



## Técnicas geofísicas para a detecção de piping: uma revisão de literatura

## Técnicas geofísicas para la detección de sufusión: revisión de la literatura

Santos, Cleber de Jesus <sup>1</sup> ✉ - Picanço, Jefferson de Lima <sup>2</sup>

Recibido: 10 de enero de 2022 • Aceptado: 30 de mayo de 2022

### Resumo

*A ocorrência de tragédias por rompimento de reservatórios e barragens tem suscitado debates sobre a busca por mecanismos de monitoramento mais seguros e de detecção antecipada. Nessa perspectiva a geotecnia tem explorado progressivamente métodos alternativos no sentido de ampliar o entendimento acerca da ocorrência de danos em barragens. A geofísica desponta como uma metodologia alternativa na superação destes desafios, dada a sua praticidade na obtenção dos dados, capacidade de resolução, relação custo/benefício, para além de utilizarem métodos não invasivos. Assim, o objetivo da pesquisa consiste em apresentar as potencialidades da metodologia geofísica na avaliação de problemas geotécnicos associados a erosões internas, especialmente no caso de piping em barragens. Para tal, foi realizada uma revisão de literatura acerca das metodologias geofísicas que obtiveram êxito na identificação de piping na estrutura de barragens ao longo dos anos. Além disso, serão apresentados os aspectos teóricos relativos a cada método, bem como as vantagens e desvantagens na detecção de piping. Considerando a constatada versatilidade dos métodos geofísicos apresentados, acredita-se que o incremento de informações de geofísica, no monitoramento geotécnico, pode contribuir de forma decisiva na detecção antecipada dos pipings.*

**Palavras-chave:** barragem, geofísica, piping.

### Abstract

*The occurrence of tragedies by rupture of reservoirs and dams has prompted debates about the search for safer monitoring mechanisms and early detection. From this perspective, geotechnical engineering has progressively explored alternative methods to broaden the understanding of the occurrence of damage in dams. Geophysics emerges as an alternative methodology in overcoming these challenges, given its practicality in obtaining data, resolution capacity, and cost/benefit ratio, and above all by to using non-invasive methods. Thus, this research aims to present the potential of geophysical methodology in the evaluation of geotechnical problems associated with internal erosion, namely and piping in dams. To this end, a literature review was conducted about*

1. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Geociências, Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Campinas, Brasil

✉ cleber.geofisico@gmail.com

2. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Geociências, Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Campinas, Brasil

the geophysical methodologies that have successfully identified piping in dam structures over the years. In addition, the theoretical aspects concerning each method will be presented, as well as the advantages and disadvantages in piping detection. Considering the versatility of the geophysical methods presented, it is believed that the increment of geophysical information in geotechnical monitoring can contribute decisively to the early detection of piping.

**Keywords:** dam, geophysics, piping.

## INTRODUÇÃO

A análise técnica de reservatórios e barragens consiste em um ramo da geotecnia que tem evoluído consideravelmente nos últimos anos (Zhu, 2018). O surgimento de novas tecnologias na área tem possibilitado avaliações estruturais cada vez mais seguras, que auxiliam na tomada de decisão para intervenções antecipadas (Zhu et al., 2019), e, por conseguinte, evitam tragédias de grandes proporções, a exemplo das ocorridas recentemente no Brasil (Luo et al., 2019).

A necessidade de aprimoramentos nas avaliações geotécnicas tem impulsionado a busca por informações adicionais através de métodos mais sensíveis, práticos e versáteis. Embora o desenvolvimento de instrumentos tenha permitido avanços em muitos aspectos da Geotecnia de barragens, em alguns casos específicos a instrumentação disponível não apresenta capacidade de imageamento adequada para o problema, como no caso dos *pipings* (Camarero et al., 2019).

Nesse contexto, os métodos de exploração geofísica destacam-se como uma ferramenta de grande importância para análise da integridade da estrutura de barragem (Cardarelli et al., 2014). A possibilidade de investigar as estruturas espacialmente e em profundidade através de varreduras contínuas e sem a necessidade de perfurar ou coletar amostras tem popularizado o seu uso ao longo de décadas (Camarero et al., 2019). Uma ferramenta que

atende as necessidades dos problemas geotécnicos em barragens, como é o caso dos *pipings*. Os quais requerem avaliações rápidas, precisas e relativamente econômicas.

Barragens são estruturas construídas para acumular substâncias fluidas (água, rejeito de mineração). Quanto à finalidade, podem ser classificadas como barragem de regularização, quando destinadas ao controle de déficit hídrico; ou barragens de rejeito, as quais se destinam ao acúmulo de rejeitos de mineração (Foster et al. 1998; Brasil, 2002). Quanto à sua constituição, as barragens podem ser de terra, quando constituídas por material de solo homogêneo - possuindo grandes volumes e larguras - ou de enrocamento, que consiste em um maciço de fragmentos de rocha e terra com um elevado grau de estanqueidade (Fontenelle et al., 2017).

Ao longo dos anos, os reservatórios e barragens de terra podem sofrer processos de fluidificação em seu talude de montante. A evolução deste processo provoca o carreamento de partículas de terra, formando uma erosão interna tubular regressiva de montante para jusante, mais conhecida como *piping* (Figura 1) (Foster e Fell, 1999; Brasil, 2002). Um dano que, ao ser mal administrado, causa o comprometimento da estrutura da barragem e até mesmo rompimentos de grandes dimensões, ocasionando impactos negativos ao meio ambiente e às populações adjacentes (Bovi et al., 2020).

