



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA-UFU**

**Curso de Graduação em Geologia**

**Monte Carmelo – MG**

**ANDRÉ RONALDO ALVARENGA FILHO**

**ANÁLISE GEOFÍSICA POR POTENCIAL ESPONTÂNEO (SP) DE ZONAS DE  
FLUXO DE ÁGUA EM UMA BARRAGEM DE TERRA, NO MUNICÍPIO DE  
MONTE CARMELO-MG.**

**Monte Carmelo, MG**

**2023**

**André Ronaldo Alvarenga Filho**

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Geologia da Universidade Federal de Uberlândia como parte da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso e requisito para obtenção do título de bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Emerson  
Rodrigo Almeida

**Monte Carmelo, MG**

**2023**

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, André e Karina, por todo apoio dado ao longo desses anos, por todo o incentivo e carinho, a eles minha eterna gratidão.

Agradeço a Rebeca, minha amada companheira de momentos bons e tortuosos, sempre me fazendo pensar de modo positivo e a suportar todas as dificuldades.

Agradeço ao meu orientador Prof. Emerson, por toda paciência, transmissão de conhecimento e boas conversas, por ter topado essa empreitada apesar das dificuldades, sou imensamente grato.

Agradeço especialmente a Patrícia e Ester por terem me ajudado em campo, e na coleta dos dados e deslocamento.

Agradeço ao Robson pela ajuda em todos os momentos em que precisei ao longo do curso, fazendo meu caminho ser menos penoso, agradeço pela amizade e por toda sua ajuda.

Não posso esquecer de meus amigos Paulo, Matheus e Alison por nossa amizade e parceria em vários trabalhos.

Também agradeço ao Pedro e ao João Vitor, amigos de república a quem sempre nutrirei imenso carinho e que foram grandes parceiros no início dessa jornada.

## Sumário

1. Introdução .....	7
2. Objetivos .....	18
3. Área de estudo .....	19
3.1 Localização da área de estudo .....	19
4. Materiais e Métodos.....	32
4.1 Instrumentação.....	32
4.2 Aquisição de dados.....	24
4.3 Resposta do SP a precipitação e absorção.....	28
4.2 Correção dos dados.....	29
5. Fundamentação Teórica .....	31
5.1 Geologia Regional.....	31
5.2. Grupo Araxá .....	31
5.3 Complexo Monte Carmelo.....	32
5.4 Formação Marília.....	32
5.5 O método do Potencial Espontâneo (SP).....	33
5.6 Potenciais de Fluxo.....	36
6. Resultados e Discussões.....	38
7. Conclusões e Recomendações.....	42
8. Referências Bibliográficas.....	43

## Tabela de Figuras

Figura 1. O método do Potencial Espontâneo (SP).....	9
Figura 2. Tipos de barragens de terra.....	11
Figura 3. Porcentagem dos diferentes tipos de barragens.....	11
Figura 4. Levantamento quinzenal de barragens classificadas como preocupantes.....	12
Figura 5. Levantamento sobre o tipo de empreendimento das barragens.....	13
Figura 6. Diagrama mostrando a ocorrência do processo <i>piping</i> em fase inicial.....	16
Figura 7. Esquema da árvores de eventos elaborada adaptado de Whitman.....	17
Figura 8. Esquema de uma barragem de terra e seus principais fatores de instabilidade estrutural.....	18
Figura 9. Mapa de Localização da Barragem de estudo no município de Monte Carmelo-MG.....	20
Figura 10. Localização da barragem da comunidade do Atalho com destaque das áreas de atenção.....	21
Figura 11. Vista panorâmica da barragem e reservatório de água.....	22
Figura 12a. Buraco com 2 metros de extensão na porção inferior da barragem.....	23
Figura 12b. Buraco com medição por fita métrica, foto ampliada.....	23
Figura 13. Rachadura de 25 cm na porção superior da barragem.....	24
Figura 14. Diagrama que demonstra cada componente de um eletrodo não polarizável em tubo dePVC a base de Cu/CuSO <sub>4</sub> .....	25
Figura 15. Eletrodo base em contato com superfície aquosa na margem do corpo d'água.....	26
Figura 16. Diagrama exemplificando uma aquisição de dados pela técnica de medidas de potencial com base fixa no método SP.....	27
Figura 17. Voltímetro acoplado em um dos três eletrodos do primeiro ponto de teste.....	28
Figura 18. Esquema de fluxo associado a absorção por raiz de árvore.....	30
Figura 19. Mapa geológico da área de estudo adaptado.....	34
Figura 20. Cargas elétricas positivas e negativas presentes na interface entre o grão mineral e a água que percola pelo material.....	38
Figura 21. Desenho esquemático de potencial de fluxo.....	38
Figura 22. Dados obtidos a partir do levantamento L1, na coordenada $y = 0,0m$ .....	39
Figura 23. Dados obtidos a partir do levantamento L2, na coordenada $y = 2,0m$ .....	40
Figura 24. Dados obtidos a partir do levantamento L1, na coordenada $y = 4,0m$ .....	40
Figura 25. Gráfico de SP com os dados interpolados identificando as anomalias.....	41
Figura 26. Buraco próximo ao ponto 11.....	42
Figura 27. Buraco com quase 1,5 metros de extensão.....	42

## RESUMO

Uma barragem de terra passa por diferentes níveis de água durante o ano, devido a variações de precipitações pluviométricas afetadas por períodos de seca e de cheia. A variação do volume de água acarreta também em variações na carga que precisa ser suportada pela barragem, podendo ocorrer o comprometimento da sua estrutura durante o uso por um intervalo de tempo prolongado devido à infiltração de fluido no material utilizado na sua construção. Dessa forma, uma investigação do comportamento das águas ante a variações das estações climáticas fornece preciosas informações sobre as diferentes condições em que a barragem está sujeita. O presente trabalho de conclusão de curso utilizou o método de Potencial Espontâneo (SP) como ferramenta de análise do comportamento do fluxo de água no interior da estrutura de uma barragem de terra, localizada no município de Monte Carmelo-MG. O levantamento consistiu em medir sistematicamente na superfície o potencial elétrico gerado naturalmente pelo movimento de cargas elétricas transportadas pelo fluxo da água através do material geológico. Os dados auxiliam na avaliação de processos relacionados à erosão e à presença de fluxos preferenciais de água através de represamentos antrópicos, os quais podem ocasionalmente representar risco à sua integridade estrutural. As anomalias observadas nos dados indicaram áreas específicas do percurso levantado que requerem mais atenção por parte dos executores de medidas de contenção de danos e manutenção. Esses dados forneceram informações acerca do comportamento da infiltração de água no interior da barragem de terra estudada, e reforçam a necessidade de ações de manutenção preventiva juntamente com ações de remediação da erosão nos arredores da barragem.

**Palavras-chave:** barragem; SP; erosão; fluxo de água; risco estrutural, *piping*.

## ABSTRACT

An embankment dam goes through different water levels throughout the year due to variations in rainfall affected by periods of drought and flood. The variation in water volume also results in variations in the load that needs to be supported by the dam, which can compromise its structure during prolonged use due to fluid infiltration in the material used in its construction. Thus, an investigation related to the behaviour of groundwater according to seasonal variations provides valuable information about the different conditions to which the dam is subjected. This undergraduate monography used the Self Potential (SP) method as a tool for analysing the behaviour of groundwater flow inside the structure of an embankment dam located in Monte Carmelo-MG municipality. The survey systematically measured the electric potential naturally generated by the movement of electric charges carried by the water flow through the geological material. The data assist in evaluating processes related to erosion and the presence of preferential water flows through anthropogenic reservoirs, which can occasionally represent a risk to its structural integrity. The anomalies observed in the data indicated specific areas of the surveyed path that require more attention from those implementing damage containment and maintenance measures. These data provided information about the behaviour of water infiltration inside the studied embankment dam, and reinforce the need for preventive repair actions along with remediation actions for erosion around the dam.

**Keywords:** dam; SP; erosion; water flux; structural risk, piping.

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história o ser humano manipulou o meio natural em que vive, seja por meio de alterações sutis realizadas por pequenos grupos populacionais organizados em tribos, ou em alterações de grandes proporções realizadas por grandes grupos populacionais, organizados em civilizações. Diferentes culturas cultivaram plantações, realizaram mineração, drenaram rios e construíram barragens, mesmo sem terem coexistido ou tido contato direto entre si (DOLITTLE, 2010). As barragens mais antigas eram edificadas com base em solo compactado, e tinham como principal finalidade o barramento de médios a grandes cursos d'água para a utilização das águas represadas em irrigação, e também exerciam a função de controlar enchentes, sendo conhecidas cerca de 34 barragens construídas em todo período da antiguidade (3.000 a.C. a 475 d.C.) (KUTZNER, 1997).

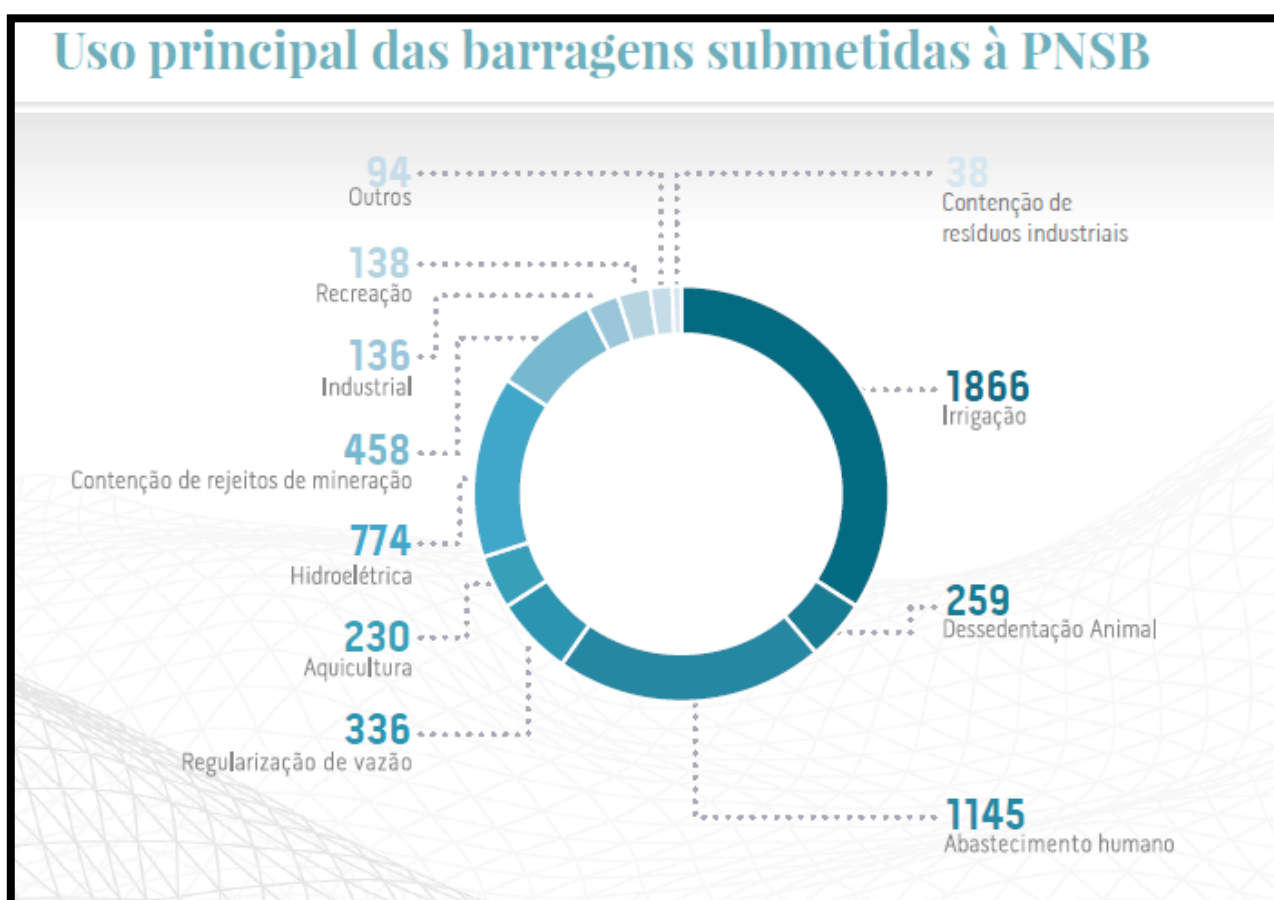
Com o passar do tempo o ser humano começou a sofisticar as construções de barragens, usando outros elementos além da compactação de solo e materiais inconsolidados, como madeira e grandes blocos de pedra no período da antiguidade, tornando-se comum a construção de barragens de concreto a partir do século XIX (KUTZNER, 1997). No Brasil, as primeiras barragens foram construídas na região nordeste com a finalidade de armazenamento de água para uso em abastecimento e irrigação devido ao clima da região ser seco e, em algumas épocas do ano, haver pouca precipitação (MASSAD, 2003).

Denomina-se barragem qualquer estrutura artificial construída com a finalidade de contenção de fluxos de água ou de armazenamento de resíduos sólidos em meio líquido. Tais estruturas possuem ampla aplicação em diversas atividades econômicas e ambientais, como o caso das barragens de contenção utilizadas para controle de enchentes, piscicultura, abastecimento, turismo, geração de energia hidrelétrica, entre outros. Além da finalidade com a qual as barragens são construídas, estas podem ser classificadas ainda quanto ao tipo de construção, tendo-se como exemplos a barragem de terra, a barragem de enrocamento e a barragem de concreto (COSTA, 2016).

Segundo o levantamento realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) para elaboração do Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (ANA, 2020), existem no Brasil cerca de 21.953 barragens legalmente registradas; todavia, ainda persiste um elevado número de barragens com registro parcial (5.591) ou com ausência total de registro (3.267). Na Figura 1 é mostrado um levantamento da quantidade de barragens registradas no PNSB agrupadas em relação à sua funcionalidade.



O principal emprego das barragens ocorre no represamento de água para uso na irrigação, sendo 1.866 barragens registradas no Brasil para esta finalidade. O uso para o abastecimento humano aparece em seguida, com 1.145 barragens, sendo utilizadas principalmente nas regiões mais secas do país, especialmente na região nordeste. Nota-se ainda a existência de cerca de 774 barragens para o uso na geração de energia hidrelétrica. Em menor número, observa-se o uso das barragens com a finalidade de represamento de rejeitos de mineração 458, dessedentação animal 259, agricultura 230, recreação 138, industriais 136 e de resíduos industriais 38, além disso existem 94 barragens classificadas como sendo de outros tipos.



**Figura 1.** Proporção de barragens de acordo com a finalidade a que se destinam. **Fonte:** ANA (2020), Relatório de Segurança de Barragens (RSB).

Diferentes tipos de materiais podem ser usados na sustentação das barragens e, de acordo com o tipo e finalidade a que estas se destinam, é necessário que haja um ambiente cujas características coerentes sejam capazes de satisfazer sua sustentação (COSTA, 2016).

