sobre o barramento, como mostra a Figura 8.1.6 abaixo.

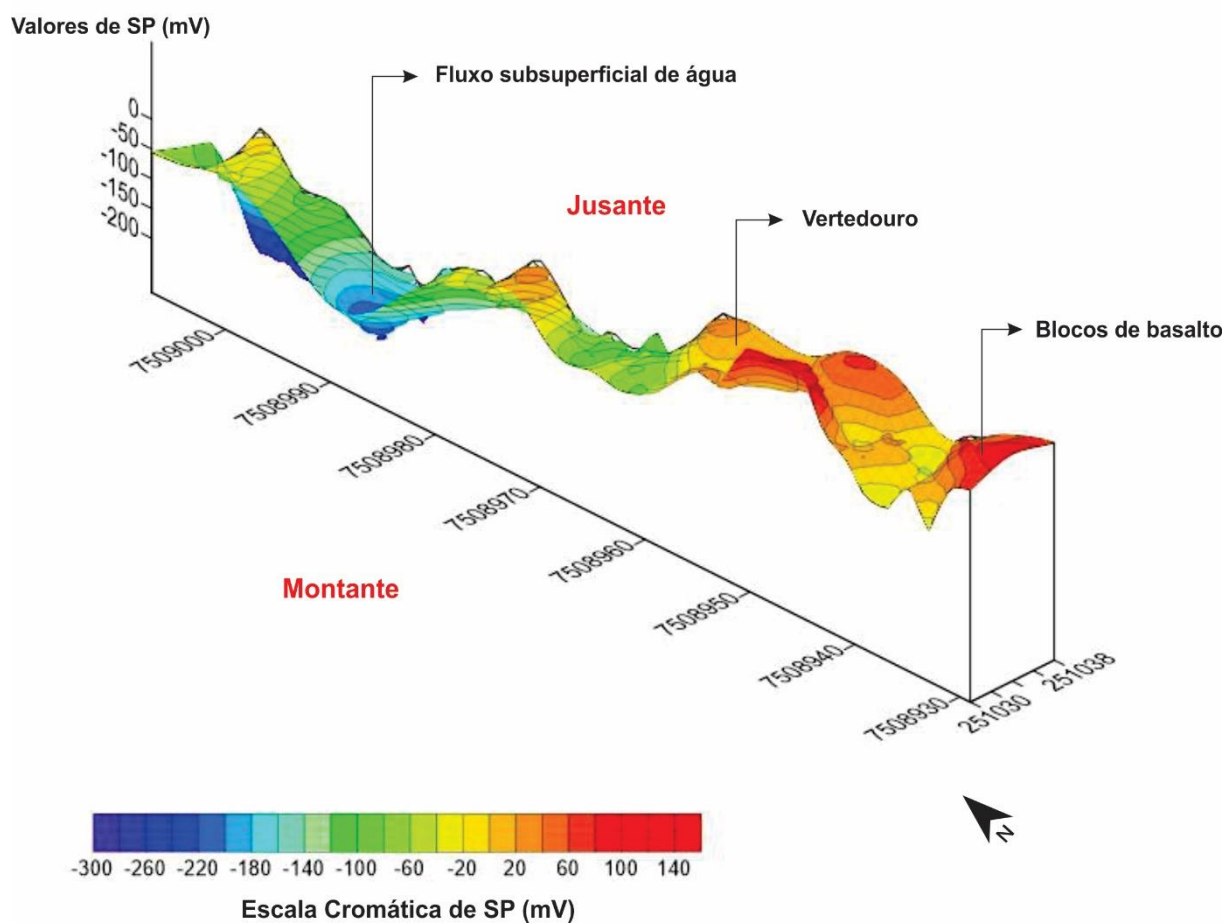
**Figura 8.1.6:** Mapa do potencial espontâneo sobre a estrutura da barragem com indicação de estruturas utilizadas na interpretação dos dados.



**Fonte:** Dados da pesquisa. **Foto:** Alterado do Google Earth Pro 2017.

A fim de melhor elucidar os resultados adquiridos na barragem de Cordeirópolis, foi criado um perfil conjunto representativo das 3 linhas de aquisição, variação dos valores do potencial espontâneo em relação as coordenadas. Dessa maneira, é possível identificar os valores positivos de SP na região Sul do barramento. A região mais a Norte que possui um fluxo subsuperficial de água também é notada com os valores negativos de SP (Figura 8.1.7).

**Figura 8.1.7:** Perfil das 3 linhas de aquisição mostrando a variação do SP x coordenadas, barragem de Cordeirópolis.



Fonte: Dados da pesquisa.

## 8.2 BARRAGEM DE IPEÚNA – SP

Na barragem de Ipeúna, a primeira característica que chama a atenção é a presença de dois reservatórios ao redor da estrutura, ou seja, o barramento separa dois tanques de água utilizados para pesca esportiva.

Outra característica que levantou interesse durante o trabalho de campo é a proximidade do nível da água em relação a superfície de coleta de dados. Em Ipeúna um dos reservatórios apresenta um nível d'água elevado e, como o método do potencial espontâneo é raso, era esperado que essa proximidade entre a crista da barragem onde foram coletados os dados e a superfície d'água aparecessem nos resultados.