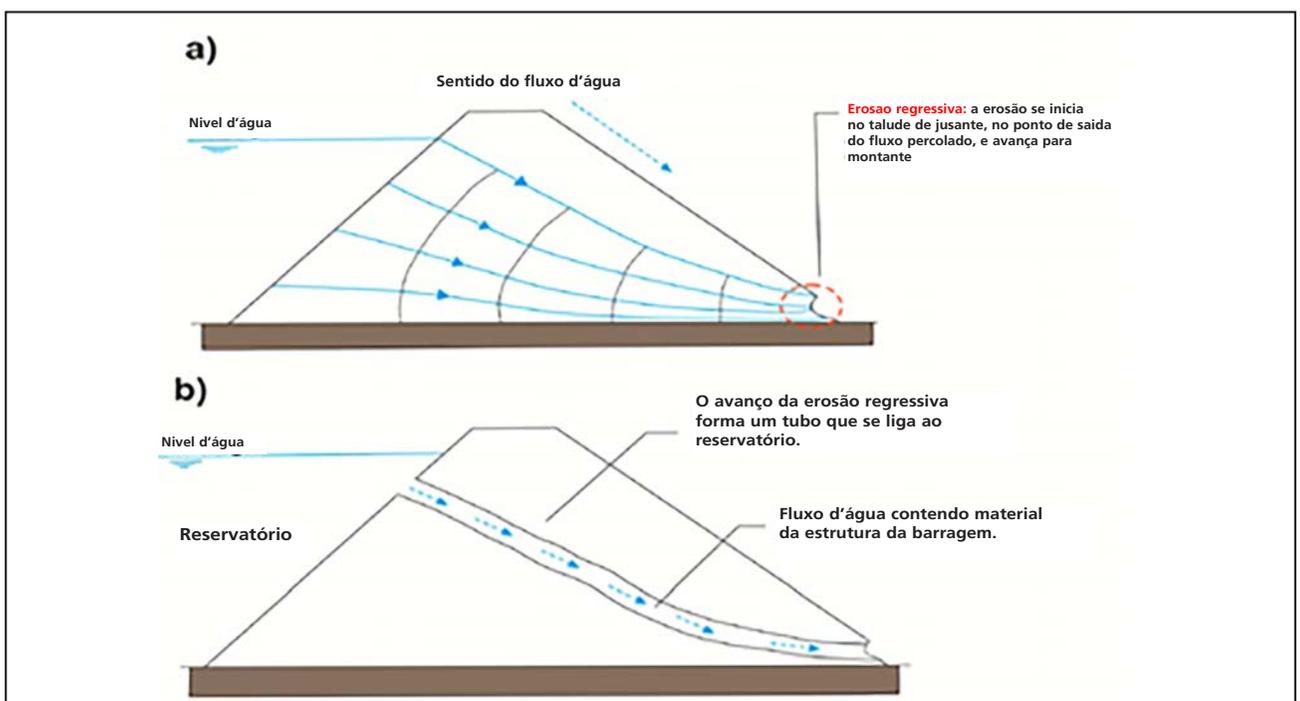


Figura 1. a) Esquema representativo do avanço de uma erosão regressiva. b) Problema do piping completamente estabelecido na barragem. Adaptado de Perini (2009).

Diversas ocorrências do fenômeno de *piping* têm ocorrido pelo mundo, em sua maioria associadas a barragens de terra (Richards e Reddy, 2007). Casos históricos como na barragem de Teton nos EUA em 1976 (Bolton Seed e Duncan, 1987), Panshet na Índia em 1961; Embalse Aromos no Chile em 1984; Gouhou na China em 1993 (Ladeira, 2007) vêm ao longo dos anos se reproduzindo, a exemplo dos casos brasileiros de rompimento das barragens de Fundão (Mariana) e Córrego do Feijão (Brumadinho). Ocorrências que evidenciam o quanto a problemática necessita de atenção por parte dos órgãos governamentais, bem como pela comunidade científica.

Considerando a problemática em questão, temos que a metodologia geofísica tem um potencial decisivo para colaborar na caracterização de estruturas da barragem, pela possibilidade de detecção prévia de infiltrações, erosões internas e *piping*. No presente trabalho serão apresentadas as metodologias geofísicas mais utilizadas, a saber - Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT), Potencial Espontâneo (SP), Ground Penetrating Radar (GPR), Tomografia de Sísmica de Refração ou Reflexão (SRT), Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW); Método Gravimétrico; Resistividade Capacitivamente Acoplada (CCR).

O propósito do trabalho é apresentar os principais métodos geofísicos que oferecem resultados satisfatórios na avaliação e monitoramento da integridade de construções como reservatórios e barragens. O trabalho visa detalhar os princípios físicos, as técnicas de campo, as informações obtidas, as vantagens e desvantagens de cada metodologia, bem como os benefícios obtidos ao aplicar simultaneamente determinadas metodologias geofísicas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Revisão Sistemática de Literatura

A pesquisa ocorreu através de uma revisão sistemática de literatura sobre o uso de técnicas geofísicas para a detecção de danos em barragens, com destaque para os *piping*. A presente revisão de literatura foi realizada por meio da plataforma Web Of Science, ambiente no qual foram coletados os principais artigos científicos na temática supracitada. Na figura 2 temos as etapas realizadas para a revisão sistemática de literatura.

Um dos primeiros estudos associados ao uso de métodos geofísicos em análise de reservatórios e barragens é atribuído a *Ogilby et al. (1969)*. Cabe destaque também os estudos realizados

na década de 80 (Dutta, 1984; Henriet et al., 1983; Schimschal, 1981). Em Schimschal (1981) o reconhecimento geológico-estrutural da barragem foi investigado através de perfilação geofísica de poços e sondagem elétrica vertical para delimitar áreas de perda potencial de água por infiltração. Já Dutta (1984) fez uso da sísmica de refração voltado para a mesma finalidade. Henrie et al. (1983) utilizou a distribuição da velocidade sísmica para detectar a posição exata de um antigo duto de gás subterrâneo no local proposto para a barragem.