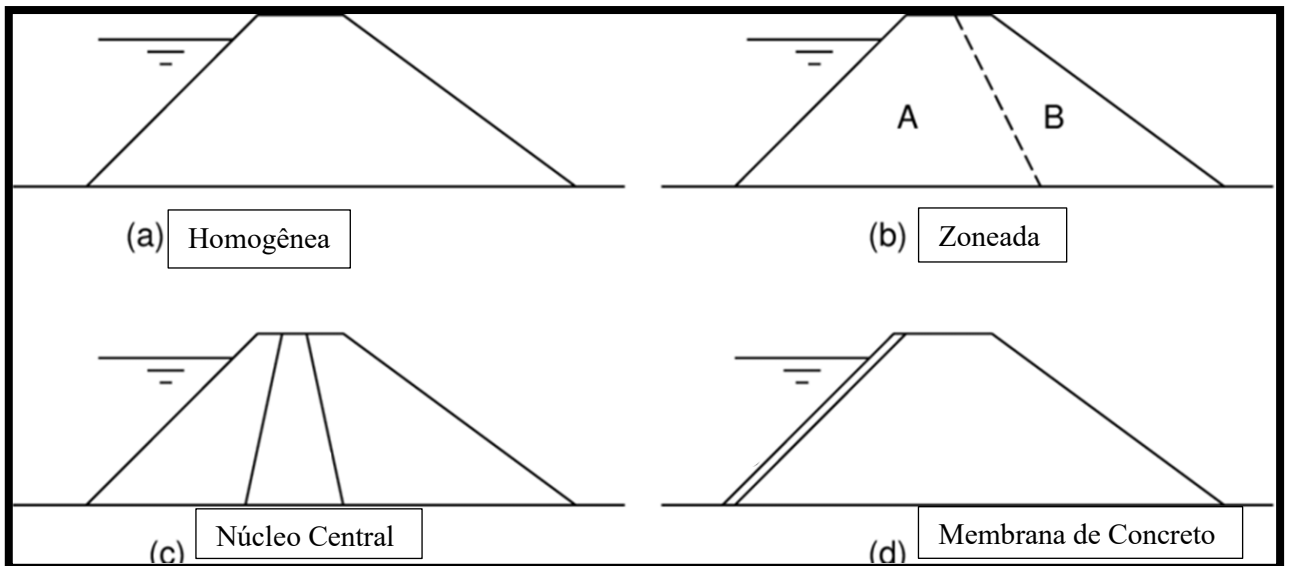
As barragens homogêneas de terra (Figura 2a) representam o tipo mais comum, sendo construídas com camadas de solo compactado de mesma composição e densidade ao longo

de toda a sua extensão. Este tipo de barragem é o mais simples e é geralmente utilizado na contenção de corpos d'água de pequenas dimensões. Essas barragens são estabelecidas em vales abertos e sua construção se dá através da compactação de material terroso, abundante nesse tipo de área. O material também pode ser sustentado por fundações que possuem características mais deformáveis como solos moles, que quando compactados se tornam propícios e coesos, tanto para constituírem a fundação da barragem afim de sustentarem materiais mais densos, quanto para compor o próprio embarramento. A principal problemática deste tipo de barragem é a possibilidade de erosão interna, causada pela infiltração de água, o que pode levar ao rompimento da barragem (ZHANG, 2009).

As barragens de terra zoneadas (Figura 2b) são compostas por várias camadas de solo com diferentes características, como densidade, umidade e permeabilidade, colocadas em zonas bem definidas ao longo do corpo da barragem. Esta técnica tem a vantagem de reduzir a possibilidade de erosão interna, melhorando a estabilidade da estrutura (ZHANG, 2009).

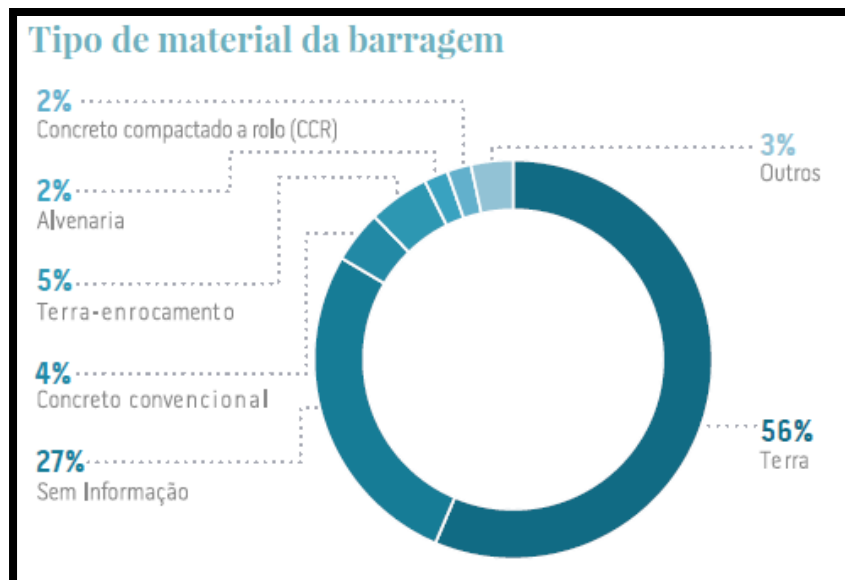
A barragem de terra com núcleo central (Figura 2c) é construída com um núcleo de solo compactado no centro da barragem, geralmente feito de material impermeável, como argila compactada. Este núcleo confere à barragem uma maior estabilidade e resistência. No entanto, a construção deste tipo de barragem é mais complexa e cara em comparação às barragens homogêneas e zoneadas (MASSAD, 2003; ZHANG, 2009).

Por fim, as barragens de terra com membrana de concreto (Figura 2d) têm uma camada de concreto ou argamassa de cimento, geralmente com espessura entre 10 e 20 centímetros, revestindo a face da barragem que entra em contato com a água. Isso ajuda a impermeabilizar a barragem, reduzindo a possibilidade de infiltração de água e erosão interna. Essa técnica de construção é utilizada em barragens maiores e mais críticas. A escolha do tipo de construção dependerá das condições do local, das necessidades de armazenamento e das características desejadas para a barragem. É fundamental que sejam observadas as normas de segurança e os procedimentos de manutenção para garantir a segurança das pessoas e do meio ambiente. (COSTA, 2016; MASSAD, 2003).



**Figura 2.** Tipos de barragens de terra (ZHANG et al, 1999).

O Relatório de Sistema de Barragens (RSB) também subdividiu as barragens por seus tipos de materiais constituintes. Na figura 3, temos essa subdivisão que demonstra que, 56% das barragens construídas no Brasil são barragens de terra, 27 % não possuem informação quanto ao tipo de material constituinte, 5% são barragens de terra-enrocamento, 2% de barragens de alvenaria, 2% de barragens de concreto compactado e 3% de outros tipos de barragens (RSB, 2021).

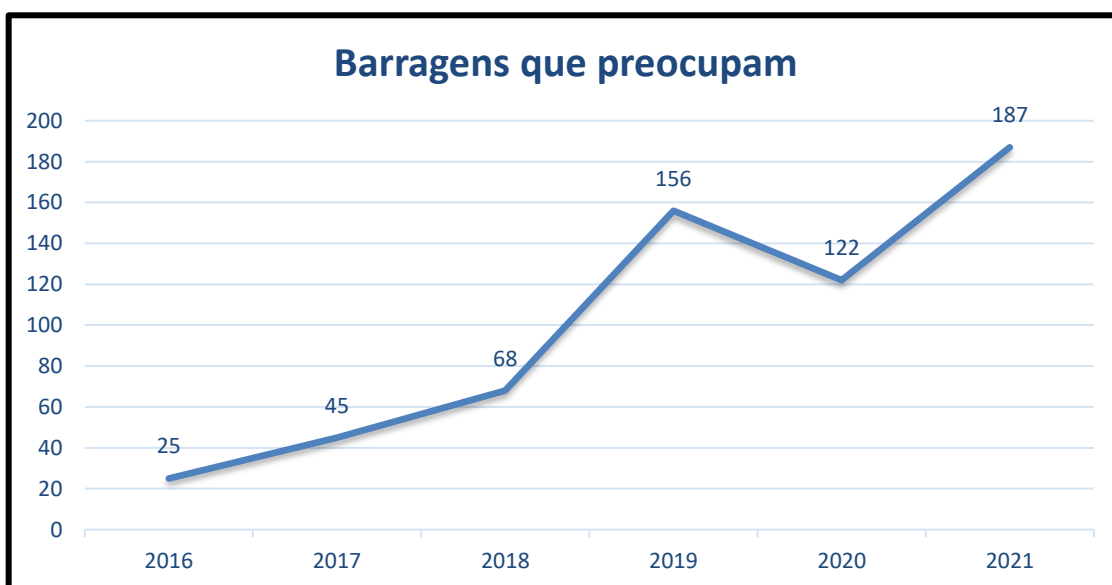


**Figura 3.** Porcentagem dos diferentes tipos de barragens (RSB, 2021).

As barragens em geral estão suscetíveis a diversos problemas, os quais podem estar associados à sua vida útil, ao método de construção e à utilização. As barragens de terra

possuem uma vida útil menor do que as barragens de concreto, podendo chegar a uma vida útil de 75 anos desde que seja feito o monitoramento e a manutenção adequada (TITOVA, 2017).

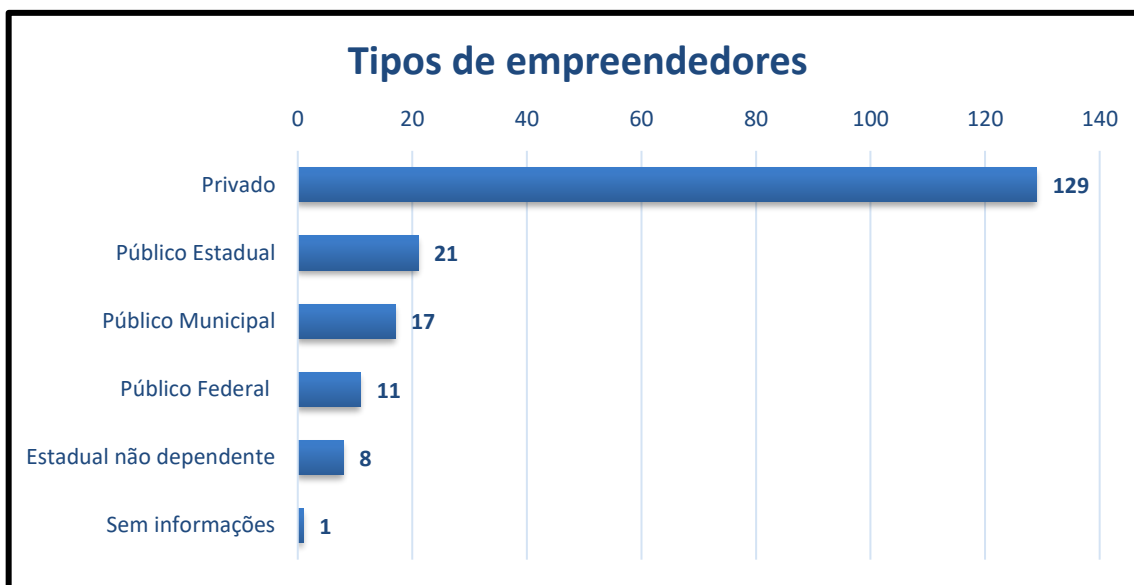
No contexto geral, barragens dos diferentes tipos já mencionados estão em situação de vulnerabilidade estrutural e, portanto, foram classificadas pelo RSB como “barragens que preocupam”, sendo os motivos dessa classificação o comprometimento da integridade estrutural e/ou a constatação de anomalias em vistorias técnicas (RSB, 2021). Um dado importante é relativo à quantidade de barragens classificadas anualmente entre 2016 e 2021 (Figura 4), o relatório aponta barragens avaliadas como preocupantes desde o primeiro levantamento até o último. O aumento, entretanto, não é contínuo e possui uma queda no ano de 2020, tendo uma retomada da tendência de crescimento no ano seguinte. De acordo com o RSB (2021), essa queda está relacionada à diminuição dos trabalhos de vistorias por conta da pandemia de covid-19 e, por isso, não reflete uma diminuição real da tendência de aumento.



**Figura 4** Levantamento quinquenal de barragens classificadas como preocupantes. Adaptado do RSB (2021).

O RSB utiliza uma metodologia pautada na solicitação dos dados de barragens vistoriadas pelas secretarias estaduais de meio ambiente ou por autarquias estaduais com jurisdição na fiscalização de águas superficiais e subsuperficiais. O órgão responsável por este levantamento no estado de Minas Gerais é o IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas). Dessa forma, os dados coletados pela ANA dependem do número de fiscalizações realizadas pelos órgãos estaduais e podem variar a cada ano e segundo critérios de cada

autarquia estadual para considerar uma barragem como preocupante. Só então esses dados são reportados para a ANA, que elabora no RSB uma relação do número reportado de barragens que preocupam. A maior parte das barragens (129) são de responsabilidade de empreendimentos privados, sendo o restante delas (57) responsabilidade do poder público em diferentes esferas (federal, estadual e municipal). Somente uma das barragens investigadas não está classificada como sendo de responsabilidade pública ou privada por falta de informações (Figura 5).



**Figura 5** Levantamento sobre o tipo de empreendimento das barragens. Adaptado do RSB (2021)

Além dos dados do RSB (2021), dados mais recentes da ANM (Agência Nacional de Mineração) foram interpretados pelo PoEMAS (Grupo de Pesquisa e Extensão Política, Economia, Mineração, Ambiente e Sociedade) da UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora) como tendo quase dobrado o número de barragens em situação crítica vistoriadas pela ANM de setembro de 2019 a setembro de 2020, passando de 21 barragens nessa situação para 38. Os dados da ANM são baseados em 450 barragens incorporadas ao PNSB (Política Nacional de Segurança de Barragens), que passam por vistorias anualmente. A ANM realiza a vistoria anual em 450 barragens a cada ano, de maneira que quando o número de barragens com problemáticas estruturais desse grupo de controle aumenta é considerado um aumento real na tendência de comprometimento estrutural das barragens desse grupo pois o número de barragens vistoriadas é o mesmo de um ano para o outro, além de serem as mesmas barragens fiscalizadas no ano anterior (MILANEZ e WANDERLEY, 2020). O cenário nacional sobre segurança de barragens

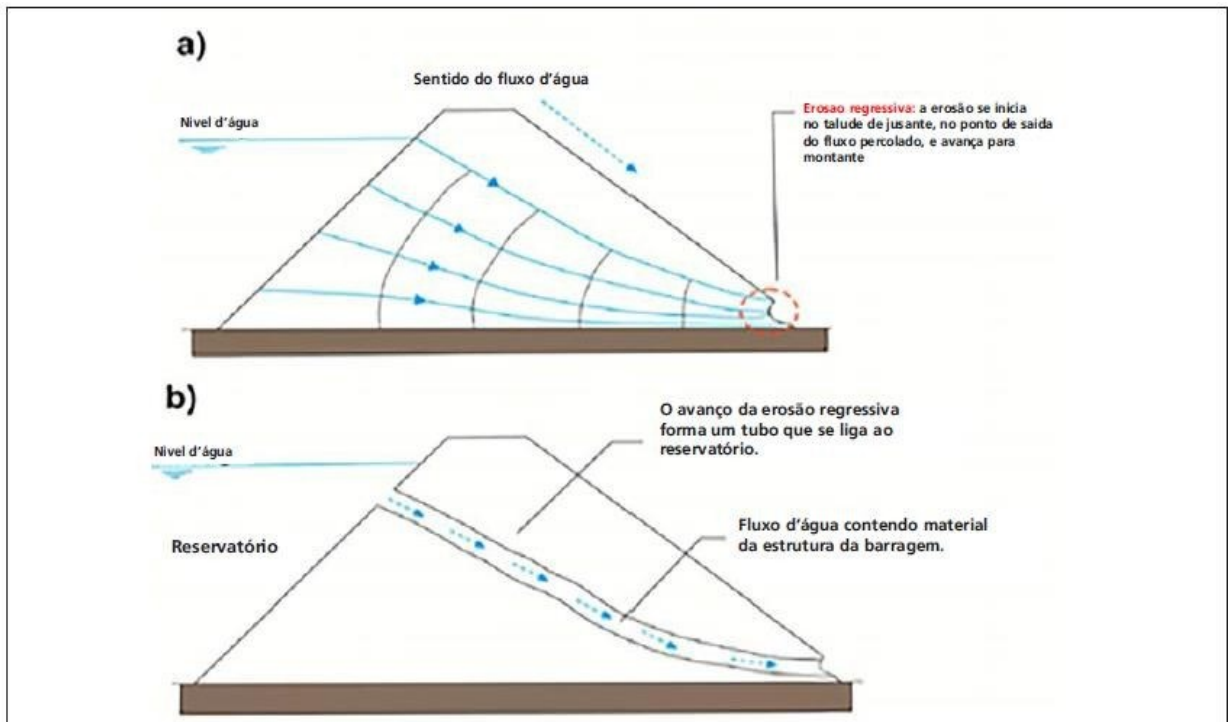
tem se intensificado desde 2015, ano do rompimento da barragem de Mariana (Barragem da Empresa Samarco, localizada no Município de Mariana-MG), que causou impactos irreversíveis na bacia hidrográfica do Rio Doce (G1, 2015). Esse evento despertou discussões profundas na mídia e na sociedade sobre a confiabilidade das 21.953 barragens existentes no país.