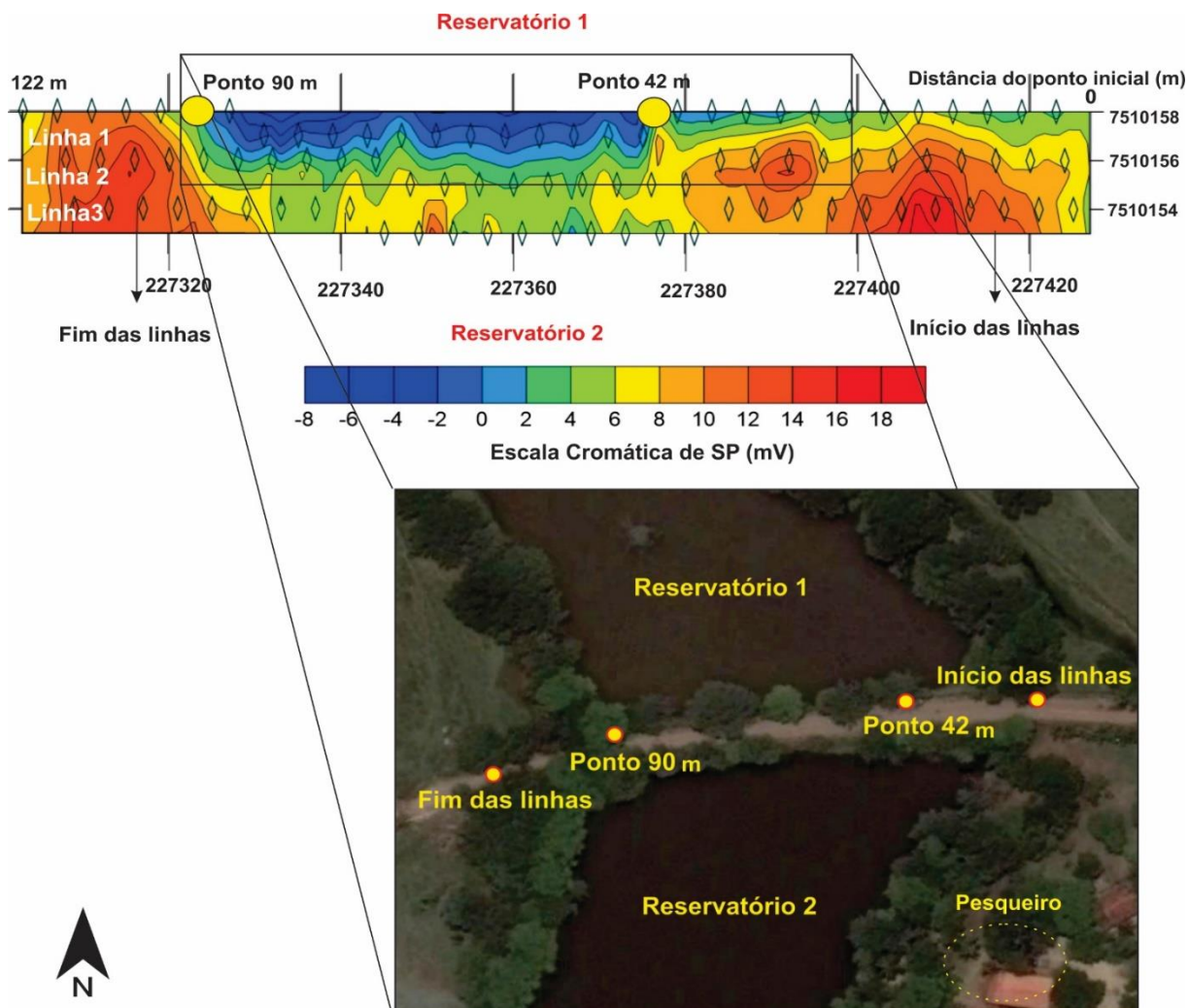
Segundo os estudos de Reynolds (2011) a água possui baixa resistividade (valor entre 10 - 30 $\Omega$ m), logo, a troca de cargas elétricas no material é facilitada e, como o método do potencial espontâneo mensura o trabalho necessário para realizar essas trocas, a água superficial apresentaria baixo valor de diferencial de potencial (d.d.p).

Sabendo-se disso foi possível concluir que a grande faixa de valores negativos constantes (entre -2 a -8mV) de potencial espontâneo encontrado entre os pontos 42 e 90 da linha 1 são resultado da proximidade do nível d'água do reservatório 1, localizado na porção norte da barragem.

Essa teoria ganha respaldo quando se analisa a porção sul da barragem, na linha 3, onde não foram encontrados valores negativos e o nível d'água encontra-se a aproximadamente 2 metros da superfície de coleta de dados, enquanto que na linha 1 essa distância é de apenas 1 metro.

Os valores negativos encontrados na linha 1 podem ser justificados também por uma possível infiltração da água do reservatório 1 na estrutura do barramento, visto que os valores negativos ocorrem por até 2 metros no sentido da borda da barragem ao interior, atingindo em alguns casos valores de 2 a 4mV na linha 2, que corta o centro da crista da barragem (Figura 8.2.1).

**Figura 8.2.1:** Imagem da barragem de Ipeúna (vista de cima) ilustrando os pontos 42 até 90 da linha 1, onde o nível d'água mais próximo a superfície do reservatório 1 gerou influência no mapa do potencial espontâneo.