Até então, o uso de métodos geofísicos em projetos geotécnicos esteve atrelado à etapa preliminar de construção da barragem, oferecendo contribuições valiosas na fase de inspeção sobre as condições de estanqueidade do terreno na área onde seria construída a barragem; colaborando no detalhamento da caracterização geológica; e também avaliando a influência de estruturas preexistentes na segurança das futuras instalações da barragem.

No transcorrer dos anos a geofísica passou também a ser amplamente utilizada na investigação de problemas associados à integridade de taludes em barragens. Nesta perspectiva, o método de eletrorresistividade passou a ser amplamente utilizado, sobretudo para avaliar infiltrações no corpo da barragem (Cardarelli et al., 2014; Johansson e Dahlin, 1996; Panthulu et al., 2001), cabendo destaque às considerações associadas à necessidade de repetir medidas em um intervalo de tempo como forma de aprimorar o diagnóstico (Johansson e Dahlin, 1996). Cho e Yeom (2007) obtiveram sucesso na identificação de pontos característicos de infiltração através de imagens obtidas com a Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT) em uma barragem localizada na área central da península Coreana. Mais recentemente Camarero et al., (2019) utilizou ERT em duas barragens localizadas no Estado de São Paulo, conseguindo delimitar domínios de percolação de água com relativa facilidade. Destaque também para os estudos como Sjö Dahl et al. (2005) e Sjö Dahl et al. (2008), ambos na Suécia, os quais apresentaram bons resultados na avaliação de áreas indicativas de erosões internas em barragens através de medidas de resistividade elétrica em 2D.

Nas publicações mais recentes percebe-se uma tendência de uso dos métodos geofísicos de forma conjunta, ou seja, na combinação de técnicas. O esforço de tal combinação possibilita analisar de forma comparativa assim como complementar as informações adquiridas com as diferentes técnicas e, consequentemente, permite o aprimoramento da capacidade de interpretação

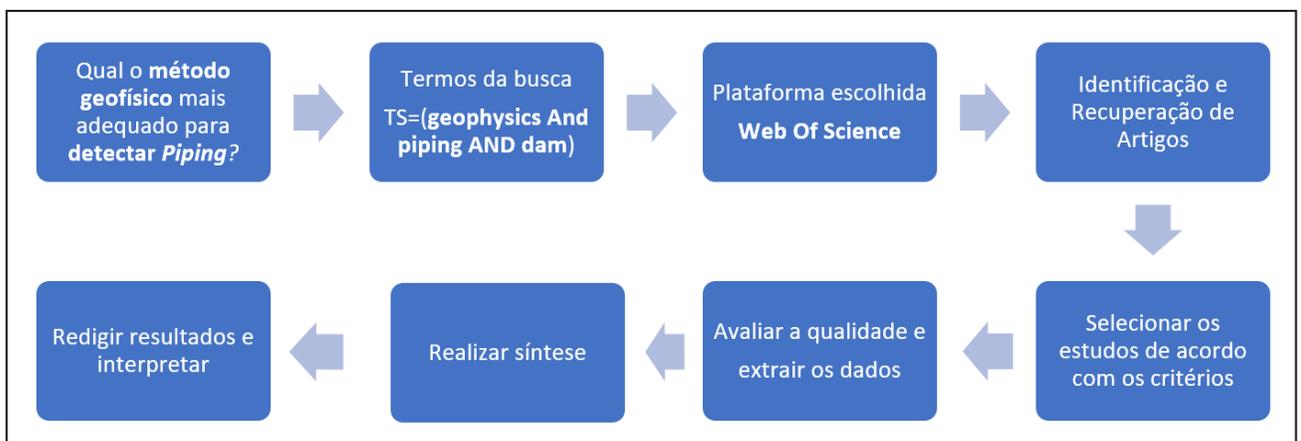


Figura 2. Fluxograma básico das etapas desenvolvidas para a revisão sistemática de literatura.

dos resultados. *Rahimi et al. (2019)* aplicaram Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW) e Resistividade Capacitivamente Acoplada (CCR) em um dique natural, localizado no canal de um rio, para identificar os materiais geológicos presentes e avaliar o grau de coesão. A combinação dos métodos foi decisiva para alcançar os objetivos do estudo, sendo que o MASW tem a capacidade de discriminar os materiais geológicos em profundidade, justamente a limitação do CCR que, em contrapartida, foi capaz de delimitar solos ricos em argila a pequena profundidade.

*Cardarelli et al., (2014)* utilizou ERT, Tomografia de Sísmica de Refração (SRT) e Potencial Espontâneo (SP) na área central da Itália para localizar *piping* em ambientes naturais, em um contexto geológico complexo. O uso conjunto dos métodos produziu resultados satisfatórios, constatação essa que evidencia as amplas hipóteses de obter sucesso na detecção de *piping* em ambientes construídos, como é o caso das barragens. Em *Martínez-Moreno et al. (2015)* foi descrita a aplicação ERT e a microgravidade para identificar pontos de vazamento em uma barragem em Granada, sul da Espanha. O método ERT permitiu detectar pontos de baixa resistividade, porém, ainda assim, havia incertezas quanto à possibilidade de serem correspondentes às infiltrações, ambiguidades associadas ao princípio da não-unicidade da solução na inversão dos dados que, por sua vez, são inerentes aos métodos geofísicos.

*Sentenac et al. (2018)* aplicou método eletromagnético – Sliagram, ERT e SP para monitorar uma barragem na República Tcheca, sendo que as três metodologias apresentaram resultados compatíveis indicando anomalia de resistividade na parte mediana da barragem, indiciando erosões internas em seu estágio inicial. Foram realizadas outras medições na condição de reservatório vazio, procedimento que permitiu avaliar a flutuação da curva de infiltração no corpo da barragem.