Em 2019 ocorreu outro caso de repercussão nacional e internacional, o rompimento da barragem de Brumadinho (Barragem da empresa Vale do Rio Doce, localizada no município de Brumadinho-MG) que fez mais uma vez o tema sobre segurança de barragens ser destaque nacional (RSB, 2021; MILANEZ e WANDERLEY, 2020). Na mesoregião do Triângulo Mineiro, do Alto do Paranaíba, e mesoregião Noroeste em que se localiza a barragem investigada no presente estudo, foram reportadas diversas barragens com comprometimento estrutural (EM, 2023; G1, 2020; MONTE FM, 2022; REDEBRASILATUAL, 2020) e ocorrências de rompimentos (G1, 2020; G1, 2022; PATOSNOTÍCAS, 2020). Os rompimentos não causaram prejuízo humano, não sendo reportado mortos ou feridos nos incidentes, entretanto, os danos ambientais foram significativos, sendo que no caso do rompimento de uma barragem de água utilizada para irrigação na zona rural da cidade de Uberlândia-MG o rompimento afetou o Rio Uberabinha, tendo a SUPRAM-TM (Superintendência de Meio Ambiente do Triângulo Mineiro) constatado infração ambiental (EM, 2022). Também foram apurados pela PMMA (Polícia Militar do Meio Ambiente de Minas Gerais) prejuízos ambientais causados pelo rompimento de três barragens na zona rural de Paracatu-MG, todavia, a natureza do rompimento não foi divulgada (G1, 2020).

No âmbito da geotecnia existem várias abordagens para classificar danos estruturais em barragens de terra. Essas abordagens consistem na detecção e averiguação de danos estruturais nesses tipos de barragens, onde é comum a ocorrência de rachaduras, buracos, insaturação dos grãos de solos, criação de túneis onde ocorre percolação preferencial de fluídos (*piping*), erosão, vulnerabilidade de taludes e comprometimento dos vertedouros, sendo essas as principais causas de comprometendo estrutural de barragens de terra segundo diversos estudos associados (BABU E SRIVISTAVA, 2010; WHITMAN, 2000). As causas destas instabilidades estruturais são avaliadas através da análise conjunta de dados obtidos por intermédio de diferentes métodos (BAIMA E CAMPOS, 2014; RIBAS e SEVERO, 2021; ROUSHANGAR et al , 2016), possibilitando que sejam feitas análises numéricas e probabilísticas, análises geoestatísticas, piezométricas e interpretações fundamentadas em dados de Geofísica

Aplicada, que são comuns em estudos geotécnicos e atendem as demandas abordadas. Porém, a maioria dos estudos apresentados partem de um ponto em comum, análises visuais e dignósticos do estado da barragem aferidos em maior escala.

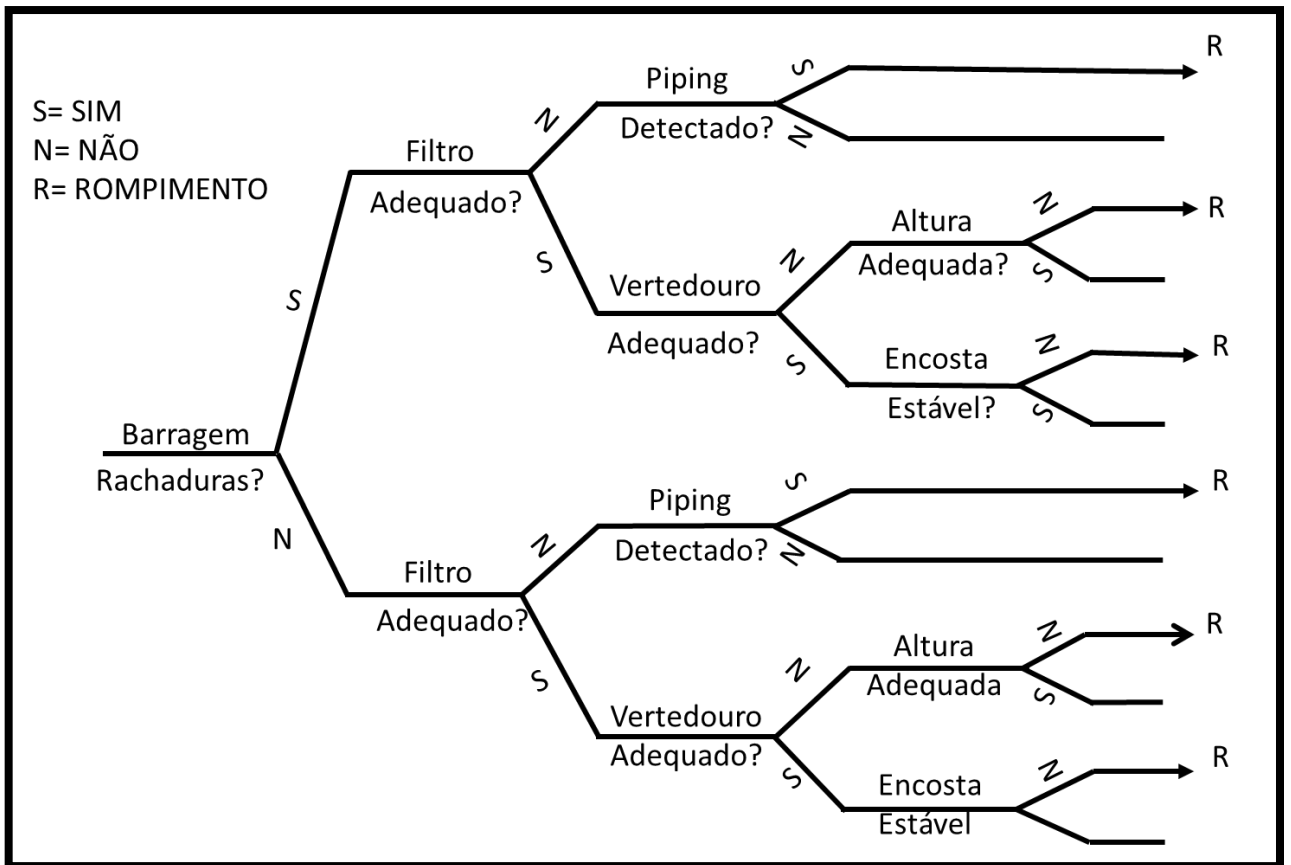
Um dos principais processos erosivos observados em barragens de terra é o *piping* (Figura 6), em que a infiltração da água através da barragem transporta gradativamente pequenas porções de material que possuem menos coesão no interior da estrutura. O *piping* consiste em uma erosão que ocorre em formato de tubulação e acontece por conta de percolação de água que forma um fluxo preferencial de água quando partes da porção de solos compactados permite essa infiltração por insaturação dos seus grãos. (FLORES-BARRONES e LOPES-ACOSTA, 2011). Havendo a ocorrência deste processo por períodos prolongados de tempo é possível que a erosão forme caminhos preferenciais no interior da barragem por onde o fluxo de água passa a percolar mais facilmente, podendo ter como consequência mais extrema o rompimento completo da mesma. O *piping* pode ser de difícil detecção pelos métodos convencionais de manutenção empregados no monitoramento de barragens de terra (COSTA, 2016; MASSAD, 2003); contudo, a aplicação de métodos geofísicos ou geoquímicos podem permitir sua detecção e auxiliar na sua prevenção (WILT e BUTLER, 1990).



**Figura 6.** Diagrama mostrando a ocorrência do processo *piping* em fase inicial (FLORES- BARRONES e LOPEZ-ACOSTA, 2011, modificado pelo autor). **a)** Materiais menos coesos podem ser transportados pela água que percola pela estrutura (linhas contínuas azuis), gerando pontos de erosão mais acentuada (círculo tracejado vermelho). **b)** A ocorrência prolongada deste processo erosivo pode acarretar no surgimento de caminhos preferenciais para a percolação da água (setas tracejadas azuis), enfraquecendo a estrutura.

Whitman (2000) apresenta um diagrama conhecido como análise das árvores dos eventos em que mostra as verificações a serem seguidas para averiguação da possibilidade de uma barragem de terra estar apresentando indícios de instabilidade estrutural (Figura 7). O diagrama descreve a sequência de eventos a serem verificados para avaliação da condição de uma barragem de terra, como a verificação de rachaduras, disposição adequada do filtro/vertedouro da barragem e características de declividade da barragem. Segundo os critérios acima mencionados, seria possível inferir qualitativamente o risco de que a barragem sofra de instabilidade estrutural por *piping*.



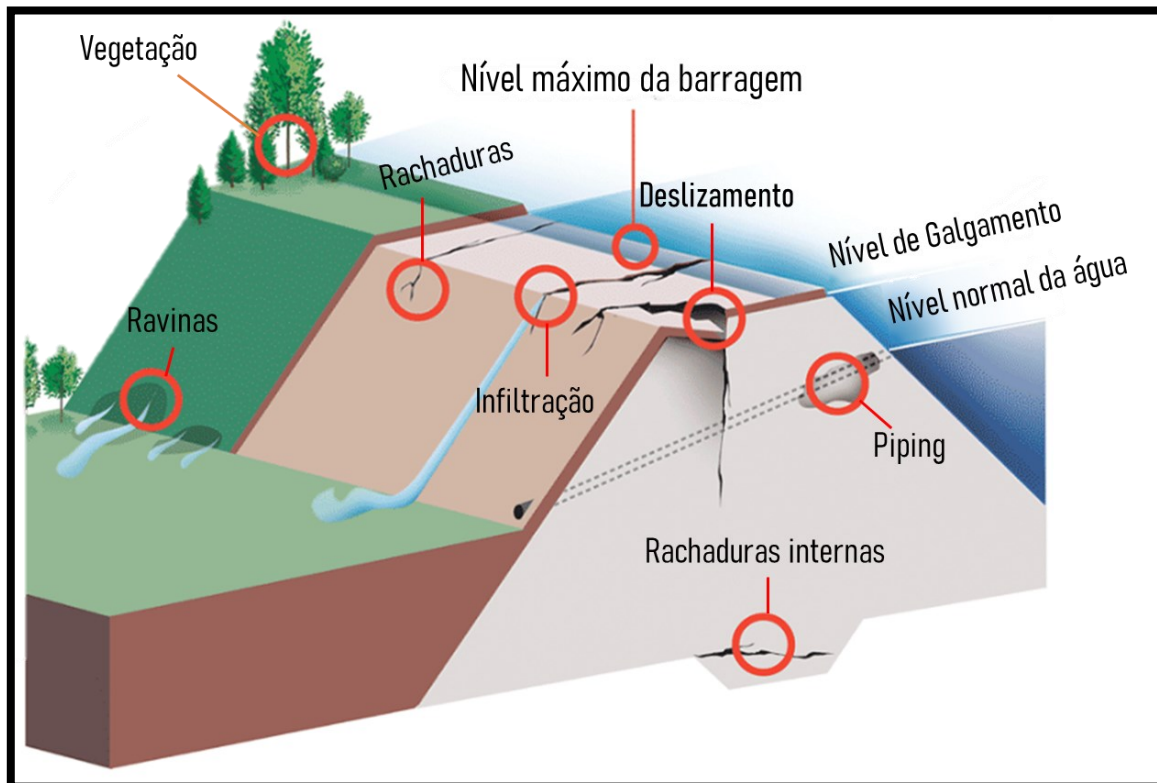


**Figura 7.** Esquema da árvore de eventos elaborada adaptado de Whitman (2000).

Além do esquema da Árvore dos Eventos de Whitmann (2000) os métodos geofísicos são considerados amplamente para a validação da ocorrência de *piping* em barragens de terra de pequeno porte, por conta da sua limitação em relação a profundidade (WANG et al, 2018).

Outro processo que deve ser destacado é o de formação de ravinas (Figura 8), associado ao intemperismo. Ravinas são formações em forma de valas causadas pelo escoamento superficial da água que se acumula acima do solo quando este encontra-se saturado e incapaz de permitir a infiltração da água. O escoamento superficial ocorre quando a precipitação supera a capacidade de infiltração do solo desencadeando um fluxo linear que removerá gradativamente o material do solo formando micro ravinas, que poderão evoluir para ravinas com cabeceiras, até a formação de uma ravina com alguns metros de diâmetro. A existência deste processo em locais próximos a uma barragem constitui um fator adicional a ser considerado no monitoramento, uma vez que também podem afetar sua estabilidade e comprometer sua integridade estrutural. Esse processo é independente e não possui relação direta com os outros tipos de fatores associados a comprometimento estrutural da barragem, como o *piping*, porém, outros impactos visíveis

a estrutura das barragens que podem ser visualmente indetectados são as rachaduras externas e deslizamentos, que podem ou não estarem ligados a comprometimentos estruturais internos como *piping* ou infiltração (FLORES-BARRONES e LOPEZ-ACOSTA, 2011; GUERRA,2014; MASSAD, 2003).



**Figura 8.** Esquema de uma barragem de terra e seus principais fatores de instabilidade estrutural. (Fonte: Adaptado de Fraser-Joones et al., 2017).

## 2. Objetivos

O presente trabalho teve como principal objetivo localizar possíveis zonas de infiltração para compreensão das relações entre o solo e a infiltração de água na estrutura de uma barragem de terra em que já foi reportado o risco de colapso (MONTE FM, 2022) utilizando-se para isto levantamentos feitos com o método SP (*Self Potential-SP*).