**Fonte:** Dados da pesquisa. **Foto:** alterado do Google Earth 2017.

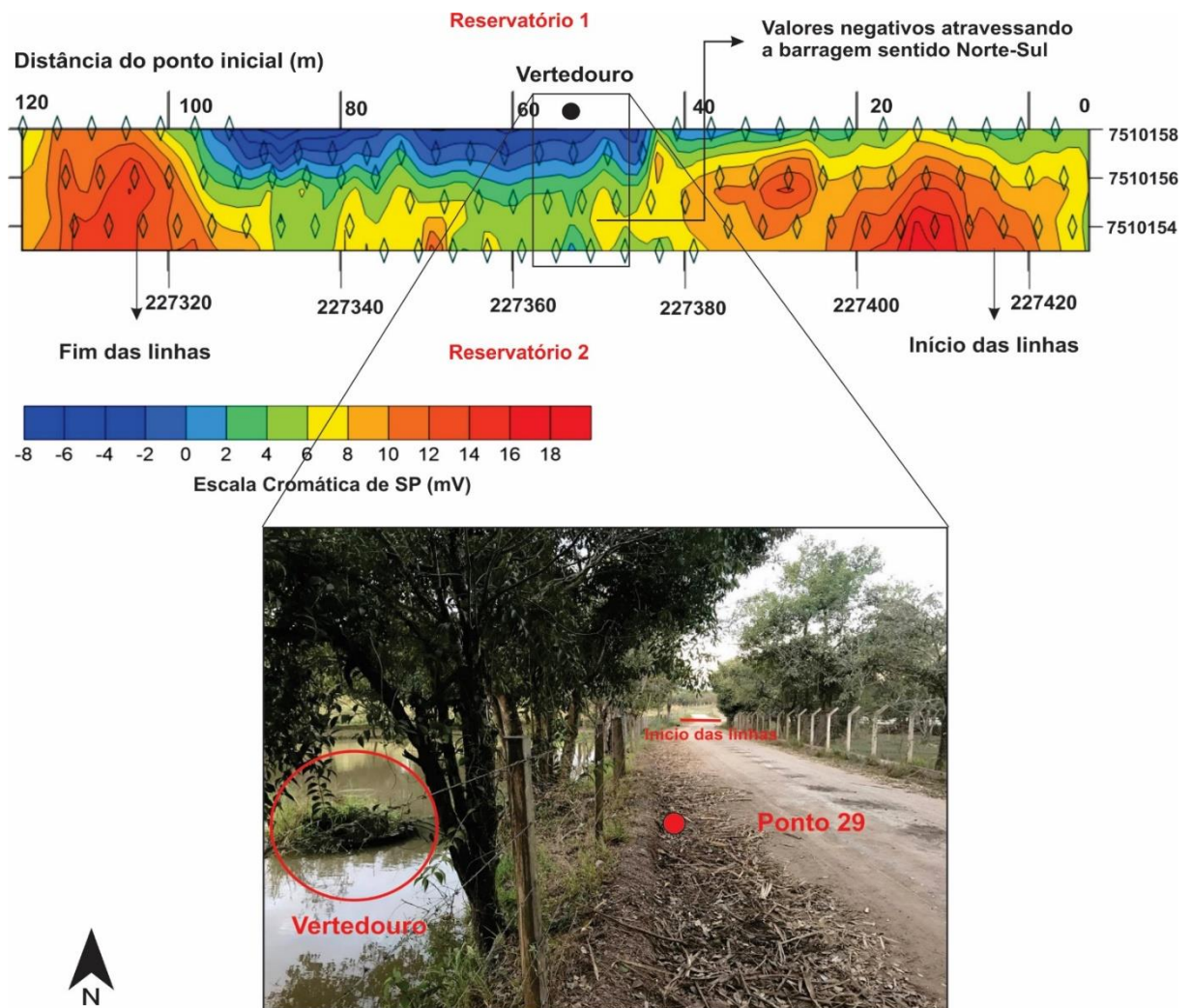
Outra estrutura que foi notada no dia da coleta de dados é a presença de um vertedouro no reservatório 1. Assim, durante a aquisição de dados foi anotado o local exato onde se encontrava o vertedouro, visto que tal estrutura poderia influenciar na composição dos dados e até mesmo emitir uma resposta no mapa final do potencial espontâneo.

A presença do vertedouro no reservatório 1 é representada no mapa do potencial espontâneo na forma de uma feição linear com valores negativos de sentido norte-sul, a qual atravessa a barragem bem na porção central, mais precisamente no

ponto de distância de 56 metros do início das coletas de dados, coincidentemente exatamente no local onde está instalado o vertedouro no reservatório 1.

A interpretação mais cabível para explicar esses valores negativos cortando a barragem no local do vertedouro seria uma possível ligação entre os dois reservatórios, com o intuito do reservatório 1, localizado mais acima topograficamente, abastecer o reservatório 2 (Figura 8.2.2).

**Figura 8.2.2:** Esquema da barragem mostrando a influência do vertedouro.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

Já os valores positivos no mapa do potencial espontâneo da barragem de Ipeúna, principalmente na região leste e oeste da área, deve-se ao fato do próprio material da composição do barramento possuir condições de resistividade um pouco altas, o que no caso geraria valores positivos de SP.

Quanto ao valor de resistividade de rochas sedimentares, a resistência do fluido intersticial é mais importante do que as características da própria rocha hospedeira. No caso, a porosidade e a quantidade de poros contendo água na rocha hospedeira é mais importante do que a litologia em si. Por exemplo, existe uma diferença na resistividade de uma argila seca e compactada e de uma argila com maior quantidade de água na sua composição (Reynolds, 2011).

Segundo Everett (2013), o valor de resistividade elétrica pode variar amplamente dependendo da cimentação dos poros, tamanho e forma do grão, molhabilidade do fluido, conteúdo de argila e vários outros fatores.