Pesquisas têm sido realizadas, também, no sentido de correlacionar dados de geofísica com informações de geotecnia (*Antoine et al., 2015*). *Oh e Sun (2008)* associaram dados de resistividade com sondagens SPT para avaliar a segurança de uma barragem. Do mesmo modo, *Bièvre et al. (2017)* obtiveram resultados satisfatórios associando ERT, SRT e dados de perfilagem de poço. Estudo no qual a sísmica não apresentou uma resposta em virtude da geometria e das pequenas dimensões do dique.

Recentemente, *Kim et al. (2019)* e *Masi et al. (2020)* desenvolveram dois estudos nos quais procuraram avaliar a evolução da erosão interna em um ambiente controlado. Para o efeito, foi projetado um equipamento para teste em laboratório no qual a erosão interna pode ser avaliada por meio da ERT por lapsos de tempo, ou variação ao longo do tempo.

No que diz respeito ao método de Potencial Espontâneo (SP), destacam-se os trabalhos de (*Netto et al., 2018*), que apresenta a aplicação do referido método no contexto de duas barragens de terra (Ipeúna e Cordeirópolis). Através das imagens de potencial espontâneo adquiridas em 2D, foi possível identificar domínios característicos de infiltração na barragem. Ainda que sendo realizado sem o auxílio de outras técnicas, o método SP identificou anomalias com relativa facilidade. O que confirma a aplicabilidade direta do método como um dos principais em situações de monitoramento em barragens. A aplicação direta do método SP em situações de *piping* se justifica na capacidade do mesmo em detectar fluxo de fluido em subsuperfície (*Cardarelli et al., 2014; Gallas, 2005; Netto et al., 2018; Wang et al., 2018*).

Embora se considere o método da Microgravidade como uma ferramenta com potencialidades na análise de infiltrações

na estrutura da barragem, constatou-se que são escassas as publicações voltadas para a temática e que, nas publicações existentes, o uso do método está restrito à condição de ferramenta auxiliar, a exemplo de *Ezersky et al. (2006)* onde foi feita uma análise conjunta de sondagem elétrica vertical (SEV), Ground Penetrating Radar (GPR) e microgravimetria para detectar infiltrações em Israel. *Muguio et al., (2017)* tem realizado monitoramentos em barragens de concretos através de investigações gravimétricas convencionais, visando monitorar o estado de conservação das estruturas.

Já a metodologia de GPR tem sido amplamente utilizada em ambientes de barragem. A praticidade no levantamento dos dados tem contribuído para a difusão desta ferramenta. Estudos como *Pueyo Anchuela et al. (2018)* são representativos em relação ao uso de GPR em diversos compartimentos da barragem para monitorar deteriorações na estrutura e processos de infiltração. *Xu et al. (2010)* aplicou o GPR em diques e barragens no sul da China, conseguindo detectar estruturas de cavidades.

A partir da revisão da literatura percebe-se que o uso da geofísica tem sido feito de forma diferente ao longo dos anos, seja em termos de finalidade, ou mesmo em relação aos procedimentos metodológicos utilizados. No período compreendido entre as décadas de 60 e de 80, a geofísica serviu como ferramenta auxiliar na etapa preliminar da construção das barragens, principalmente na detecção de estruturas no solo, para a verificação de áreas seguras à implantação de barragens. Neste período cabe destacar o frequente uso dos Métodos Sísmicos (refração e reflexão), para além do uso de Perfilagem Geofísica de Poços.

Nas duas décadas seguintes a geofísica passou a ser utilizada também com maior frequência com a finalidade de investigar a integridade de taludes com destaque para o uso de métodos de eletrorresistividade. Em diversas publicações pudemos observar o uso do método de eletrorresistividade através das mais variadas técnicas, a saber - tomografia de resistividade elétrica, sondagem elétrica vertical, potencial espontâneo. Neste período também percebemos o uso menos frequente dos métodos eletromagnéticos (radar de penetração no solo - GPR), além de microgravimetria.

Nos últimos 20 anos o uso da geofísica foi ampliado ainda mais, devido ao aprimoramento das técnicas, bem como à evolução na capacidade de processamento dos dados. Neste período temos também uma tendência de aplicação das técnicas geofísicas de forma combinada. O uso de duas ou mais técnicas em conjunto tem sido uma estratégia metodológica frequente e tem resolvido diversos problemas de ambiguidade no dado geofísico, proporcionado interpretações mais amplas e seguras. A seguir temos um quadro síntese associado ao uso de métodos geofísicos em estudos de barragem (Figura 3).

## TÉCNICAS DE EXPLORAÇÃO GEOFÍSICA

### Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT)

O método da eletrorresistividade (ERT) baseia-se na medida da diferença de potencial (ddp) entre dois eletrodos (M e N), regularmente espaçados, para identificar parâmetros físicos como resistividade elétrica, potencial espontâneo e polarização induzida dos diferentes materiais em superfície. Isto ocorre devido à injeção de corrente elétrica contínua ou de frequência muito baixa na crosta através de dois eletrodos (A e B) (Figura 4). Os princípios físicos do método estão fundamentados na teoria da eletricidade e do eletromagnetismo (*Kirsch e Yaramanci, 2006; Loke, 2016*).