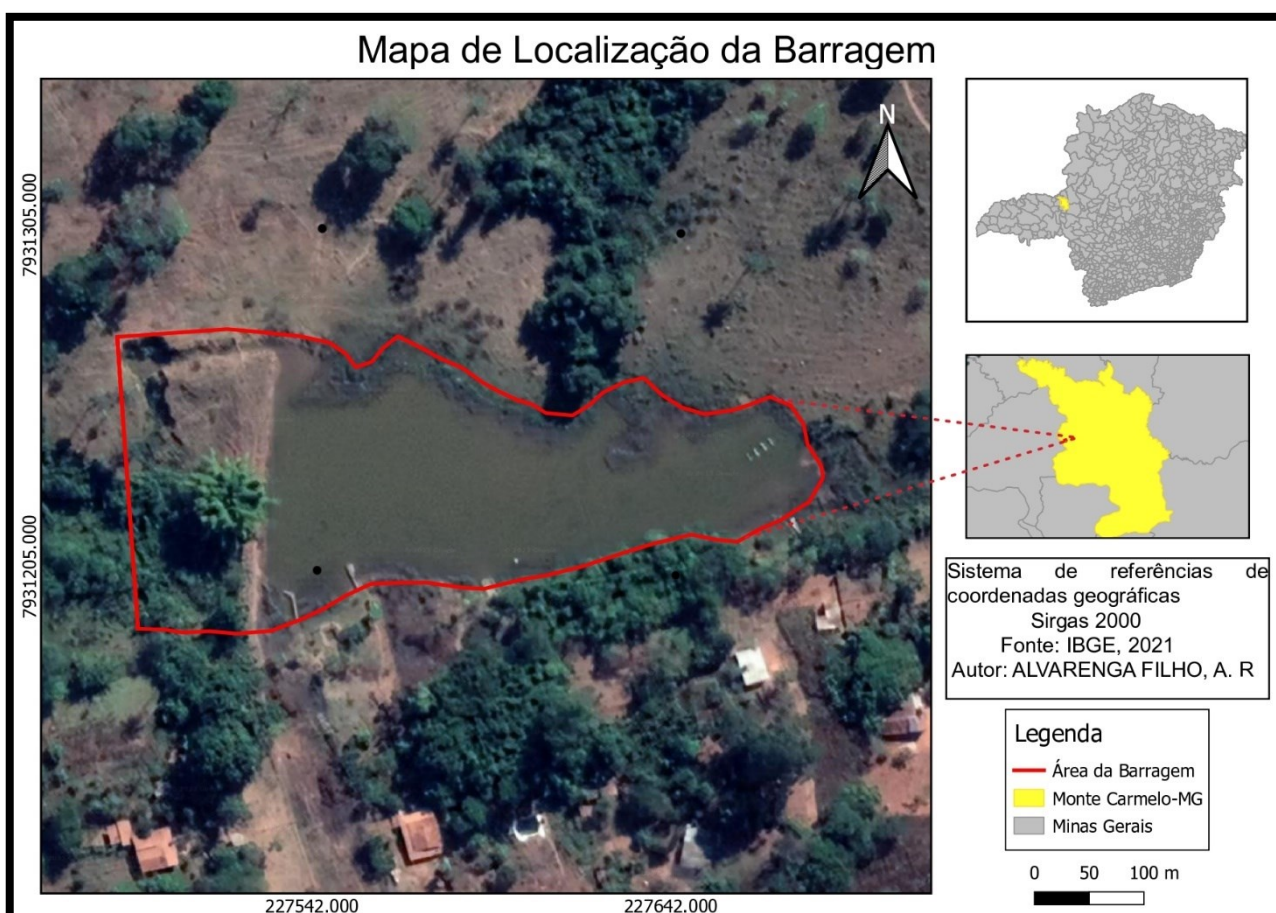
Portanto, foi almejado obter informações para identificação das áreas com maior probabilidade de ocorrência de avarias na barragem, não entrando no mérito de classificações de risco da barragem ou risco de rompimento, já que esse tipo de constatação e vistoria deve ser feito somente pelos órgãos fiscalizadores competentes. Todavia, os dados atribuídos a esse trabalho podem ajudar os fiscalizadores ou executores de obras na barragem a tomarem decisões como onde priorizar reformas estruturais e reparos.

A demonstração de que o SP é um método eficaz em trazer resultados qualitativos como método único quando empregado na investigação em problemas de Geologia de Engenharia, já que cada vez mais os estudos geofísicos são realizados de maneira integrada, muitas vezes se utilizando de mais de um método para a integração dos dados associados, todavia, demonstrar que o SP como único método também é capaz de gerar dados importantes em investigações como essa.

### 3. Área de estudo

#### 3.1 Localização da área de estudos

A área de estudo se localiza na zona rural do município de Monte Carmelo-MG, na Comunidade Quilombola do Atalho (Coordenadas 23K 227574 E 7931213 S). O acesso à localidade pode ser realizado partindo-se do centro da cidade de Monte Carmelo a uma distância de aproximadamente 8,7 km do destino final, através da LMG-746. A Figura 9 mostra a localização da área de estudo.



**Figura 9.** Mapa de Localização da Barragem de estudo no município de Monte Carmelo-MG. **Fonte:** Autor.

As áreas destacadas na barragem de estudo podem ser verificadas na figura 10, com destaque para a localização dos levantamentos L1, L2, L3. O levantamento L1 consistiu em um perfil retilíneo do ponto de coordenada  $x = -6,0$  m ao ponto de coordenada  $x = 34,0$  m, totalizando 40 estações de medida. O Levantamento L2 foi um

pouco menor, com 36 estações de medida distribuídas entre as coordenadas  $x = -6,0$  m e  $x = 30,0$  m. O Levantamento L3 foi mais curto do que os demais devido a limitações de acesso na área de aquisição de dados, ficando restrito à região compreendida entre as coordenadas  $x = 1,0$  m e  $x = 15,0$  m, com 14 estações de medida. A distância entre cada perfil foi de 2,0 m. A figura mostra ainda elementos estruturais importantes da área da barragem, como A- vertedouro, B- Ravina, C- Buracos, D- Bambuzal. O Vertedouro em A, e a Ravina em B estão próximos e conectados, a água que escoa pelo vertedouro vai diretamente para a ravina alimentando contribuindo para a ocorrência de intemperismo no local.



**Figura 10.** Localização da barragem da comunidade do Atalho com destaque das áreas de atenção. Fonte: autor.

Na Figura 11 é possível observar que L3 está disposta em um terreno com menor elevação em relação a L1 e L2.



**Figura 11.** Vista panorâmica da barragem e reservatório de água. Fonte: autor

No dia 23 de Fevereiro de 2022 foi noticiado que a referida barragem apresentava risco de rompimento devido ao excesso de água provocado pelas chuvas características do período. A barragem atingiu o seu limite máximo de contenção e, em alguns momentos, a água represada chegou a ser escoada superficialmente, excedendo o limite definido pela área de contenção. Devido a isso o poder público tomou atitudes paliativas como a instalação de vertedouros provisórios para a diminuição do nível crítico de água (PATROCINIOONLINE, 2022). Em visitas ocorridas nos dias 02 de novembro e 03 de Dezembro de 2022 foi observada a ocorrência de erosões em porções significativas da barragem como mostram as Figuras 12a e 12b, além de rachaduras e buracos de tamanhos significativos (Figura 13).



**Figura 12a.** Buraco com 2 metros de extensão na porção inferior da barragem.



**Figura 12b.** Buraco com medição por fita métrica, foto ampliada.

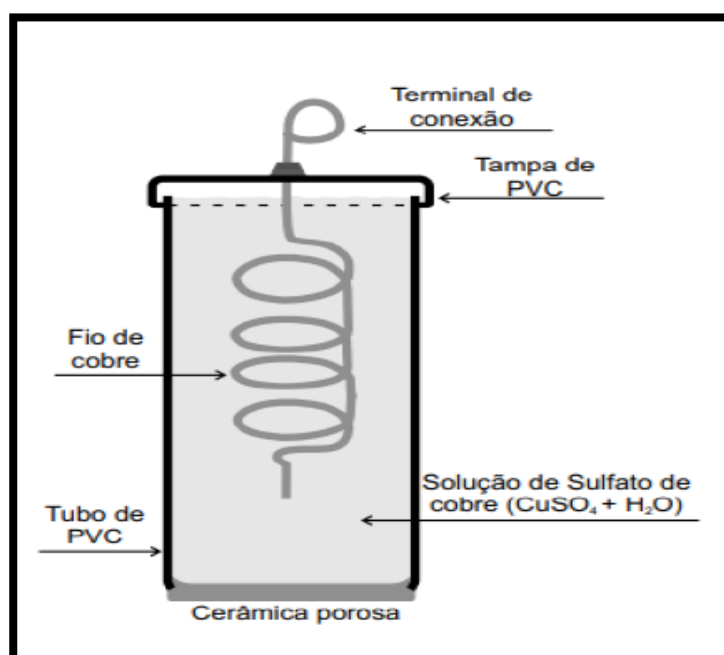


**Figura 13.** Rachadura de 25 cm na porção superior da barragem.

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1 Instrumentação

A aquisição de dados com o método SP requer o uso de dois eletrodos que serão colocados em contato com o solo para realização das medidas. Estes eletrodos devem ser não polarizáveis a fim de que seja evitada a contaminação do dado devido ao acúmulo de cargas elétricas na interface entre estes o material geológico do local de estudo, denominada polarização de eletrodo. Eletrodos não polarizáveis são constituídos por um recipiente feito de material isolante em que há um material poroso semi-permeável na extremidade onde o eletrodo ficará em contato com o solo. Uma porção não isolada do cabo que é conectada ao instrumento de medida é inserida no recipiente e este é então preenchido com uma solução saturada composta por água e um sal do mesmo metal do qual é feito o condutor do cabo elétrico. O material poroso em contato com o solo tem a função de permitir a percolação lenta da solução, permitindo a passagem de cargas elétricas por condução iônica da solução saturada para o solo. Os eletrodos utilizados no presente trabalho foram construídos com tubos de PVC, fio condutor rígido de cobre e uma base porosa de material cerâmico, conforme diagrama apresentado na Figura 14. Os eletrodos foram preenchidos com uma solução aquosa de  $\text{CuSO}_4$ , capazes de fornecer dados de boa qualidade em levantamentos de Potencial Espontâneo (CORWIN, 1993).



**Figura 14.** Diagrama que demonstra cada componente de um eletrodo não polarizável em tubo de PVC a base de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ . **Fonte:** Adaptado de Cabusson e Finezolla (2013).



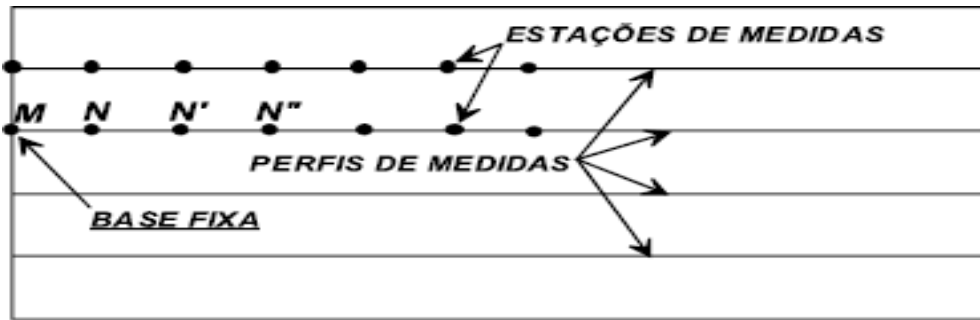
Além de eletrodos não polarizáveis o SP também requer o uso de um milivoltímetro com uma impedância de entrada da ordem de 10 M $\Omega$ , que seja capaz de fornecer a polaridade da diferença de potencial mensurada e que possua capacidade de realizar medidas no intervalo de -5,0 a 5,0 V, sendo recomendável a possibilidade de se ter boa aferição para resistência de contato (GALLAS, 2005). O levantamento apresentado neste trabalho utilizou os modelos de multímetros digitais Minipa ET-1000 e Hikari HM-2090 visando eliminar a possibilidade de influência instrumental sobre os dados medidos. Após a comparação dos valores medidos em ambos os instrumentos em diferentes pontos da área de estudo constatou-se que a variação observada permaneceu abaixo do nível de ruído, de forma que a diferença pôde ser considerada desprezível e ambos os instrumentos mostraram-se adequados ao objetivo do levantamento.

#### **4.2 Aquisição dos dados**

A coleta dos dados foi realizada através da técnica de medida de potenciais com base fixa. Esta técnica é recomendada quando a área a ser investigada não é de grandes dimensões (GALLAS, 2005) e minimiza o acúmulo de erros instrumentais ao longo do levantamento (WARD, 1990). O primeiro eletrodo, denominado eletrodo de base (Figura 15), é posicionado em uma coordenada qualquer da área sob investigação e que será a coordenada de referência para as medidas de diferença de potencial elétrico. O segundo eletrodo, denominado eletrodo móvel, se desloca ao longo do perfil de acordo com o espaçamento desejado entre os pontos de medida. Cada coordenada em que se posiciona o eletrodo móvel é denominada estação de medida, e após o posicionamento do eletrodo é lida a diferença de potencial elétrico no instrumento de medição (Figura 7). Nesse processo deve-se tomar cautela para o tamanho do fio utilizado entre o eletrodo de base fixa e as medidas tiradas ao longo do perfil, para que aí não se estabeleça uma situação propícia à contaminação do dado por ruídos.



**Figura 15.** Eletrodo base em contato com superfície aquosa na margem do corpo d'água.



**Figura 16.** Diagrama exemplificando uma aquisição de dados pela técnica de medidas de potencial com base fixa no método SP. Um dos eletrodos do instrumento é mantido em uma coordenada fixa (base) e o outro é alocado em diferentes coordenadas pré-estabelecidas ao longo dos perfis (GALLAS, 2005).

Inicialmente planejou-se fazer o levantamento com três eletrodos móveis próximos entre si em cada estação de medida (Figura 16), conforme recomendação feita por Barde-Cabusson, Finizola e Grobbe (2021) para melhoria da confiabilidade das medidas, e com estações de medida espaçadas de 5,0 metros. As diferenças de potencial elétrico seriam medidas simultaneamente em cada eletrodo, sendo atribuído o valor médio da medida à estação. Entretanto, após realizar as medidas em diferentes estações, foi verificado que a discrepância entre as medidas de cada conjunto de três eletrodos manteve-se sempre abaixo do potencial de 7,2 mV, o qual foi estabelecido como nível de ruído. Este valor foi observado colocando-se diferentes pares de eletrodos em contato próximo entre si na margem do corpo d'água, em condições ideais de contato elétrico, e medindo-se o potencial elétrico entre ambos (CORWIN, 1990).

Diante desta observação optou-se por utilizar apenas um eletrodo em cada estação de medida, reduzindo-se o espaçamento entre as estações para 1,0 m a fim de melhorar a resolução espacial ao longo do perfil. Foi também adotada uma distância de 2,0 m entre cada perfil para avaliar a possível correlação entre anomalias. Devido às condições de terreno da área de estudo, apenas três perfis foram adquiridos sobre a região em que avaliou-se como sendo a mais crítica.



**Figura 17.** Voltímetro acoplado em um dos três eletrodos do primeiro ponto de teste.

Dessa maneira os levantamentos foram realizados na porção da barragem em que foi constatado maior propensão à vulnerabilidade estrutural, sendo a porção onde era possível constatar rachaduras e buracos de poucos centímetros até alguns metros de extensão. Além disso outro agravante era o avanço de uma ravina nas adjacências da localidade o que só reforçou a atenção nas áreas levantadas.