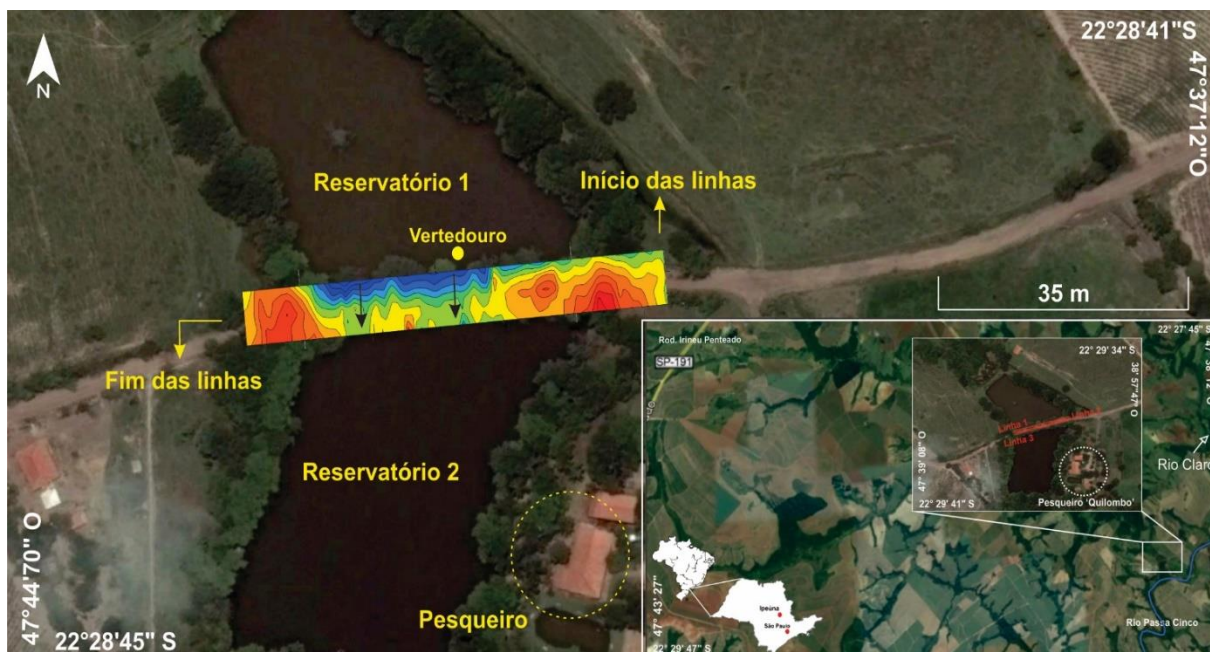
De acordo com Reynold (2011), os valores de resistência elétrica de rochas clássicas sofrem variações conforme a litologia apresenta alterações, como compactação, saturação e umidade. Um cascalho, por exemplo, apresenta resistividade de 1400  $\Omega\text{m}$  quando seco, enquanto que saturado de água a resistividade cai 14 vezes e atinge valores de 100  $\Omega\text{m}$ .

No caso da barragem em Ipeúna, a litologia foi classificada como um siltito argiloso bem preservado, bastante compactado, apresentando pouca porosidade e aparentemente seco, essas características litológicas se assemelham com a argila em condições mais secas, atingindo, portanto, valores de 50 – 150  $\Omega\text{m}$ , sendo bastante condizente com os valores encontrados na região leste e oeste da área.

Outro ponto importante é comparar o sentido do fluxo do potencial espontâneo com a topografia da região. No caso da barragem de Ipeúna, a região com maior topografia (reservatório 1) coincide com os menores valores de diferença de potencial, enquanto que os maiores valores de d.d.p encontram-se na região mais baixa topograficamente (reservatório 2), o que é condizente, uma vez que o fluxo do potencial espontâneo caminha dos valores menores para os maiores.

Buscando facilitar a visualização do mapa do potencial espontâneo na barragem de Ipeúna, foi sobreposto o mapa na estrutura da barragem, deixando claro os pontos iniciais e finais de coleta de dados, ressaltando a localização de estruturas que foram utilizadas na interpretação e que podem ter influenciado no resultado final do SP e por fim, ilustrando o sentido do fluxo do potencial espontâneo com uma seta preta dos valores negativos para os valores positivos (Figura 8.2.3).

**Figura 8.2.3:** Mapa do potencial espontâneo orientado na barragem de Ipeúna - SP, com destaque para a estrutura do vertedouro.