Período	Aplicação	Principais Técnicas	Publicações em Destaque
Décadas 60 – 80	Etapa preliminar de construção da barragem	Sísmica (Refracção e Reflexão); Perfilagem Geofísica de Poços	Ogilvy <i>et al.</i> (1969); Schimschal, (1981); Henrie, <i>et al.</i> , (1983); Dutta, (1984)
Décadas 90 – 00	Investigações associadas à integridade de taludes em barragens.	Eletrorresistividade* (ERT, SEV, SP) SEV, GPR e microgravimetria	Johansson & Dahlin (1996); Cho e Yeom (2007); Panthulu <i>et al.</i> (2001); Ezersky <i>et al.</i> (2006)
Décadas 2010 - atual	Uso dos métodos geofísicos de forma conjunta, combinação de técnicas	ERT; Sísmica (SRT); SP Sligram, ERT e SP MASW e CCR	Cardarelli <i>et al.</i> (2014) Sentenac <i>et al.</i> (2018) Rahimi <i>et al.</i> (2018); Shin <i>et al.</i> (2019); Lee <i>et al.</i> (2020).

Figura 3. Quadro síntese sobre tendências de uso da geofísica em barragens ao longo do tempo.

Na aquisição das medidas também se estabelece o arranjo experimental adequado aos objetivos estabelecidos. O procedimento de coleta dos dados será realizado segundo o arranjo Dipolo-Dipolo. A escolha desse tipo de arranjo se deve à possibilidade de realizar leituras tanto lateralmente quanto em profundidade, opção útil por oferecer praticidade e dinamismo na coleta de dados (Braga, 2016), para além de ser um dos métodos de arranjo que melhor identifica variações laterais de resistividade.

A tomografia consiste em um tipo de caminhamento elétrico automatizado no qual obtém-se um número de medição consideravelmente maior que um caminhamento convencional. A execução deste tipo de caminhamento requer equipamentos de alta tecnologia com os quais é possível realizar medições de forma automatizada. Em virtude do processamento de um grande volume de dados, a tomografia oferece imagens com alta resolução.

No arranjo Dipolo-Dipolo a investigação ocorre ao longo de linhas numa direção fixa, onde os eletrodos de corrente (AB) e de potenciais (MN) possuem espaçamento constante (Figura 4). Cada distância (R) entre os centros dos pares de eletrodos (AB e MN) corresponde a uma profundidade de investigação. Por fim, as medidas são realizadas aumentando a distância (R) proporcionalmente no sentido do caminhamento para fazer a varredura da resistividade e da polarização induzida do solo (Figura 4).

A aplicação da Tomografia de Resistividade Elétrica no contexto dos problemas geotécnicos, como os *pipings*, tem o propósito de identificar aspectos hidrogeológicos dos materiais em subsuperfície através da produção de uma imagem elétrica bidimensional. Através desta podemos obter informações sobre saturação, possíveis fraturamentos ou cavidades, condutividade hidráulica.

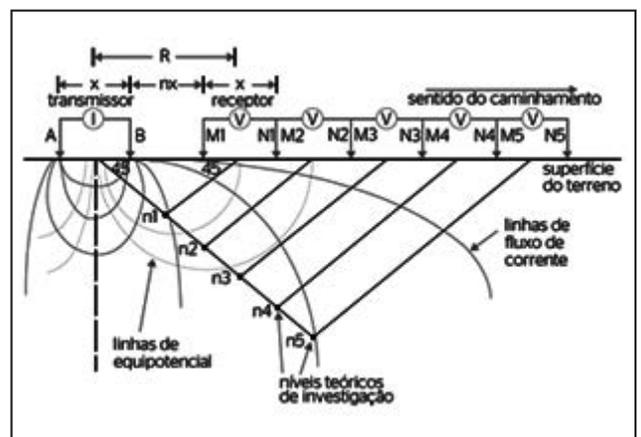


Figura 4. Esquema ilustrativo do arranjo Dipolo-Dipolo.

## Potencial Espontâneo (SP)

Uma das mais antigas metodologias geofísicas (Medeiros e Lima, 1999), o método de potencial espontâneo (SP), consiste na medida da diferença de potencial (ddp) natural promovida pela presença de determinados contextos geológicos em subsuperfície. Essas medidas são obtidas a partir da introdução de dois elétrodos regularmente espaçados no terreno (Gallas, 2005).

A origem do potencial espontâneo está associada a fenômenos eletroquímicos, termo-elétricos e eletro-cinéticos, sendo a percolação de água o agente principal na geração de SP (Gallas, 2005). No contexto da aplicação geotécnica direcionada a ocorrência de *piping*, as anomalias de potencial espontâneo estão relacionadas ao fenômeno eletro-cinético. A explicação sobre a origem de SP a partir do referido fenômeno está relacionada ao conceito de Potencial de fluxo.

O Potencial de fluxo ocorre devido à presença e fluxo do fluido pelo corpo da barragem conhecido como eletro-cinese (Figura 5b). Esse fenômeno está associado à formação de uma dupla camada de cargas elétricas entre as paredes dos poros, ou entre as paredes dos condutos de erosão por *piping*, conhecida como dupla camada de Helmholtz (Medeiros e Lima, 1999). Essa dupla camada elétrica se forma por não haver um balançamento elétrico entre a parte seca, contendo cargas negativas e o fluido em movimento, contendo cargas positivas. O fluido em movimento gera uma corrente elétrica que, por sua vez, faz surgir uma diferença de potencial (Figura 5) (Gallas, 2005).

A aquisição de dados SP é relativamente simples e tem um baixo custo envolvido. A técnica dos potenciais, ou de base fixa, é a mais utilizada em coleta de dados. Consiste na medida sucessiva de ddp ao longo de uma linha com o uso de um milivoltímetro conectado a dois elétrodos de medida regularmente espaçados, sendo um fixo, e um móvel posicionado em pontos preestabelecidos ao longo da malha de levantamento (Figura 5).

Cabe destacar também os cuidados necessários para se evitar fontes de ruídos. Ruídos que podem ser originados de fontes naturais ou mesmo artificiais como topografia, atividade antrópica, correntes telúricas e a polarização de elétrodo. Após a etapa de processamento são gerados os perfis de SP, com os quais, na maioria das vezes, é possível realizar interpretações de caráter qualitativo. A interpretação quantitativa, por vezes, torna-se inviável devido a ruídos ou mesmo pela insuficiente quantidade de dados.