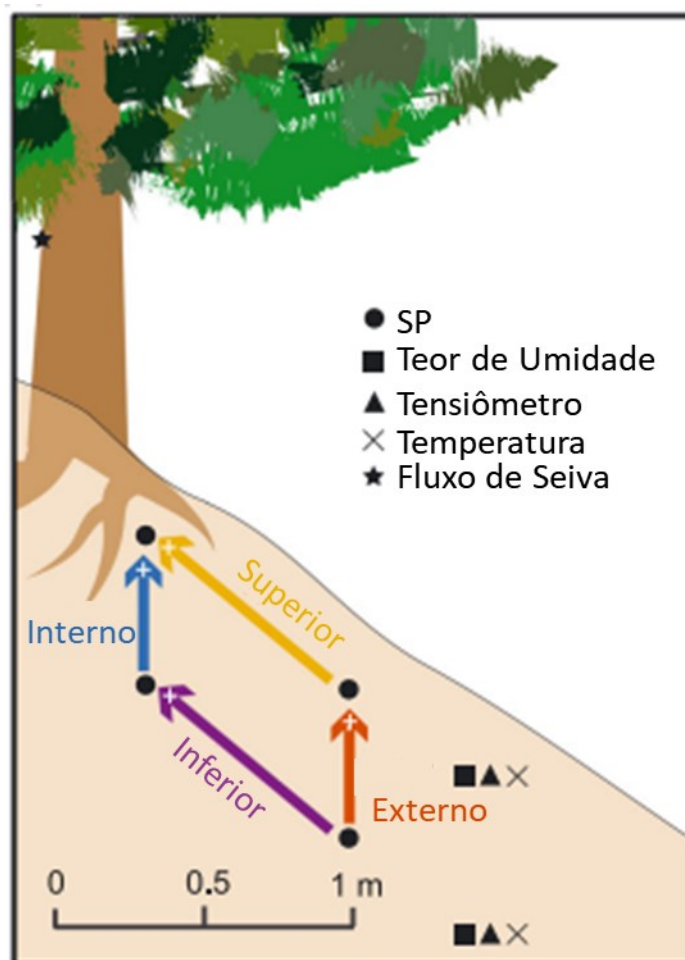
A partir de um levantamento como o de Potencial Espontâneo (SP) é possível fazer um mapeamento de infiltração preferencial de fluxos no interior da barragem e esse é o principal objetivo do trabalho, delimitar os fluxos internos a partir dos sinais das anomalias gerados pelo SP, a partir disso o mapeamento visa a contribuir com a identificação de possíveis avarias mais complexas que podem estar acarretando prejuízos estruturais na barragem como o *piping*, sendo que a maioria das vistorias e manutenções técnicas em barragens de terra de pequeno porte passam por investigações superficiais e visuais de avarias e das mitigações delas, não tendo dados ou investigações a cerca de infiltrações e seus fluxos internos, dessa forma elas focam em medidas paliativas e não contribuem para o prolongamento da vida útil da barragem, já que se a barragem estiver

passando por problemas estruturais mais profundos medidas de reformas mais complexas são mais indicadas para que o prolongamento da vida útil da barragem seja alcançado.

#### **4.3 Resposta do SP para a precipitação e absorção**

Alguns fatores devem ser considerados no momento da realização de levantamentos por Potencial Espontâneo (SP), um deles é a influência de fatores externos na geração de potenciais de infiltração que podem influenciar no momento da delimitação de um potencial de infiltração de interesse. Fatores externos como precipitação do solo e absorção de água por raízes de plantas podem influenciar nos potenciais elétricos medidos foram encontrados na bibliografia estudos que quantifiquem a significância de absorção de água como condicionantes de potenciais em plantas rasteiras como gramíneas, porém Voytek et al. (2019) quantificaram a absorção de água por plantas com raízes maiores, como plantas lenhosas. Neste estudo foi feita a instalação de quatro eletrodos entre 0,3 metros a 0,8 metros de profundidade e a uma distância de 0,1 metros a 0,9 metros das raízes da árvore alvo do interesse.

Também foram utilizados tensiômetros e sensores de solo que foram instalados a 0,3 metros dos eletrodos como verificado na Figura 18, a partir disso foi concluído pelo estudo que o fluxo de água não é o único a criar um potencial suficiente para ser detectado em SP, mas também o fluxo de seiva gerado por raízes de árvores, entretanto, esse fluxo vai depender de variações de clima e das estações do ano, estando estações mais secas as raízes tendem a puxar água de fontes mais distantes gerando potenciais maiores do que em períodos de chuvas mais contínuas, portanto em determinados períodos principalmente de seca, o fluxo de seiva pode ser detectado por SP além do fluxo de água (Revil e Jardani, 2013; Voytek et al, 2019).



**Figura 18.** Esquema de fluxo associado a absorção por raiz de árvore (Voytek et al, 2019).

#### 4.4 Correção dos dados

O procedimento de correção dos dados é realizado para remover efeitos de deriva que podem estar sobrepostos aos dados de interesse. Dessa maneira, o nível de ruído é determinado colocando dois eletrodos próximos e medindo e anotando o valor encontrado, sendo esse foi encontrado um valor de 7,2 mV que é considerado o valor de erro geral do levantamento (CORWIN, 1990).

Foi utilizada a equação de reta  $y=ax+b$  para a correção dos dados adquiridos por SP, a metodologia empregada foi a de ajuste dos dados realizados a partir do dado coletado em repetição, como o ponto -6 coordenada  $x=0$  em L1 medido o valor de 15 mV, após a coleta de dados de SP por cerca de 50 minutos foi repetido a medida no ponto -6 e aferido o valor de 20 mV sendo verificado um aumento de 5 mV ao longo do levantamento, sendo então considerado esse valor a ser corrigido, esse procedimento foi empregado em L2 e L3,

porém, em L3 a partir do ponto 1, seu primeiro ponto. Em L3 também foi empregado o procedimento de correção de dados após a coleta ter sido interrompida por uma breve chuva, foi verificado que o dado do ultimo ponto coletado antes da chuva foi de 24, 4 mV, sendo esse ponto repetido após a chuva e obtido um valor de 14 mV, essa diferença foi somada nos valores obtidos pelos pontos seguintes, e após isso, L3 passou pelo mesmo procedimento de correção de dados a partir da equação da reta acima mencionado. O procedimento da utilização de uma equação de reta é comum para o método de SP, pois ao longo da execução do levantamento ocorre um fator de diferença de potencial, aferido pela repetição do primeiro ponto do levantamento após a realização do mesmo, essa diferença medida vai acumulando progressivamente pelos pontos levantados, no caso do levantamento 1 (L1) do ponto -6 ao ponto 34, sendo os pontos mais próximos de -6 tendo menos essa diferença, e ao fim do levantamento o ponto 34 estaria medindo essa diferença de potencial em relação ao início, ou seja a medição no ponto 34 estava naturalmente 5 mV mais alta que a do início, porém, como essa diferença é progressiva a equação de reta calcula de maneira diluída em relação a todos os pontos, o quanto esse fator de diferença de potencial foi aumentando a cada ponto levantado, até o final.

O procedimento de amarração entre as linhas se deu através de uma amarração entre levantamentos paralelos é realizada comparando os valores de potencial espontâneo medidos em pontos de controle em diferentes linhas. A técnica mais comum é o método de comparação direta, onde os valores de potencial espontâneo são comparados entre dois pontos onde as linhas se encontram. Se houver discrepâncias entre os valores, as medições podem ser ajustadas para garantir a continuidade dos dados. Já no método de perfilagem, os pontos de controle são perfilados em uma linha mestra para serem comparados com as medições nesta linha. No método de ajuste de grade, os dados são interpolados e ajustados para gerar uma grade uniforme de valores de potencial espontâneo (REVIL e JARDANI, 2013).

## 5. Fundamentação Teórica

### 5.1 Geologia Regional

O local em que área de estudo está inserida é de contexto de transição entre Bacia Bauru e Faixa Brasília, em sua zona interna. Tem-se unidades litológicas correspondentes a Faixa Brasília como o Grupo Araxá, Complexo Monte Carmelo, Suíte Granítica Estrela do Sul e Ortognaisse Goiandira. Também se faz presente regionalmente unidades litológicas como a Formação Marília, Formação Serra Geral e Formação Botucatu, sendo considerado em escala regional o mapeamento de 1:100.000 desenvolvido pela CODEMIG apresentado na Folha Estrela do Sul (CHAVES e DIAS, 2017). O local de estudo encontra-se a leste da Folha Estrela do Sul, estando segundo a referida carta sobre o Complexo Monte Carmelo próximo à área de contato com o Grupo Araxá.

Dessa forma as unidades litológicas que abrangem a localização da barragem e que devem ser consideradas na geologia local são o Complexo Monte Carmelo e o Grupo Araxá, visto que a barragem está num contexto de transição entre as duas litologias segundo a escala da Folha Estrela do Sul.

### 5.2 Grupo Araxá

O Grupo Araxá possui idade neoproterozóica e é dividido por Lacerda e Oliveira (1994) em quatro unidades, sendo elas:

- i) A: caracterizada pela presença de granada-biotita xistos feldspáticos, biotita-muscovita xistos feldspáticos com aspecto bandado com invasão de vênulas graníticas ao longo de textura milonítica;
- ii) B: caracterizada pela presença de muscovita-quartzo-xisto, biotita-muscovita quartzo xisto, com intercalações de muscovita quartzito e clorita xistos;
- iii) C: caracterizada pela presença de calci-clorita-biotita-quartzo xisto, calci-biotita-muscovita xisto com intercalações de grafita muscovita xisto e lentes de metacalcários relacionados ao ambiente marinho raso;
- iv) D: caracterizada pela presença de muscovita-clorita-quartzo-xistos piritosos, clorita-xistos granatíferos, filitos grafitosos, sericita e quartzitos com estratificações cruzadas de grande porte.

Em geral, o Grupo Araxá possui dois xistos de xistosidades distintas, bem como



com duas composições mineralógicas diferentes, referentes a granada-mica xistos e mica xistos finos, surgindo então a separação de Grupo Araxá A e Grupo Araxá B, respectivamente (UHLEIN et al, 2012).

### **5.3 Complexo Monte Carmelo**

O Complexo Monte Carmelo é referido como um complexo granítico gnáissico devido aos litotipos rochosos encontrados na região de Monte Carmelo-MG, descritos como sendo rochas de composição granítica e também granodiorítica, e possuindo subordinação ao anfíbolito e fácies em epidoto-anfíbolito (PINHO, 2017). Porém, trabalhos recentes demonstraram que o Complexo Monte Carmelo é constituído por um corpo ígneo aflorante que possui abrangência entre os municípios de Monte Carmelo-MG e Abadia dos Dourados-MG, e conseqüentemente também os seus complexos, Complexo Monte Carmelo e Complexo Abadia dos Dourados (PIMENTA, 2020; SANTOS et al., 2021).

Além das características litológicas já citadas, o Complexo Monte Carmelo também é constituído por bolsões pegmatíticos félsicos, com conteúdo mineralógico de quartzo e feldspato predominantes, havendo ocorrências pontuais de milonito e ultramilonito. Dessa forma as rochas que são classificadas como sendo graníticas e granodioríticas são mineralogicamente constituídas de quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, muscovita, sericita e biotita. O Complexo foi mais recentemente descrito por Pimenta (2020) como possuidor de um corpo granítico principal marcado pela presença de xenólitos de micaxisto em granitóides, além de quatro outros corpos de geometria alongada localizados ao longo de corpos de água como Cavacos, Santa Rosa e Bros. O autor descreve ainda a presença de estruturas de deformações miloníticas, em tipo S-C, como a lineação mineral e estriamentos.

### **5.4 Formação Marília**

É uma formação geológica que está presente em diversos estados brasileiros, bem como São Paulo, Minas Gerais e Goiás. Geocronologicamente a formação abrange o período do Cretáceo Superior, mais restritamente o maastrichtiano superior no período de 70,6 a 65,5 milhões de anos (MAOSKI, 2012). No Triângulo Mineiro especificamente os sedimentos dessa Formação afloram de modo descontínuo, por conta dos depósitos nessa localidade serem de origem aluvial coalescente e fluvial anostomosado, tendo ocorrência de calcretes e calcários provenientes de ambiente lacustre (CANDEIRO, 2005). Em aspecto

litológico a Formação Marília é composta principalmente por Arenitos Conglomeráticos e Arenitos Heterogêneos, e em relação a área de estudo o Membro Araguari é a unidade geológica descrita mais próxima pertencente à Formação Marília, essa unidade foi descrita como sendo composta por arenitos conglomeráticos (OLIVEIRA e CAMPOS, 2003).

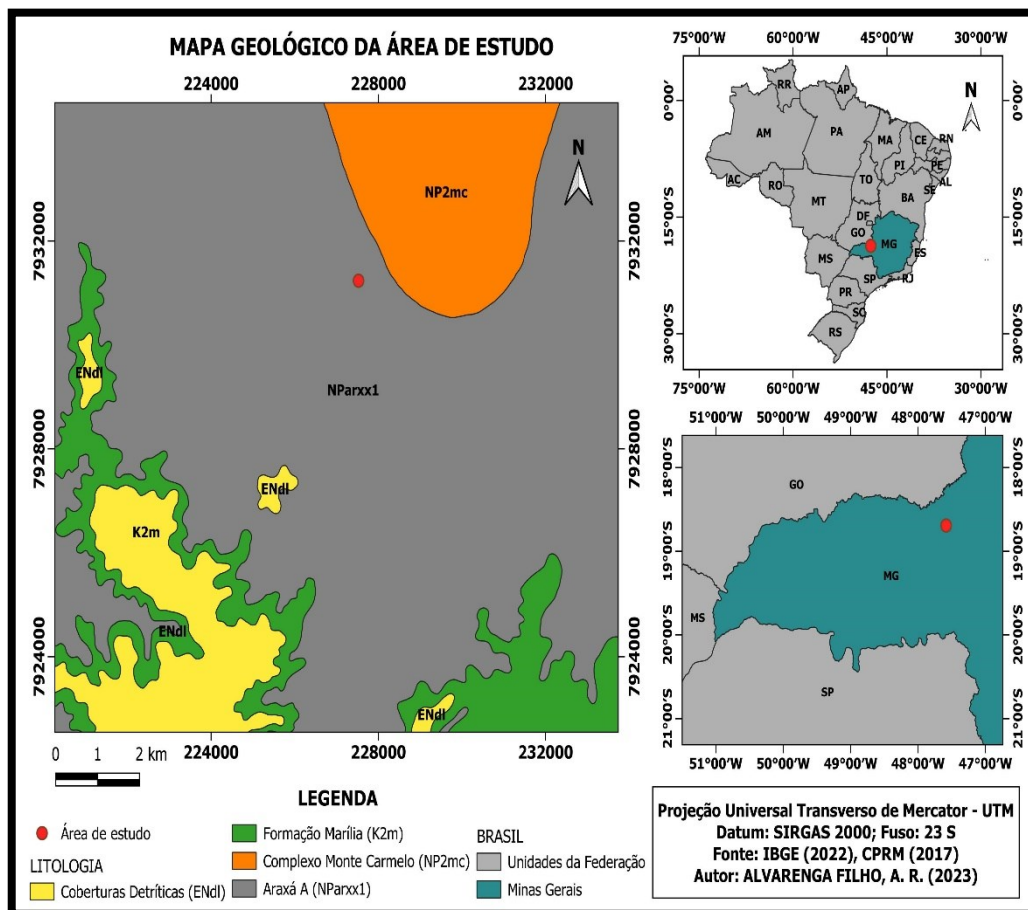


Figura 19. Mapa geológico da área de estudo adaptado CPRM (2017).

### 5.5 O método do Potencial Espontâneo (SP)

Tendo em vista que a maior parte das barragens no Brasil é caracterizada pelo seu uso no represamento de corpos d'água para uso em irrigação, é necessário que existam métodos que forneçam dados acerca do comportamento dos fluxos de água a partir do represamento artificialmente induzido (GALLAS, 2005). O método de SP é um método de investigação não invasiva e de fonte natural que parte do pressuposto que o transporte de íons dissolvidos na água subterrânea proporciona um desequilíbrio no acúmulo de cargas elétricas em uma camada saturada, gerando assim uma diferença de potencial elétrico de difusão devido ao fluxo da água e que pode ser medida a partir de dois eletrodos inseridos na superfície do terreno referente à área de estudo. Além das características

técnicas do SP, também se destaca a sua simplicidade instrumental e operacional em relação à aplicabilidade em campo, bem como o baixo custo associado à confecção de eletrodos e outros materiais necessários para a execução dos levantamentos (GALLAS, 2005).