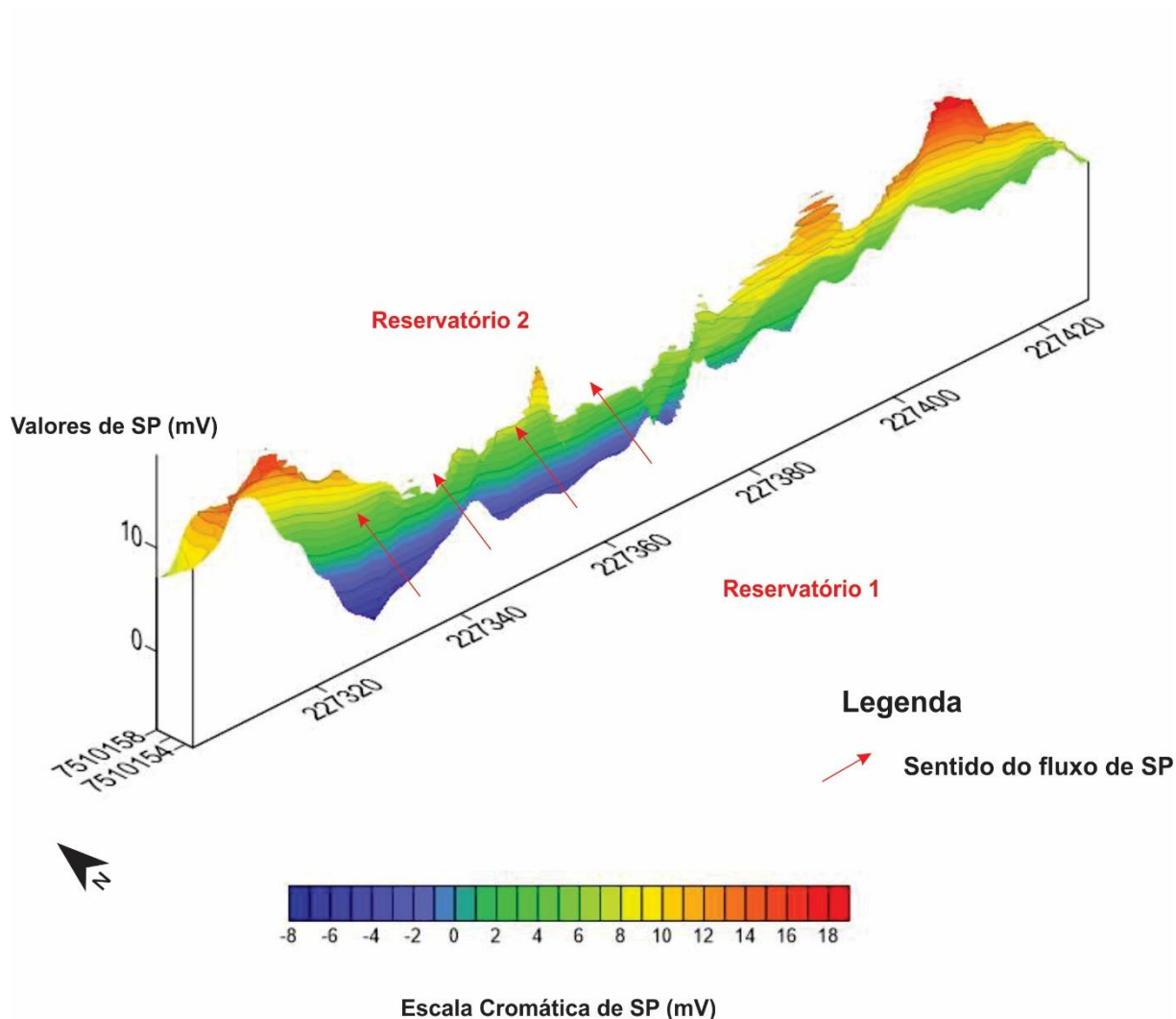


**Fonte:** Dados da pesquisa.

Da mesma forma que feito para a barragem de Cordeirópolis, foi criado também para o barramento de Ipeúna um perfil conjunto representativo das 3 linhas de aquisição, variação dos valores do potencial espontâneo em relação as coordenadas.

Esse perfil permitiu identificar os valores negativos de SP na região próxima ao reservatório 1. Foi traçado também o sentido do fluxo de SP (dos valores negativos para os positivos) (Figura 8.2.4).

**Figura 8.2.4:** Perfil das 3 linhas de aquisição mostrando a variação do SP x coordenadas, barragem de Ipeúna.



Fonte: Dados da pesquisa.

### 8.3 COMPARATIVO ENTRE AS BARRAGENS DE CORDEIRÓPOLIS E IPEÚNA

Um fato que já foi possível identificar em campo, e era também objetivo desse trabalho, são as grandes diferenças dos valores obtidos nas distintas litologias. No caso, os valores coletados na barragem que se encontra sobre a Formação Serra Geral apresentam valores bem mais elevados que os encontrados na barragem cuja litologia é do Grupo Itararé.

Essa diferença dos valores é resultado da resistividade elétrica de cada material. Os testes físico-químicos mostram que rochas ígneas básicas, como é o caso dos basaltos da barragem de Cordeirópolis, possuem maior resistência a passagem de corrente elétrica na sua estrutura, enquanto que o siltito argiloso da barragem de Ipeúna, mesmo estando bastante compactado (fator que gera aumento da resistividade do material), apresenta uma resistência menor, assim os valores de diferença de potencial refletem diretamente essa relação (Quadro 8.3.1).

**Quadro 8.3.1:** Comparativo dos valores encontrados nas barragens de Cordeirópolis e Ipeúna.

<b>Parâmetro analisado</b>	<b>Barragem Cordeirópolis</b>	<b>Barragem Ipeúna</b>
<b>Maior valor de d.d.p positivo encontrado</b>	135,43 mV	19,2 mV
<b>Menor valor de d.d.p negativo encontrado</b>	-265,7 mV	-5,63 mV
<b>Variação (maior valor – menor valor)</b>	401,13	24,83

**Fonte:** Dados da pesquisa.

Utilizando do Quadro 8.3.1 é possível notar que a variação dos valores de SP encontrados na barragem de Cordeirópolis é bem maior que a barragem de Ipeúna, novamente o motivo são os altos valores coletados graças a presença dos blocos de basalto no local.

### **8.3.1 Integridade física das barragens**

Quando foi realizada a visita prévia ao trabalho de campo e a coleta de dados, aparentemente ambas as barragens estavam com a integridade física intacta, ou seja, não foi possível identificar em campo qualquer problema de infiltração, percolação de água ou rompimento da estrutura do barramento.