## Ground Penetrating Radar (GPR)

No estudo de geotecnia de barragens, no qual há a necessidade de realizar investigações de pouca profundidade da subsuperfície com alta resolução, a técnica GPR adquire grande relevância. O GPR (Ground Penetrating Radar) é uma técnica baseada na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas de rádio em frequências muito altas (normalmente entre 10 e 1000 MHz). Esta técnica é utilizada para localizar estruturas e feições geológicas rasas em subsuperfície (Davis e Annan, 1989).

A citada técnica permite a discriminação detalhada das camadas de solo com alta precisão. Considerando investigações de feições geológicas rasas em terrenos predominantemente arenosos, o levantamento GPR possui resultados satisfatórios, sobretudo quando realizado através do arranjo em Perfilagem de Reflexão - forma de coleta dos dados na qual o transmissor e a antena são mantidos a uma pequena separação fixa (Porsani, 1999).

Na aquisição dos dados, a fonte geradora produz pulsos de curta duração e alta voltagem, que é aplicado pela antena transmissora. A antena transmissora emite a onda eletromagnética para o subsolo e parte da onda é refletida na ocorrência de contraste de propriedades físicas (Figura 6). A antena receptora detecta este sinal refletido, que é amostrado, digitalizado e armazenado. O sinal detectado é gravado como a amplitude do sinal em função do seu tempo de percurso, que é o tempo que a onda eletromagnética leva desde a saída da antena transmissora até ser detectada na antena receptora. O dado gravado é posteriormente processado e visualizado na unidade central de processamento (Reynolds, 2011).

As linhas de GPR adquiridas em campo (radargramas) são posteriormente processadas através de softwares específicos como forma de corrigir o posicionamento dos refletores no tempo e no espaço, bem como para eliminar ruídos e melhorar a resolução das seções de radargrama. Após o processamento ocorrerá a interpretação dos dados, etapa na qual haverá a identificação dos radarfácies e inferências quanto a possíveis correlações com aspectos geológicos, estruturais e hidrológicos.

As metodologias supracitadas oferecem contribuições importantes para o presente trabalho sobretudo quando utilizadas em conjunto com outras técnicas, como é o caso dos Métodos Elétricos. Cabe destacar também o benefício quanto à relação custo/benefício, e a praticidade durante a coleta dos dados, pois com elas é possível fazer a leitura do solo de forma contínua em um tempo relativamente reduzido.

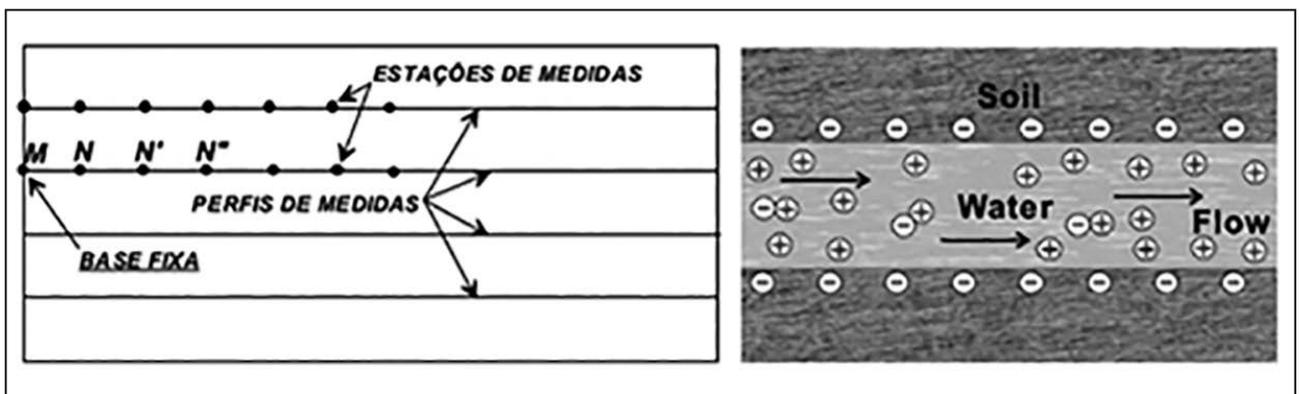


Figura 5. a) Esquema de campo da Técnica dos Potenciais. b) Contexto típico de potencial espontâneo.

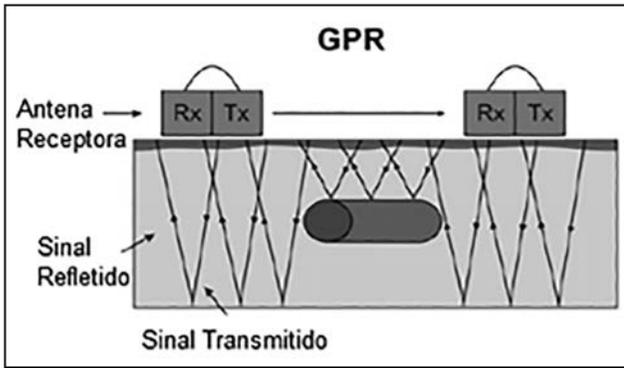


Figura 6. Esquema representativo do levantamento de GPR (Ground Penetrating Radar).

### Tomografia de Sísmica de Refração (SRT)

A refração consiste no fenômeno associado à mudança de direção e velocidade de uma onda quando passa de um meio menos denso para um meio mais denso. Sísmica de refração consiste no método de investigação das propriedades físicas do meio geológico através da medida, processamento e interpretação do tempo de chegada da onda sísmica refratada em subsuperfície (Cardarelli, 2002).