O SP possui um histórico emprego em levantamentos de superfície na geologia de exploração de sulfetos (SATO e MOONEY, 1960; TELFORD, GELDART e SHERIFF, 1994), em estudos ambientais (CORWIN, 1992; DOHERTY et al., 2010; SHAO et al., 2014; WARD, 1990), testes de bombeamento em poços tubulares (CAPELLETI, 1987; MAINEULT et al., 2008; TITOV et al., 2005, 2015) e na geologia de engenharia, sendo este último voltado principalmente a estudos de fluxos de água e/ou percolação em barragens (WANG et al, 2018).

Ao longo de todo o século XX o SP foi amplamente utilizado nos EUA como método principal de monitoramento de fluxos e anomalias nessas barragens. No século XXI o SP continuou a ser utilizado, mas como um método auxiliar ao método de eletrorresistividade, sendo utilizado ainda em muitos países como método principal para esta finalidade devido à sua relação custo-benefício, especialmente nos países emergentes (REVIL e JARDANI, 2013).

O SP é capaz de fornecer evidências acerca da suscetibilidade de uma porção da barragem à infiltração de água, porém a análise dos dados é feita majoritariamente de forma qualitativa visto que informações como profundidade e velocidade do fluxo da água não são contempladas pelo SP (GALLAS, 2005; HACK, 2000; WARD, 1990). Durante décadas o método do SP vem sendo empregado por diversos autores na aplicação de estudos em barragens de terra (AHMED et. al., 2019, 2020; BOGOSLOVSKY e OGILVY, 1970; BOLÈVE et al., 2009; GALLAS, 2020; GEX, 1980; GUIRELLI NETTO et al, 2020; GUO et al. 2022; MERKLER et al., 1989; RITTGERS et al., 2015; ROZYCKI, 2009; SHEFFER e HOWIE, 2003; SILL e KILLPACK, 1982;; WILT e BUTLER, 1990; WILT e CORWIN, 1989), tendo resultado na obtenção de dados valiosos na detecção de zonas de infiltração de água em barragens de terra, bemcomo em barragens de enrocamento.

Gallas (2020) demonstrou a importância da utilização do Potencial Espontâneo (SP) e suas vantagens associadas a estudos tradicionais como a piezometria, bem como ao custo e implementação. O estudo apresentou dois casos de levantamentos de SP em barragens de terra, um mais antigo relativo ao ano de 1996 e outro mais atual relativo ao ano de 2019, observando em ambos a ocorrência de anomalias associadas a infiltrações de água no interior dessas barragens. O autor aborda ainda a questão topográfica da barragem

como fator contribuinte para a ocorrência de anomalias positivas e negativas, observando anomalias em que os locais mais altos possuem potenciais negativos e os locais mais baixos potenciais positivos.

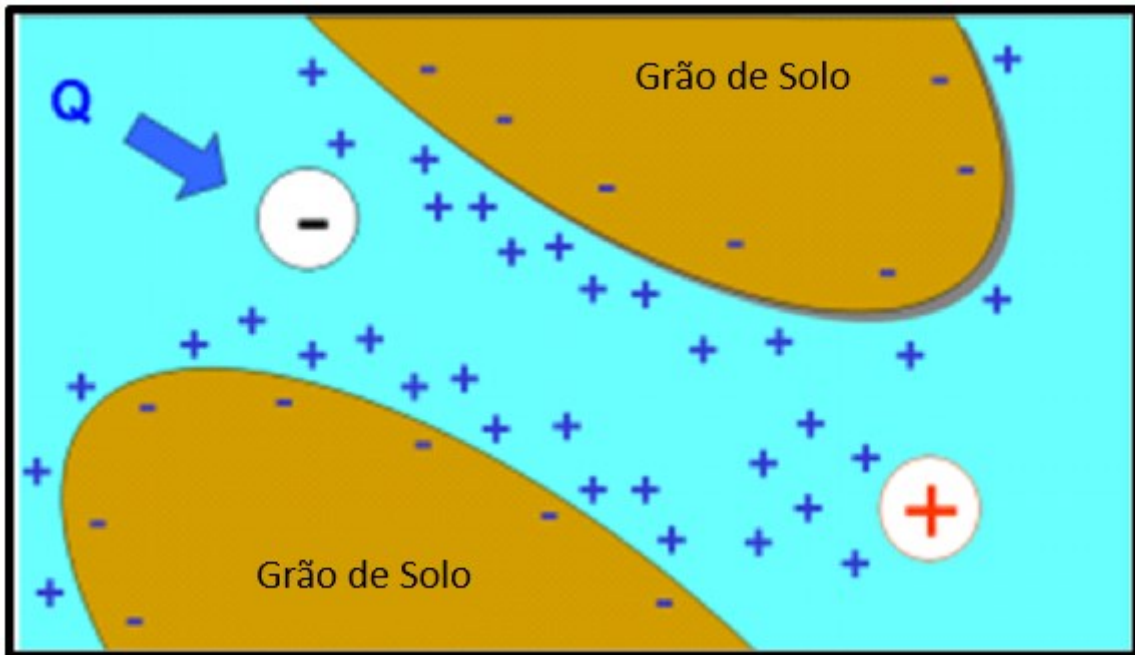
Ahmed et al. (2020) apresentaram um estudo com dados adquiridos em três barragens distintas onde foi realizado o levantamento de SP, aplicando uma análise baseada na de inversão dos dados através dos métodos estocásticos de Monte Carlo e de cadeia de Markov. Esse tipo de abordagem explorou uma análise quantitativa das características da infiltração, focando seus esforços em dois grandes dilemas da eficácia do SP no estudo de infiltração de água em barragens, a inversão dos dados de permeabilidade dos caminhos preferenciais de infiltração, e a identificação de quais maciços rochosos ou de solos são mais sensíveis a anomalias de SP.

O SP é um método utilizado tanto como único método de investigação, quanto associado a outros métodos. Uma revisão bibliográfica apresentada por Oliveira et al. (2022) levantou a natureza dos artigos publicados sobre SP usando como parâmetro os artigos com mais citações, sendo analisados os 16 artigos mais citados relacionados ao SP. Destes, 48% tratavam o SP como único método de pesquisa e 52% utilizava como método integrado a outros como a Eletroresistividade, Polarização induzida (IP), Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT) entre outros. Guo et al. (2022) integraram o método de Potencial Espontâneo (SP) com o método de Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT) buscando determinar com a maior precisão possível o caminho do percurso da infiltração em barragens onde já havia sido constatado índices anormais de infiltração de água. Os autores demonstram que a união do SP com o ERT é eficaz para esse tipo de investigação.

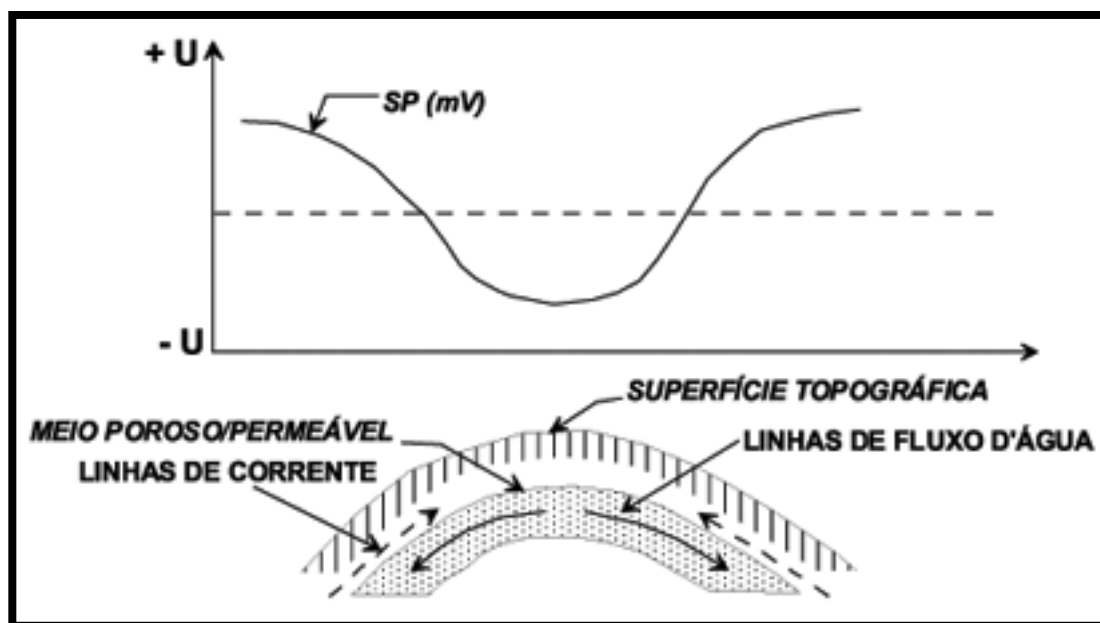
Estudos recentes têm ainda abordado o uso de métodos de inversão de dados geofísicos para uma análise mais completa (ESSA et al, 2023) e de forma quantitativa (REVIL e JARDANI, 2013; WAGNER et al., 2019; ZHAO, NASSER e HAN, 2013), porém estas abordagens fogem do escopo deste trabalho. Dessa maneira, é seguro afirmar que o método de potencial espontâneo é um método tradicional e amplamente validado para esse tipo de aplicação na geologia de engenharia onde, além da sua importância, há destaque na literatura recente também para as diversas formas e técnicas de aplicação em barragens de terra, incluindo recomendações de dimensões, espaçamento e caminhamento a serem empregados na análise da barragem por esse método (EVERETT, 2013; FLORSCH e MUHLACH, 2018; REVIL e JARDANI, 2013).

## 5.6 Potenciais de fluxo em barragens de terra

O potencial de fluxo corresponde a todo potencial elétrico gerado pela movimentação de fluidos através de meios porosos, sejam eles rochas sedimentares, sedimentos inconsolidados ou solos, podendo ocorrer até mesmo em rochas cristalinas fraturadas (REVIL e JARDANI, 2013). A diferença de pressão hidrostática em pontos diferentes da barragem condiciona o surgimento de um fluxo de água gerado pelo gradiente de pressão, forçando o deslocamento do fluido nos poros ou fraturas dos materiais em que ele está percolando. É possível que haja certa quantidade de íons provenientes de sais dissolvidos na água e capazes de interagir eletricamente com a interface entre o grão mineral e a água presente nos poros em uma região que se denomina de camada dupla (Figura 20) (MAINALI, 2006). A região do grão mineral mais próxima à interface deste com a água apresenta cargas elétricas predominantemente negativas, o que faz com que íons positivos se fixem à superfície do grão formando uma camada de íons positivos de mobilidade muito reduzida e denominada fixa. Próximo a ela forma-se uma segunda camada em que os íons presentes no fluido são capazes de interagir com aqueles da camada fixa, mas que ainda continuam livres para se movimentarem juntamente com o fluxo da água (Figura 20). A região em que este fenômeno acontece denomina-se camada difusa (WARD, 1990) e a mobilidade dos íons pode ser afetada de acordo com apolaridade das cargas elétricas dos mesmos, de forma que os íons positivos tendem a ter maior mobilidade do que os íons negativos. Estas interações causadas pelo fluxo do fluido provocam o surgimento de uma corrente elétrica de convecção que fará com que as cargas mais positivas sejam transportadas mais facilmente e se acumulem a montante dos poros, enquanto que as cargas mais negativas terão a tendência de se acumular a jusante, criando um diferencial de potencial elétrico denominado Potencial de Helmholtz. Esse processo poderá desencadear em uma desestabilização das cargas positivas e negativas, estando as cargas negativas em alta pressão e as cargas positivas em baixa pressão (FLORSCH e MUHLACH, 2018).



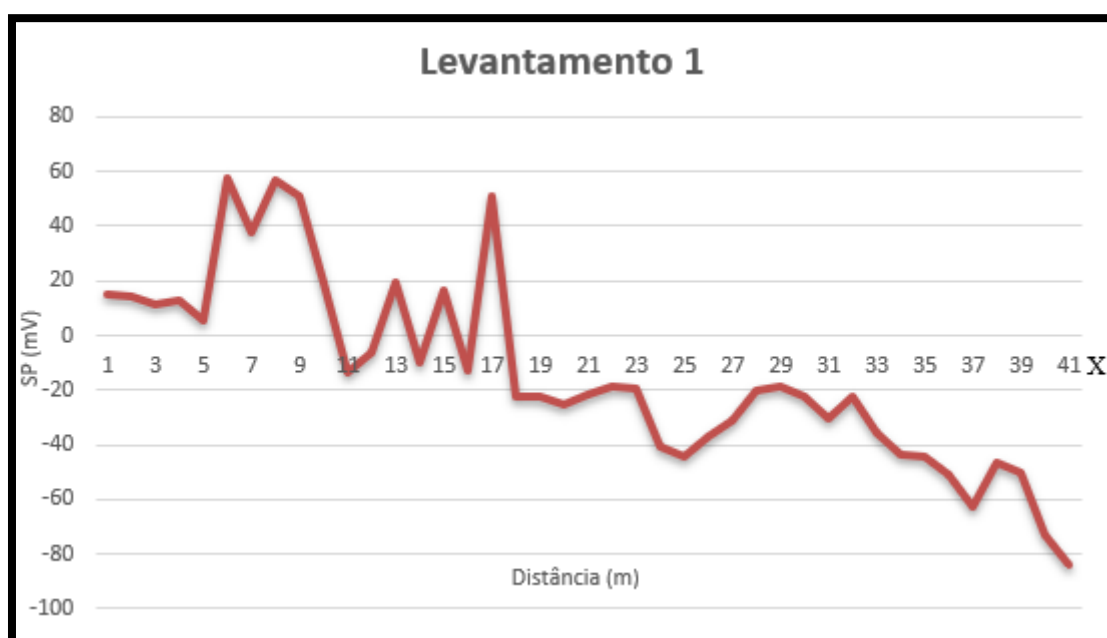
**Figura 20.** Cargas elétricas positivas e negativas presentes na interface entre o grão mineral e a água que percola pelo material. A predominância de cargas negativas nos limites dos grãos atrai íons positivos dissolvidos na água formando uma camada de cargas elétricas fixas, que por sua vez facilita a mobilidade das cargas elétricas positivas e dificulta a mobilidade das cargas negativas devido a fenômenos eletrostáticos. As cargas elétricas opostas acumulam-se em regiões diferentes do material criando uma diferença de potencial denominada Potencial de Helmholtz (MAINALI, 2006).