Porém, após a realização do mapa do potencial espontâneo, foi possível identificar uma área no interior do barramento de Cordeirópolis que possui valores de SP negativos, indicando uma possível frente de saturação, que, caso ocorra o agravamento do processo com o tempo, pode vir a se tornar uma erosão interna do barramento (*piping*).

Já na barragem de Ipeúna, por sua vez, não foi encontrado o mesmo processo. Todavia, devido aos valores negativos de SP coletados próximo e ao longo de todo o reservatório 1, pode estar ocorrendo uma infiltração da água represada na estrutura da barragem, mas não é possível afirmar com certeza, já que o simples fato do nível d'água do reservatório estar bem próximo ao nível de coleta de dados pode interferir no resultado.

## 9. CONCLUSÃO

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 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, como a construção de um poço e uso de um piezômetro.

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.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos geológicos do relevo Paulista**. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, v. 41, p. 169–263, 1964.
- ANA, **Relatório de segurança de barragens 2012-2013**. Agência Nacional de Águas. Brasília, 2015.
- A.R. BARBOSA Jr. **Hidrografia Aplicada**. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2010.
- 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.
- CORDANI, U.G.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A.; PORTO, R.; THOMAS FILHOS, A.; CUNHA, F.M.B. **Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Boletim Ciência Técnica Petróleo, Seção Exploração de Petróleo, n.15, 70 p, 1984.
- COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- CULLEN, A. H. **Rios Prisioneiros: A História das Barragens**. Belo Horizonte: Ed. Editora Itatiaia Limitada de Belo Horizonte, 1964.
- DOMINGUES, A.F, BOSON, P.H.G & ALÍPAZ, S., **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**, Brasília, ANA, IBRAM, 2006.
- 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.

GALLAS, José Domingos Faraco. **O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais**. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 133-144, June 2005.

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.

ICOLD, **Position Paper on Dams and Environment**, maio de 1997.

ICOLD, **Bulletin 125, Dams and Floods – Guidelines and Case Histories**, 2003.

MALAGUTTI-FILHO, W. **Utilização de técnicas geofísicas na caracterização de solos e rochas com aplicações na geologia de planejamento urbano**. 2V. (Tese de Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Unesp- Rio Claro, 1991.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia, 2004. Material didático ou instrucional, pg 25.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de Geotecnia**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

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

MILANI, E. J. *et al.* **Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.

MILSON, J.; ERIKSEN, A.; **Field Geophysics, 4<sup>th</sup> review edition**. Wiley Publishers, Chichester, 304pp, 2011.

MUSSETT, E. A.; KHAN, M. A. **Looking into the earth: introduction to geological geophysics**. (S.I): Cambridge University Press, 2000.

NARDY, A. J. R. et al. **Aspectos geológicos e estratigráficos das rochas vulcânicas ácidas do Membro Chapecó**. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 1, 1999, São Pedro. Resumos... São Pedro: SBG, 1999. P. 68.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid, España: Paraninfo, 1972. 523p.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. 2009. 149f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de engenharia civil e ambiental da faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2009.sricc

PERINOTTO, J. A. J. *et al.* **Diques clásticos na Formação Corumbataí (P) no nordeste da Bacia do Paraná, SP: Análise sistemática e significações estratigráficas, sedimentológicas e tectônicas**. Geociências, p. 469-491, 2008.

REVIL A., MENDONÇA C. A., ATEKWANA E., Kulesa B., HUBBARD S. S., and BOLHEN K. (2010), **Understanding biogeobatteries: Where geophysics meets microbiology**, J. Geophys. Res., 115, G00G02, doi:10.1029/2009JG001065.

REYNOLDS. J.M – 2011- **Na introduction to applied and environmental Geophysics**. Wiley-Blackwell, 686p.

SATO M & MOONEY HM. 1960. The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials. Geophysics, 25: 226-249.

SCHNEIDER, R. L. *et al.* **Revisão estratigráfica da bacia do Paraná**. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro De Geologia, 1974.

SILVA, G.M.P. **Diagnóstico Ambiental, Qualidade de Água e Índice de Depuração do Rio Corumbataí – SP**. 1999, 155f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Estudos Ambientais – CEA, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

SOARES, P. C. **O limite glacial-pós-glacial do grupo tubarão no estado de São Paulo**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 44, 1972.

SOUZA, M. M. **Estudo para projeto geotécnico da barragem de Alto Irani**. 2013. 129f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 2. Ed. Cambridge University Press, 1990.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP)**. 1994. 98 f. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.

ZALÁN, P. V. *et al.* **A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, v. 17, n. 3, p. 242-252, 1987.

[http://www.portaldemarcelino.com.br/portal/estrito-video-mostra-como-  
era-um-dos-principais-pontos-turisticos-de-marcelino-engolido-pelo-progresso/](http://www.portaldemarcelino.com.br/portal/estrito-video-mostra-como-era-um-dos-principais-pontos-turisticos-de-marcelino-engolido-pelo-progresso/),  
acessado em 08 de agosto de 2017, às 17:15 horas.