Para que a refração ocorra, é necessário que a velocidade da onda sísmica, na camada 2, seja maior que a velocidade da camada 1 (Figura 7 a). A sísmica de refração utiliza os tempos de trânsito das primeiras chegadas nos receptores posicionados a partir de uma certa distância crítica da fonte de energia. Essa pode ser observada através do gráfico (Figura 7 b) que relaciona a distância offset (fonte - receptor) com o tempo de percurso da onda, no qual percebe-se que após o  $X_{\text{crítico}}$  a onda refratada

passa à frente da onda direta que viaja com velocidade do meio  $V_1$ .

Para a aquisição dos dados é necessário estabelecer um planejamento no qual deve-se atentar para i) dimensionar o alvo ou região a ser investigada; ii) observar a profundidade de investigação requerida, sendo que a capacidade do método é estimada em  $1/5$  do comprimento da linha de investigação; iii) estimar a quantidade adequada de canais para garantir uma boa resolução horizontal (Cardarelli, 2002). O arranjo de campo mais comum em sísmica de refração é localizar os offsets de tiro em uma linha paralela ao posicionamento dos geofones e garantir que a fonte seja disposta a uma distância aproximada de metade do intervalo entre os geofones (Figura 8).

### Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW)

A análise multicanal de ondas de superfície consiste em um método de investigação da subsuperfície baseada na análise espectral de ondas de superfície com baixas frequências (1 - 30Hz) e possui profundidade de investigação em torno de 30m (Park et al., 2007); estas ondas propagam-se ao longo de uma superfície livre ou ao longo de uma interface entre dois meios de natureza diferentes. Existem três tipos de ondas de superfície, a saber: Ondas Rayleigh, Love e Stonely, sendo que as ondas comumente utilizadas são as ondas Rayleigh devido à facilidade no processo de geração de ondas e aquisição de dados (Eikmeier, 2014).

O arranjo de aquisição dos dados MASW se destaca pela simplicidade. Nele temos a fonte e os geofones dispostos linearmente, sendo que o espaçamento pode ser constante ou não (Figura 9). A profundidade de investigação alcançada depende fundamentalmente da frequência gerada pela fonte sísmica, sendo que fontes de frequências mais baixas tendem a alcançar profundidades mais baixas (Eikmeier, 2014).

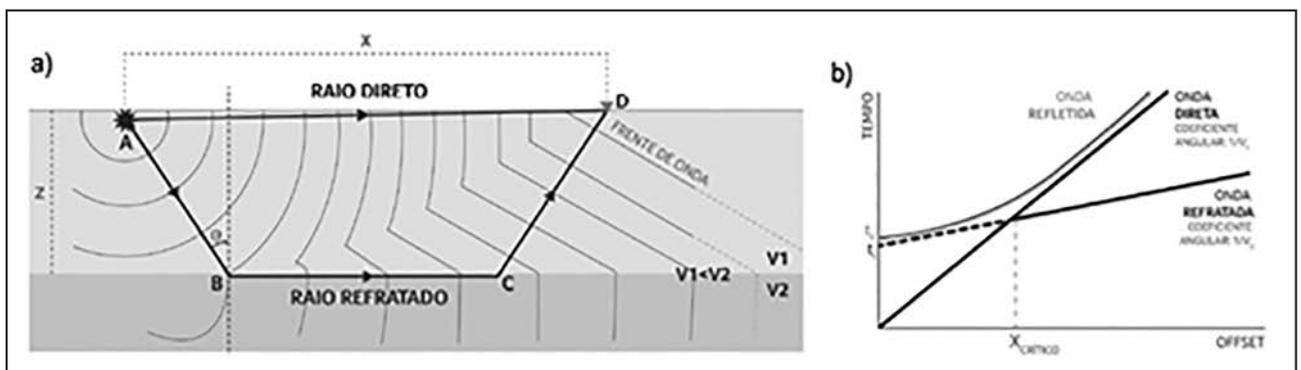


Figura 7. a) Esquema representativo do fenômeno da sísmica de refração considerando um modelo de duas camadas. b) Gráfico que relaciona o tempo de percurso das ondas sísmicas com a distância da fonte ao receptor.

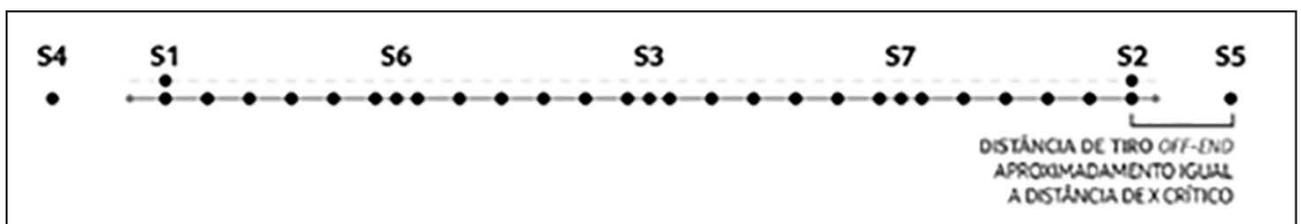


Figura 8. Arranjo comumente aplicado em sísmica de refração.