**Figura 21.** Desenho esquemático de potencial de fluxo (Gallas, 2005).

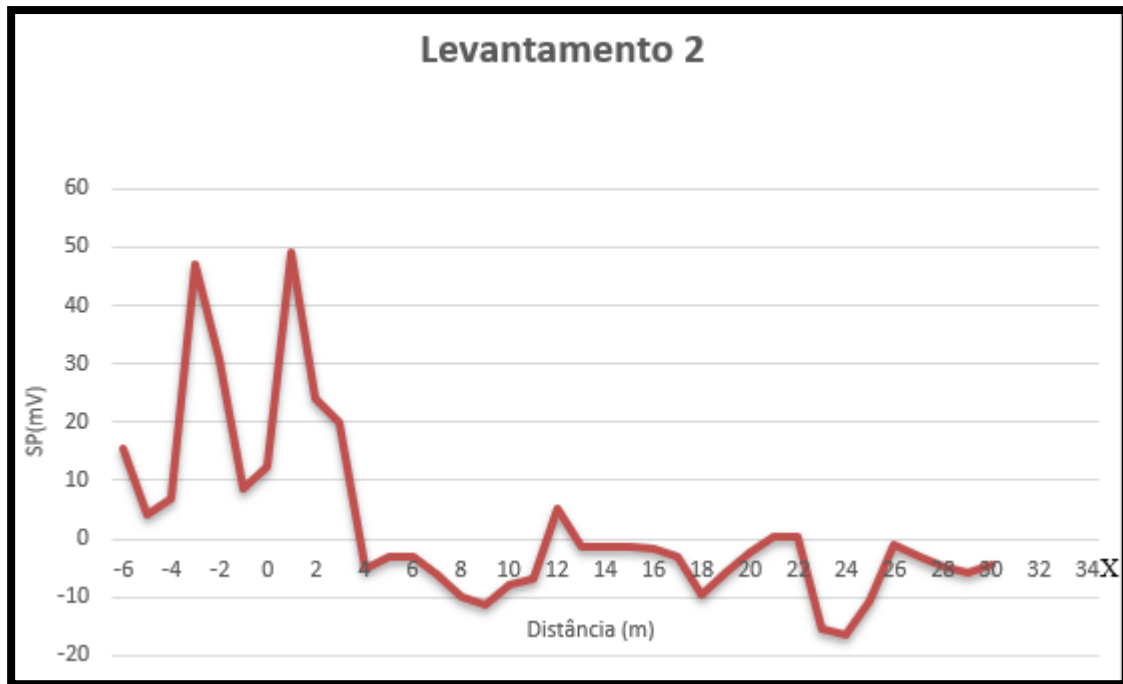
## 6. Resultados e discussões

Os resultados das três linhas de levantamentos executadas (L1, L2 e L3) são apresentados a seguir em forma de gráficos de potencial elétrico em função da distância (Figuras 22, 23 e 24). O perfil L1 é caracterizado por uma tendência decrescente em função da distância, com picos de potencial predominantemente positivos na primeira metade e predominantemente negativos na segunda metade. Os pontos de coordenadas  $x = 4,0$  m,  $x = 5,0$  m,  $x = 7,0$  m e  $x = 9,0$  m apresentaram as primeiras anomalias negativas do levantamento. Do ponto de coordenada  $x = 11,0$  m ao de coordenada  $x = 34,0$  m foram detectados potenciais negativos variando até  $-84$  mV em valores corrigidos.



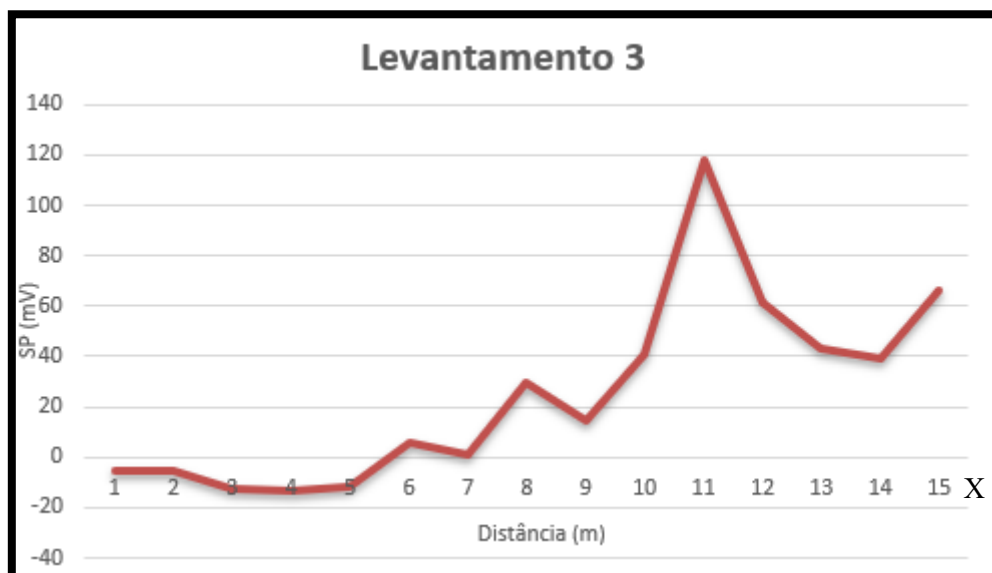
**Figura 22.** Dados obtidos a partir do levantamento L1, na coordenada  $y = 0,0$ m.

Assim como na linha L1, os dados do Levantamento L2 mostram uma tendência decrescente em função da distância, porém de forma menos acentuada. Foram observados picos de valores positivos da ordem de 50 mV nas coordenadas iniciais, passando a apresentar valores de potencial elétrico predominantemente negativos a partir da coordenada  $x = 4,0$  m. Entretanto, os dados da linha L2 apresentaram uma variação menor dos valores negativos do que os dados da L1, ficando acima de  $-20,0$  mV.



**Figura 23.** Dados obtidos a partir do levantamento L2, na coordenada  $y = 2,0\text{m}$ .

Foi observado um comportamento diferente dos dois anteriores, com valores predominantemente negativos no início e picos de potencial positivos a partir da coordenada  $x = 8,0\text{ m}$ . Assim como no levantamento L2 os valores mais negativos se mantêm acima de  $-20\text{ mV}$ . Em contrapartida, o potencial positivo chega a atingir  $118,1\text{ mV}$ , o que é mais do que o dobro daquele observado nas coordenadas iniciais de L2.

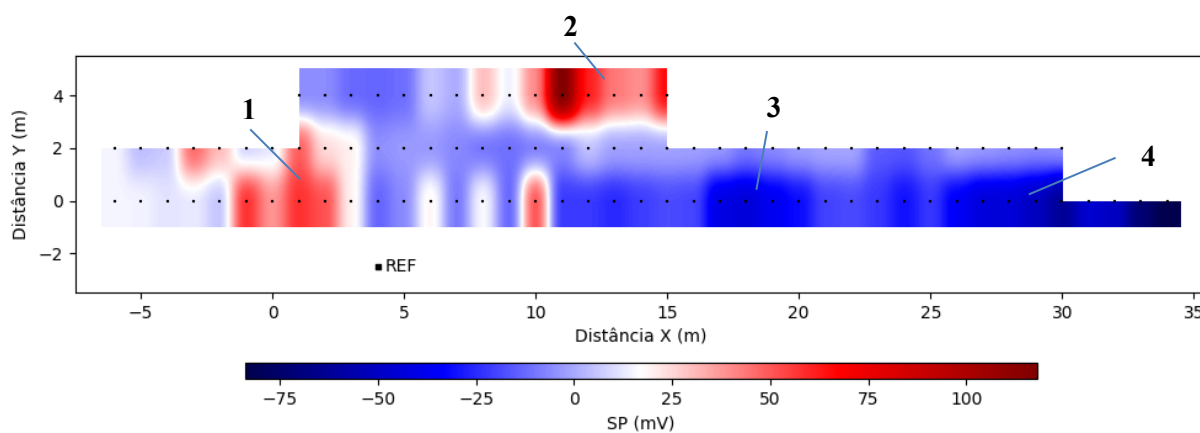


**Figura 24.** Dados obtidos a partir do levantamento L1, na coordenada  $y = 4,0\text{m}$ .

A figura 25 mostra um mapa com a interpolação dos valores de potencial, no qual podem ser observadas duas regiões anômalas positivas (1 e 2) e duas regiões anômalas negativas (3 e 4).



Há uma inconsistência nos dados adquiridos entre os pontos de coordenadas  $x = 11,0$  m e  $x = 15,0$  m, associada a coleta dos dados em que foi verificado uma alta resistência de contato além de uma área com a presença de buracos extensos (Fig 26 e 27), se este tipo de problema apresentado não ocorresse o esperado seria a detecção de anomalias negativas mais suaves dando continuidade da anomalia destacada como 3. Esta inconsistência pode ser causada por ruídos nos dados, dada a presença de uma bomba próxima ao local de estudo utilizada para extração da água represada. O comportamento das anomalias sugere a existência de infiltração de água no interior da barragem entre os pontos de coordenadas  $x = 16,0$  m e  $x = 20,0$  m, e entre as coordenadas  $x = 25,0$  m e  $x = 34,0$  m do levantamento. O fluxo da água no primeiro intervalo estaria ocorrendo da região de coordenadas  $x = 16,0$  m e  $x = 20,0$  m de L1 em direção aos pontos de coordenadas  $x = 10,0$  m e  $x = 15,0$  m de L3 ( $y = 4,0$  m), devido ao caráter positivo da anomalia observada. Não é possível indicar com segurança a direção de fluxo da infiltração sugerida pela anomalia presente no segundo intervalo devido à falta de dados em coordenadas mais próximas. A presença de cavidades observadas em L3 reforça a possibilidade de erosão interna por *piping*, similar ao caso reportado por Bolève et al. (2014) em que anomalias de SP em 2, relacionadas à presença de fendas sugeriram que fluxo de água seria um fator contribuinte para a ocorrência das mesmas.



**Figura 25.** Gráfico de SP com os dados interpolados identificando as anomalias.

Embora L3 tenha apresentado valores próximos aos dos outros dois levantamentos nas porções iniciais, a partir da coordenada  $x = 10,0$  m foram observados valores positivos de potencial elétrico. Os valores mais significativos, nos pontos de coordenadas  $x = 11,0$  m e  $x = 12,0$  m, devem-se possivelmente resistência de contato muito alta, acima de  $80$  k $\Omega$  e muito mais alta do que aquela observada nas demais estações, o que dificultou a coleta de um dado confiável. Esta resistência de contato elevada possivelmente está associada à ocorrência de buracos baixo dos pontos de coleta e dados do levantamento, os quais tiveram sua profundidade verificada tendo um trado manual de  $1,5$  m de extensão como escala (Figuras 26 e 27).



**Figura 26.** Buraco próximo ao ponto 11.



**Figura 27.** Buraco com quase 1,5 metros de extensão.

L3 foi iniciado na coordenada  $x = 1,0$  m devido à presença de um bambuzal que impediu que este levantamento se iniciasse na coordenada  $x = -6,0$  m, como foi feito para L1 e L2. As anomalias positivas que ocorrem entre as coordenadas  $x = -3,0$  m e  $x = 4,0$  m em L1 e L2 podem ser justificadas pela presença deste bambuzal próximo à área. Voytek et al. (2019) sugere que plantas com raízes substancialmente grandes podem alterar as medidas realizadas com o método SP por influenciarem o fluxo da água que percola em subsuperfície. Como os íons positivos tendem a ser deslocados na direção do fluxo, é provável que as anomalia positiva nas coordenadas iniciais da área investigada tenham sofrido influência deste fator.

## 8 Conclusões e Recomendações

Anomalias de SP negativas foram observadas no local de estudo, as quais podem indicar infiltração de água ao longo dos levantamentos de perfis L1 e L2. A resistência de contato menor do que  $10 \text{ k}\Omega$  observada na maioria dos pontos destes levantamentos, embora ainda não fosse a ideal, permitiram obter maior confiabilidade dos dados coletados além dos perfis manterem uma relação entre os dados coletados.

Em L1 as anomalias negativas são mais negativas, na porção da barragem mais a montante e próxima do reservatório de água. Em L2 o perfil está mais a jusante e as anomalias ainda permanecem nos dados, embora com intensidade reduzida, demonstrando a existência de uma possibilidade de infiltração de água entre as coordenadas  $x = 16,0$  m e  $x = 20,0$  m.

O terceiro perfil, L3 se encontra na porção frontal da barragem e em uma área mais rebaixada, com muitas rachaduras e buracos de tamanhos significativos. Estas feições podem ter interferido nos dados coletados, devido à alta resistência de contato proporcionada.

A interpretação das anomalias indicam fluxo preferencial em áreas mais comprometidas da barragem, sugerindo que esta sofra o processo de *piping*. No entanto, a constatação desse tipo de dano estrutural é necessário realizar outros estudos associados para uma confirmação, como por exemplo um estudo geoquímico da água para aferir a taxa de teor de compostos químicos de solo na mesma, os quais poderiam indicar uma liquefação acelerada. Estes dados, associados às anomalias encontradas, poderiam confirmar tal dano estrutural. Como os dados de SP não permitem avaliar a profundidade da ocorrência, estudos com outros métodos geofísicos como eletrorresistividade, radar de penetração no solo, ou sísmico poderiam fornecer informações valiosas em relação à avaliação desta barragem.

O presente estudo foi importante para constatar a existência de zonas de infiltração preferencial, evidenciando que essa área requer maiores cuidados e manutenções. Os levantamentos

apontaram anomalias negativas significativas na porção investigada, esses dados podem ser utilizados por engenheiros geotécnicos na avaliação de demandas de manutenção e reparos na porção investigada. Dado o cenário de intemperismo associado ao vertedouro, também seria recomendada a implementação de técnicas para a contenção do avanço de ravinas.

## 9 Referências bibliográficas

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de segurança de barragens 2020. Brasília - DF, 2021.
- AHMED, A. REVIL, A. BOLÈVE, B. STECK, C. VERGNIAULT, J.R. COURIVAUD, D. JOUGNOT, M. ABBAS. Determination of the permeability of seepage flow paths in dams from self-potential measurements. *Engineering Geology*, v. 268, n. 105514, 2020.
- AHMED, A. REVIL, B. STECK, C. VERGNIAULT, A. JARDANI, G. VINCESLAS, G. Self-potential signals associated with localized leaks in embankment dams and dike. *Engineering Geology*, v. 253, p. 229-239, 2019.
- BARDE-CABUSSON, S; FINIZOLA, A; GROBBE, N. A practical approach for self-potential data acquisition, processing, and interpretation. *Interpretation*, v. 9, n. 2, p. T315-T329, 2021.
- BAIMA, S; CAMPOS, J. Classificação de risco de barragens por índices de risco – um estudo de caso. *Geotecnia*, n. 132, 2014.
- BOGOSLOVSKY, V. A. & OGILVY, A. A. Deformation of natural electric fields near drainage structures. *Geophysical Prospecting*, 1973.
- BOGOSLOVSKY, V. A. OGILVY, A. A. Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dams. *Geophysical Prospecting*. v. 18 ed. 1. p. 758-773, Londres, 1970.
- BOLÈVE, A. REVIL, A. JANOD, F. MATIUZZO, J. L. Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography, *Near Surface Geophysics*, p.p 447-462. 2009.
- BOLÈVE, A.; JANOD, F.; REVIL, A.; LAFON, A.; FRY, J. J. Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection. *Journal of Applied Geophysics*, v. 109, p. 78-89, 2014.
- CANDEIRO, C. R. A. Geologia e Paleontologia de Vertebrados da Formação Marília (Neomaastriquiano) no Sítio Paleontológico de Peirópolis. *Revista Caminhos de Geografia*, v. 6, n. 16, p. 91-101, dez. 2005. Uberlândia-MG.
- CHAVES, C. D. MARQUES, T. F. Folha de Estrela do Sul, 1:100.000. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais - CODEMIG, Mapa Geológico, Belo Horizonte – MG, 2017.
- CORWIN, R. F. Data quality for engineering self-potential surveys, *Lecture Notes in Earth Sciences*, p.p 49-72. 2005.
- COSTA, W. D. Geologia de Barragens, Editora Oficina de Textos, São Paulo, v.1, n. 1, p. 24-29, 2016.

DOHERTY, R. KULESSA, B. FERGUSON, A. S. LARKIN, L. A. KULAKOV, R. KALLIN, M. A microbial fuel cell in contaminated ground delineated by electrical self-potential and normalized induced polarization data, *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, Washington, D.C, v. 115, G00G08, p. 1-11, 2010.