## ANEXO I – TABELA DE DADOS SP – BARRAGEM CORDEIRÓPOLIS

**Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso – Parte Prática**

**Aluno: Leonides Guireli Netto  
 Malagutti**

**Orientador: Prof. Dr. Walter**

**Método: Potencial Espontâneo (SP)**

**Local: Cordeirópolis – SP**

**Data: 03 de Agosto de 2017**

### LINHA DE AQUISIÇÃO 1

X	Y	Distância (m)	Valor de SP
251034	7509005	0	-97,9
251034	7509003	2	-126,1
251034	7509001	4	9,51
251034	7508999	6	-28,8
251034	7508997	8	-96,8
251034	7508995	10	-71
251034	7508993	12	-151,1
251034	7508991	14	-205,7
251034	7508989	16	-257,7
251034	7508987	18	-202,7
251033	7508985	20	-160,7
251033	7508983	22	-115,77
251033	7508981	24	-42,3
251034	7508979	26	-37,77
251033	7508977	28	-87,8
251033	7508975	30	-16,41

251033	7508973	32	47,03
251033	7508971	34	3,34
251032	7508969	36	-89,2
251032	7508967	38	-90,8
251032	7508965	40	-34,7
251032	7508963	42	-88,8
251032	7508961	44	-75,7
251032	7508959	46	-35,9
251032	7508957	48	-1,04
251031	7508955	50	45,03
251031	7508953	52	-5,04
251031	7508951	54	107,33
251031	7508949	56	106,43
251031	7508947	58	114,83
251031	7508945	60	135,43
251031	7508943	62	12,01
251031	7508941	64	25,13
251030	7508939	66	-36,8
251030	7508937	68	-38,4
251030	7508935	70	26,53
251030	7508933	72	-39,8
251030	7508931	74	51,83
251030	7508929	76	65,23

### **LINHA DE AQUISIÇÃO 2**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>Valor de SP</b>
251036	7509007	0	-92,87
251036	7509005	2	-132,57
251036	7509003	4	-84,57
251036	7509001	6	-48,97
251036	7508999	8	-103,97
251037	7508997	10	-116,3
251037	7508995	12	-120,1

251036	7508993	14	-106,5
251036	7508991	16	-141,4
251036	7508989	18	-115,1
251036	7508987	20	-193,7
251036	7508985	22	-182,7
251036	7508983	24	-162,7
251036	7508981	26	-138,8
251036	7508979	28	-135,2
251036	7508977	30	-116,3
251036	7508975	32	-118,6
251036	7508973	34	-129,5
251036	7508971	36	-155,9
251036	7508969	38	-61,7
251036	7508967	40	-145,7
251035	7508965	42	-54,3
251035	7508963	44	-65
251035	7508961	46	-24,3
251036	7508959	48	48,83
251036	7508957	50	12,23
251035	7508955	52	-22,4
251035	7508953	54	-14,8
251035	7508951	56	-11,73
251035	7508949	58	-3,47
251034	7508947	60	30,2
251034	7508945	62	-13,9
251034	7508943	64	-50,07
251034	7508941	66	25,63
251034	7508939	68	29,83
251034	7508937	70	-42,1
251035	7508935	72	65,53
251034	7508933	74	77,83
251034	7508931	76	98,1

### LINHA DE AQUISIÇÃO 3

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>Valor de SP</b>
251038	7509007	0	-196,6
251038	7509005	2	-283,7
251038	7509003	4	-275,7
251038	7509001	6	-289,7
251038	7508999	8	-293,7
251038	7508997	10	-238,7
251038	7508995	12	-219,7
251038	7508993	14	-252,7
251038	7508991	16	-248,7
251038	7508989	18	-265,7
251038	7508987	20	-129,8
251038	7508985	22	-161,7
251037	7508983	24	-167,7
251037	7508981	26	-149,4
251037	7508979	28	-115,57
251037	7508977	30	-93,8
251037	7508975	32	-112,67
251037	7508973	34	-118,47
251037	7508971	36	-127,9
251038	7508969	38	-139,4
251038	7508967	40	-69,7
251038	7508965	42	-118,9
251037	7508963	44	-49,2
251037	7508961	46	-10,27
251036	7508959	48	-29,4
251036	7508957	50	-16,57
251036	7508955	52	5,04
251036	7508953	54	-9,94
251036	7508951	56	7,86
251036	7508949	58	56,53
251036	7508947	60	60,2

251036	7508945	62	53,53
251036	7508943	64	51,73
251036	7508941	66	-20,7
251035	7508939	68	-54,8
251035	7508937	70	-22,6
251035	7508935	72	45,43
251035	7508933	74	50,03
251035	7508931	76	83,03

**Obs: Primeiro valor eletrodo base: 11,19 mV**

**Último valor eletrodo base: 24,32 mV**

**Erro calculado: + 0,33 mV distribuído entre todos os pontos**

## ANEXO II – TABELA DE DADOS SP – BARRAGEM IPEÚNA

Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso – Parte Prática

Aluno: Leonides Guireli Netto  
Malagutti

Orientador: Prof. Dr. Walter

Método: Potencial Espontâneo (SP)

Local: Ipeúna – SP

Data: 11 de Agosto de 2017

### LINHA DE AQUISIÇÃO 1

X	Y	Distância (m)	Valor de SP
227425	7510158	0	4,96
227423	7510158	2	2,65
227421	7510158	4	4,41
227419	7510158	6	3,67
227417	7510158	8	2,8
227415	7510158	10	3,5
227413	7510158	12	3,68
227411	7510158	14	5,06
227409	7510158	16	5,54
227407	7510158	18	6,92
227405	7510158	20	4,87
227403	7510158	22	3,61
227401	7510158	24	5,06
227399	7510158	26	2,57
227397	7510158	28	2,64
227395	7510158	30	3,74

227393	7510158	32	1,83
227391	7510158	34	-0,41
227389	7510158	36	0,26
227387	7510158	38	2,02
227385	7510158	40	0,57
227383	7510158	42	-0,33
227381	7510158	44	-0,2
227379	7510158	46	0,75
227377	7510157	48	10,41
227375	7510157	50	-2,63
227373	7510157	52	-1,07
227371	7510157	54	2,61
227369	7510157	56	-1,23
227367	7510157	58	-1,58
227365	7510157	60	-0,69
227363	7510157	62	-1,29
227361	7510157	64	-1,9
227359	7510157	66	-2,75
227357	7510157	68	-0,96
227355	7510157	70	-1,47
227353	7510157	72	-1,18
227351	7510157	74	-2,55
227349	7510157	76	-0,56
227347	7510157	78	3,12
227345	7510157	80	-0,02
227343	7510157	82	-0,55
227341	7510157	84	-1,81
227339	7510157	86	-2,5
227337	7510157	88	-2,83
227335	7510157	90	-3,03
227333	7510157	92	-5,61
227331	7510157	94	-3,3
227329	7510157	96	-3,44
227327	7510158	98	-1,5

227325	7510158	100	-0,5
227323	7510158	102	3,7
227321	7510158	104	3,86
227319	7510158	106	6,51
227317	7510158	108	9,68
227315	7510158	110	10,44
227313	7510158	112	10,54
227311	7510158	114	11,45
227309	7510158	116	11,51
227307	7510158	118	10,71
227305	7510158	120	6,7
227303	7510158	122	7,15

### **LINHA DE AQUISIÇÃO 2**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>Valor de SP</b>
227426	7510156	0	7,59
227424	7510156	2	8,52
227422	7510156	4	9
227420	7510156	6	6,96
227418	7510156	8	6,9
227416	7510156	10	9,84
227414	7510156	12	11,22
227412	7510156	14	11,33
227410	7510156	16	12,9
227408	7510156	18	13,25
227406	7510156	20	10,45
227404	7510156	22	9,65
227402	7510156	24	8,82
227400	7510156	26	9,17
227398	7510156	28	8,41
227396	7510156	30	8,26
227394	7510156	32	15,63
227392	7510156	34	15,17

227390	7510156	36	15,03
227388	7510156	38	10,25
227386	7510156	40	10,61
227384	7510156	42	10,65
227382	7510156	44	9,73
227380	7510155	46	9,17
227378	7510155	48	6,3
227376	7510155	50	7,63
227374	7510155	52	6,66
227372	7510155	54	6,41
227370	7510155	56	8,11
227368	7510155	58	5,41
227366	7510155	60	5,53
227364	7510155	62	4,99
227362	7510155	64	5,49
227360	7510155	66	4,24
227358	7510155	68	4,66
227356	7510155	70	4,88
227354	7510155	72	8,7
227352	7510155	74	6,46
227350	7510155	76	6,17
227348	7510155	78	7,77
227346	7510156	80	5,59
227344	7510156	82	1,85
227342	7510156	84	5,99
227340	7510156	86	3,08
227338	7510156	88	3,39
227336	7510156	90	7,52
227334	7510156	92	4,19
227332	7510156	94	6,5
227330	7510156	96	2,59
227328	7510156	98	3,02
227326	7510156	100	3,24
227324	7510156	102	4,71

227322	7510156	104	9,37
227320	7510156	106	13,32
227318	7510156	108	14,5
227316	7510156	110	16,82
227314	7510156	112	14,18
227312	7510156	114	13,07
227310	7510156	116	9,87
227308	7510156	118	13,74
227308	7510156	120	12,7
227308	7510156	122	12,85

### LINHA DE AQUISIÇÃO 3

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>Valor de SP</b>
227427	7510154	0	4,92
227425	7510154	2	7,01
227423	7510154	4	7,85
227421	7510154	6	9,4
227419	7510154	8	12,21
227417	7510154	10	11,54
227415	7510154	12	13,03
227413	7510154	14	11,34
227411	7510154	16	17,44
227409	7510154	18	16,37
227407	7510154	20	19,22
227405	7510154	22	14,53
227403	7510154	24	12,47
227401	7510154	26	13,68
227399	7510154	28	10,16
227397	7510154	30	10,48
227395	7510154	32	7,78
227393	7510154	34	8,63
227391	7510154	36	9,67

227389	7510154	38	9,97
227387	7510154	40	9,2
227385	7510154	42	8,88
227383	7510154	44	8,14
227381	7510153	46	7,09
227379	7510153	48	5,86
227377	7510153	50	5,33
227375	7510153	52	5,62
227373	7510153	54	4,89
227371	7510153	56	6,25
227369	7510153	58	4,18
227367	7510153	60	0,79
227365	7510153	62	5,17
227363	7510153	64	5,95
227361	7510153	66	5,06
227359	7510153	68	5,66
227357	7510153	70	7,26
227355	7510153	72	2,53
227353	7510153	74	4,85
227351	7510153	76	14,63
227349	7510153	78	6,14
227347	7510153	80	7,4
227345	7510153	82	7,29
227343	7510153	84	5,85
227341	7510154	86	9,37
227339	7510154	88	4,21
227337	7510154	90	3,43
227335	7510154	92	4,54
227333	7510154	94	3,41
227331	7510154	96	7,24
227329	7510154	98	7,98
227327	7510154	100	7,81
227325	7510154	102	8,98
227323	7510154	104	12,27

227321	7510154	106	10,56
227319	7510154	108	12,64
227317	7510154	110	12,8
227315	7510154	112	15,59
227313	7510154	114	14,83
227311	7510154	116	14,33
227309	7510154	118	14,84
227307	7510154	120	9,98
227307	7510154	122	9,86

**Obs: Primeiro valor eletrodo base: 3,16 mV**

**Último valor eletrodo base: 8,28 mV**

**Erro calculado: +0,02 mV distribuído entre todos os pontos**