DOLITTLE, W. E. Traditional uses of check dams: a global and historical introduction. Editores: C. C. Garcia and M. A. Lenzi. Nova Science Publishers New York, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2010.

ESSA, K. S.; DIAB, Z. E.; MEHANE, S. A. Self-potential data inversion utilizing the Bat optimizing algorithm (BOA) with various application cases. *Acta Geophysica*, v. 71, p. 567-586, 2023.

ESTADO DE MINAS. Represa com risco máximo de rompimento terá que ser esvaziada em MG. Estado de Minas, 16 jan. 2023. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2023/01/16/interna\\_gerais,1445563/represa-com-risco-maximo-de-rompimento-tera-que-ser-esvaziada-em-mg.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2023/01/16/interna_gerais,1445563/represa-com-risco-maximo-de-rompimento-tera-que-ser-esvaziada-em-mg.shtml). Acesso em: 30 mar. 2023.

ESTADO DE MINAS. Barragem em Uberlândia se rompe e atinge rio Uberabinha. Estado de Minas, 22 jul. 2022. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2022/07/22/interna\\_gerais,1382024/barragem-em-uberlandia-se-rompe-e-atinge-rio-uberabinha.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2022/07/22/interna_gerais,1382024/barragem-em-uberlandia-se-rompe-e-atinge-rio-uberabinha.shtml). Acesso em: 30 mar. 2023.

EVERETT, M. E. *Near-Surface Applied Geophysics*, Publishing Texas A&M University, College Station, 2013.

FLORES-BARRONES; R. LOPEZ-ACOSTA, P. N. Internal Erosion Due to Water Flow Through Earth Dams and Earth Structures. *Soil Erosion Studies*, In Tech Publishers, Rijeka: Croatia, 2011. v.1 n. 14, p. 286-306. Suplemento 14.

FLORSCH, N. MUHLACH, F. *Everyday Applied Geophysics 1*. Elsevier, London, 2013.

FRASER-JONES, I. C. Geotechnical input in embankment dam construction and the influence of geosynthetics in the overall design. Doctoral thesis, Stellenbosch University, 2017.

G1. Barragens do Triângulo, Noroeste e Alto Paranaíba são classificadas em categoria de risco alta. G1, 13 set. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2020/09/13/barragens-do-triangulo-noroeste-e-alto-paranaiba-sao-classificadas-em-categoria-de-risco-alta.ghtml>. Acesso em: 30 mar. 2023.

G1. VÍDEO: Gerente de fazenda é autuado por não informar rompimento de barragens de pequeno porte em Paracatu. G1, 02 fev. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2022/02/02/video-gerente-de-fazenda-e-autuado-por-nao-informar-rompimento-de-barragens-de-pequeno-porte-em-paracatu.ghtml>. Acesso em: 30 mar. 2023.

GALLAS, J. D. F. O método de Potencial Espontâneo (SP) - uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro - RJ, vol. 23, p. 133-144, 2005.

GEX, P. Electrofiltration phenomena associated with several dam sites. Bulletin of the Society Vaud Science and Nature, 1980.

GUERRA, A. J. T. Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, A. J. T. SILVA, A. S. S. BOTELHO, R. G. M. Erosão e Conservação dos Solos. 9. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014. p. 17-55.

GUIRELI NETTO, L; MALAGUTTI FILHO, W; GANDOLFO, O. C. B. Detection of seepage paths in small earth dams using the self-potential method (SP). Rem: Revista Escola de Minas, v. 73, n. 3, p. 303-310, 2020.

GUO, Y et al. Seepage detection in earth-filled dam from self-potential and electrical resistivity tomography, Engineering Geology, 306, 2022.

HACK, R. Geophysics for Slope Stability, *Surveys in Geophysics*, Perth- Australia, v. 21, p. 423-448, 2000.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. Geofísica de exploração. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de textos, 2009.

KUTZNER, C. Earth and Rockfill Dams: Principles of Design and Construction, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, v. 1, n. 1, p. 1-8, 1997.

LACERDA FILHO J. V. & OLIVEIRA C. C. Geologia da região centro-sul de Goiás. Revista Boletim de Geociências do Centro-Oeste, Goiânia-GO, v. 18, n. 1/2, p. 3-19, 1994.

MAINALI, G. Monitoring of tailings dams with geophysical methods, Licentiate thesis, Luleå University of Technology. Luleå, 2006.

MASSAD, F. Obras de Terra: curso básico de geotecnia, Editora Oficina de Textos, 2. ed., São Paulo: São Paulo, 2003.

MERKLER, G. P, MILITZER, H., HOTZL, H., ARMBRUSTER, H. & BRAUNS, J. Detection of subsurface flow phenomena. Lecture Notes in Earth Sciences, 27. Springer, Berlin/Heidelberg, 1989.

MILANEZ, B; WANDERLEY,. O número de barragens sem estabilidade dobrou, "e daí?" uma avaliação da (não) fiscalização e da nova Lei de (in)Segurança de Barragens. VERSOS, PoEMAS, v. 4, n. 4, Juiz de Fora, 2020.

MONTE FM. Defesa Civil orienta moradores da comunidade do Atalho a saírem de suas casas após constatarem risco de rompimento em represa. Monte FM, 24 fev. 22. Disponível em: <https://www.montefm.com.br/noticias/defesa-civil-orienta-moradores-da-comunidade-do-atalho-a-sairem-de-suas-casas-apos-constatarem-risco-de-rompimento-em-represa>. Acesso em: 31 mar. 2023.

OLIVEIRA, Luiz Antônio de & CAMPOS, José Elói Guimarães. Sequência Conglomerática do Membro Araguari - Grupo Bauru - Norte do Triângulo Mineiro. Revista Geociências, v. 22, n. 2, p. 147-152, jul./dez. 2003. Uberlândia-MG.

OGILVY, A. A., AYED, M. A. & BOGOSLOVSKY, V. A. Geophysical studies of waterleakage from reservoirs. Geophysical Prospecting, v.17, n. 1, p. 36-62, 1969.

PATOS NOTÍCIAS. Barragem se rompe em Perdizes (MG). Patos Notícias, 31 maio 2020. Disponível em: <https://patosnoticias.com.br/barragem-se-rompe-em-perdizes-mg/>. Acesso em: 31 mar. 2023.

PATROCÍNIO ONLINE. Vídeo: Bombeiros de Patrocínio e engenheiro constataram risco de rompimento em uma represa de irrigação e fornecimento de água da região. Patrocínio Online, 22 fev. 2022. Disponível em: <https://www.patrocinioonline.com.br/noticia/video-bombeiros-de-patrocinio-e-engenheiro-constataram-risco-de-rompimento-em-uma-represa-de-irrigacao-e-fornecimento-de-agua-da-regiao-53929.html>. Acesso em: 30 mar. 2023.

PIMENTA, R. F. Caracterização Geológica de Granitóide no Distrito Gonçalves, Município Monte Carmelo – MG. Universidade Federal de Uberlândia. Trabalho de Conclusão de Curso, Monte Carmelo-MG, 2020.

REDE BRASIL ATUAL. Rachaduras comprometem barragem 60 vezes maior que a de Brumadinho. Rede Brasil Atual, 13 mar. 2020. Disponível em: <https://www.redebrasilatual.com.br/ambiente/rachaduras-comprometem-barragem-60-vezes-maior-que-a-de-brumadinho/>. Acesso em: 30 mar. 2023.

REVIL, A. JARDANI, A. The Self-Potential Method, Theory and Applications in Environmental Geosciences. Cambridge University Press, 1<sup>o</sup> Edition, Cambridge-NY, 2013.

ROUSHANGAR, K; GAREKHANI, S; ALIZADEH, F. Forecasting Daily Seepage Discharge of an Earth Dam Using Wavelet–Mutual Information–Gaussian Process Regression Approaches. Geotechnical and Geological Engineering, v. 34, n. 3, p. 843-860, Jun. 2016.

ROZYCKI, A. Evaluation of the streaming potential effect of piping phenomena using a finite cylinder model. Engineering Geology, v. 104, n.1-2, p. 98–108, 2009.

RIBAS, J.; SEVERO, J. C. R. ; FELIX, L. C. G; PERPETUO, K. P. C. Prioritization of hydroelectric power plant earth dam safety procedures: a multi-criteria Environmental Earth Sciences, vol. 80, issue 24, id. 815, 2021.

RITTGERS, J. B. Time-lapse joint inversion of geophysical data with automatic joint constraints and dynamic attributes. Geophysical Journal International, v. 207.

SANTOS, B. L. SIMÕES, L. S. A. SEER, H. J. Evolução estrutural do domínio interno da Faixa Brasília meridional na região de Estrela do Sul, Minas Gerais, Brasil. Revista Geociências UNESP, Rio Claro, SP, v. 40, n. 2, p. 287-305, 2021.

SATO, M. & MOONEY, H. M. The electrochemical mechanics of sulfide self-potentials. GEOPHYSICS, v. 25, n. 2, p. 226-249, Feb. 1960.

SHAO, Z. WANG, D. WANG, Y. ZHONG, X. Theory and application of magnetic and self-potential methods in the detection of the Heshituoluogai coal fire, China. Journal of Applied Geophysics, v. 104, p. 64-74, 2014.



SHEFFER, M. R. HOWIE, J. A. A numerical modelling procedure for the study of the streaming potential phenomenon in embankment dams. In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, San Antonio, Texas, USA, p. 475-487, 2003.

SILL, W. KILLPACK, T. SPXCPL: Two-dimensional modelling program of self-potential effects from cross-coupled fluid and heat flow, user's guide and documentation for version. 1. ed., 1982.

SRIVASTAVA, A; BABU, G. L. S.; HALDAR, S. Influence of spatial variability of permeability property on steady state seepage flow and slope stability analysis. *Engineering Geology*, v. 110, n. 3-4, p. 93-101, fev. 2010.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press, 1990.

TITOVA, T. S.; LONGOBARDI, A; AKHTYAMOV, R. G.; NASYROVA, E. S. Lifetime of earth dams. *Magazine of Civil Engineering*, v. 69, n. 1, p. 34-43, fev. 2017.

TITOV, K.; REVIL, A.; KONASOVSKY, P.; STRAFACE, S.; TROISI, S. Numerical modeling of self-potential signals associated with a pumping test experiment. *Geophysical Journal International*, v. 162, p. 641-650, 2005.

UHLEN, A.; FONSECA, M. A.; SEER, H. J.; DARDENNE, M. A. Tectônica da Faixa de dobramentos Brasília, setor setentrional e meridional, *Revista Geonomos*, p. 1-14, Belo Horizonte, MG, 2013.

VOYTEK, E; BARNARD, H. R.; JOUGNOT, D; SINGHA, K. Transpiration- and precipitation-induced subsurface water flow observed using the self-potential method. *Hydrological Processes*, v. 201, 2020.

WAGNER, F. M. Quantitative imaging of water, ice and air in permafrost systems through petrophysical joint inversion of seismic refraction and electrical resistivity data. *Geophysical Journal International*, p. 1866-1875, 2019.

WANG, F.; OKEKE, A. C.; KOGURE, T.; SAKAI, T.; HAYASHI, H. Assessing the internal structure of landslide dams subject to possible piping erosion by means of microtremor chain array and self-potential surveys. *Engineering Geology*, v. 234, p. 11-26, 21 fev. 2018.

WARD, S. H. *Geotechnical and environmental geophysics, Volume I: Review and tutorial*, Edited Society of Exploration Geophysicists, Printed USA, 1990.

WHITMAN, R. V. Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, n. 5, p. 371-372, May 2000.

WILT, M. J.; BUTLER, D. K. Geotechnical applications of the self-potential (SP) method; Report 4. Numerical modelling of SP anomalies: documentation of program. SPPC and applications. Washington: DC, 1990.

WILT, M. J.; CORWIN, R. F. Numerical modelling of self-potential anomalies due to leaky dams: Model and field examples. In: Detection of Subsurface Flow Phenomena, 1989.

ZHANG, L.M.; XU, Y.; JIA, J.S. Analysis of earth dam failures: A database approach. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2009.

ZHAO, L.; NASSER, M. HAN, D. Quantitative geophysical pore-type characterization and its geological implication in carbonate reservoirs. Geophysical Prospecting, v. 61, n. 4, p. 827-841, 2013.

### LINHA DE AQUISIÇÃO L1

X (m)	Y (m)	SP (mv)
-6	0,0	15
-5	0,0	14.7
-4	0,0	11.8
-3	0,0	13.4
-2	0,0	6.3
-1	0,0	58.5
0	0,0	38.7
1	0,0	58
2	0,0	52.3
3	0,0	20.7
4	0,0	-12
5	0,0	-4.5
6	0,0	20.6
7	0,0	-8
8	0,0	18
9	0,0	-11
10	0,0	53
11	0,0	-20
12	0,0	-20
13	0,0	-23
14	0,0	-19
15	0,0	-15.8
16	0,0	-17
17	0,0	-38
18	0,0	-41
19	0,0	-34
20	0,0	-28
21	0,0	-17
22	0,0	-15
23	0,0	-19
24	0,0	-26.5
25	0,0	-18.5
26	0,0	-31.5
27	0,0	-39.3
28	0,0	-40
29	0,0	-46.5
30	0,0	-58
31	0,0	-42
32	0,0	-45.5
33	0,0	-68.3
34	0,0	-79

**Ponto  $x = -6,0$  m (primeira medida 11:00 h): 15 mV**

**Ponto  $x = -6,0$  m (45 minutos após a primeira medida, 11:45 h): 20 mV**

## LINHA DE AQUISIÇÃO L2

X (m)	Y (m)	SP (mV)
-6	2,0	15.2
-5	2,0	4
-4	2,0	6.8
-3	2,0	47
-2	2,0	30.8
-1	2,0	8.5
0	2,0	12.2
1	2,0	49
2	2,0	24
3	2,0	20
4	2,0	-5
5	2,0	-3
6	2,0	-3.2
7	2,0	-6.3
8	2,0	-10
9	2,0	-11.3
10	2,0	-8
11	2,0	-7
12	2,0	5
13	2,0	-1.4
14	2,0	-1.4
15	2,0	-1.2
16	2,0	-1.8
17	2,0	-3.1
18	2,0	-9.6
19	2,0	-6
20	2,0	-2.5
21	2,0	-0.5
22	2,0	-0.5
23	2,0	-15.5
24	2,0	-16.5
25	2,0	-10.7
26	2,0	-1
27	2,0	-3
28	2,0	-4.7
29	2,0	-6
30	2,0	-4.5

**Ponto  $x = -6,0$  m, primeira medida (13:00 hrs): 15,2 mV**

**Ponto  $x = -6,0$  m, última medida (14:04 hrs): 15,2 mV**

### LINHA DE AQUISIÇÃO L3

X (m)	Y (m)	SP (mV)
1	4,0	-5.6
2	4,0	-6.5
3	4,0	-14
4	4,0	-16
5	4,0	-15.5
6	4,0	1.3
7	4,0	-4.5
8	4,0	14.4
9	4,0	-2.2
10	4,0	23.2
11	4,0	100
12	4,0	42.7
13	4,0	23.7
14	4,0	18.4
15	4,0	44.8

X (m)	RESISTÊNCIA DE CONTATO (k $\Omega$ )
11	70
12	36
13	14.4
15	24

Ponto  $x = 1,0$  m, primeira medida (14:05 hrs): -5. 6 mV

Ponto  $x = 1,0$  m, última medida ( 14:57 hrs): - 17.5 mV