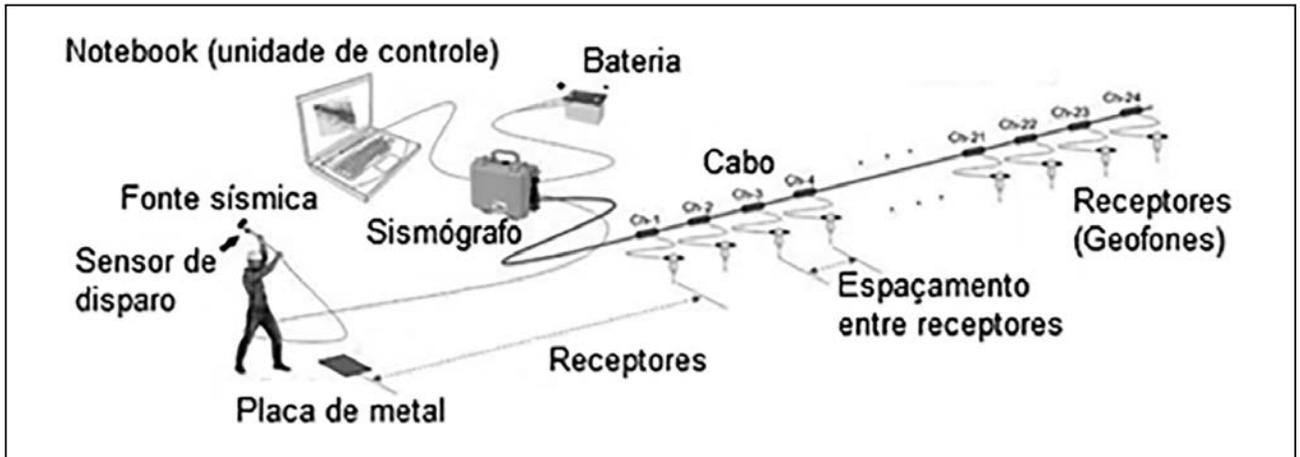


Figura 9. Esquema representativo do levantamento de MASW.

A partir da aquisição dos dados segue a etapa do seu processamento, na qual se obtém um modelo unidimensional da distribuição da velocidade ao longo do perfil analisado para cada ensaio realizado. A construção do modelo bidimensional pode ser realizada mediante várias sondagens ao longo de uma linha, seguido da integração dos resultados para gerar uma seção de velocidade.

No contexto geotécnico dos *pipings* o uso do método MASW isoladamente apresenta a desvantagem de não oferecer uma resolução capaz de delimitar o problema de forma eficaz.

#### Método Gravimétrico

O método gravimétrico é um método de potencial natural que faz a investigação das camadas geológicas em subsuperfície baseada na variação do campo gravitacional medido na superfície (Silva Junior et al., 2006). Os princípios do método estão fundamentados na Lei da Gravitação Universal, sendo que as anomalias gravimétricas estão associadas ao contraste de densidade aparente existente entre um corpo de rocha e sua vizinhança (Figura 10) (Kearey et al., 2009).

Em um contexto geológico local, como, por exemplo, de avaliações em estruturas resultantes de processos erosivos em barragens é necessário o uso da microgravidade. A técnica de microgravidade realiza medidas de variações do campo gravitacional terrestre em escala de detalhe, ou seja, com curtos intervalos de amostragem, para delimitar anomalias ao longo da barragem.

A coleta de dados é realizada através de estações dispostas espacialmente ao longo da área a ser investigada. Faz-se necessário o uso de uma estação base para a detecção dos valores absolutos de gravidade local para uma possível comparação com os resultados do levantamento (Kearey et al., 2009). A distribuição das estações na área investigada deve estar relacionada com a localização do possível alvo, sendo que a densidade das estações deve ser maior onde o campo de gravidade muda mais rapidamente.

Esta ferramenta possibilita investigar estruturas de barragens danificadas por erosões internas como, por exemplo, *pipings*. As cavidades originadas desses danos causam pequenas anomalias de microgravidade (Butler, 1984). Cabe destacar como desvantagem a constante presença de ruídos que, por vezes, interfere na identificação das reduzidas amplitudes oriundas do problema em questão. O correto procedimento de aquisição e processamento colaboram decisivamente para a superação desta desvantagem.

#### Método de Resistividade Capacitivamente Acoplada (CCR)

A resistividade capacitivamente acoplada (ou, Capacitively Coupled Resistivity - CCR) consiste em um método geolétrico relativamente novo que se baseia na leitura da resistividade dos corpos em subsuperfície. O diferencial em relação aos métodos de eletrorresistividade tradicional está no uso da tecnologia de aquisição dos dados (Coker, 2018).

A aquisição dos dados ocorre por meio de uma corrente alternada de baixa frequência (16kHz) que provoca um fluxo de corrente através do acoplamento eletromagnético indutivo (Geometrics, 2021). Dessa forma não há a necessidade do uso de elétrodos e cabos, o que reduz consideravelmente o tempo de execução e a quantidade de mão de obra necessária para a aquisição.

O método permite uma configuração de transmissor e receptor através do arranjo de dipolo-dipolo, sendo que, durante o levantamento o conjunto de instrumentos é deslocado na direção da linha estabelecida por apenas uma pessoa ou por um automóvel (Figura 11) (Coker, 2018).

A desvantagem em relação aos métodos tradicionais de eletrorresistividade está em sua profundidade de investigação. Como a frequência de injeção da corrente elétrica gerada é relativamente alta a penetração dessa corrente será menor do que nos métodos tradicionais de resistividade.

#### CONCLUSÕES

Diante do que foi apresentado, compreendemos as potencialidades da geofísica na avaliação geotécnica de barragens, seja na identificação de problemas na estrutura - por exemplo, erosões internas -, seja no monitoramento, de forma a intervir antecipadamente na ocorrência destes problemas. Nesse sentido, a avaliação geofísica apresenta bons resultados quando a escolha dos métodos é compatível com o problema geológico em questão. A capacidade de resolução e a profundidade de investigação dos métodos utilizados nos estudos apresentados, permitiu identificar com precisão anomalias características de erosões internas e fluxo de fluido no corpo das barragens investigadas.

A partir dos estudos apresentados, percebemos que a aplicação de diferentes metodologias geofísica melhora o entendimento sobre os materiais em subsuperfície. A análise do mesmo problema

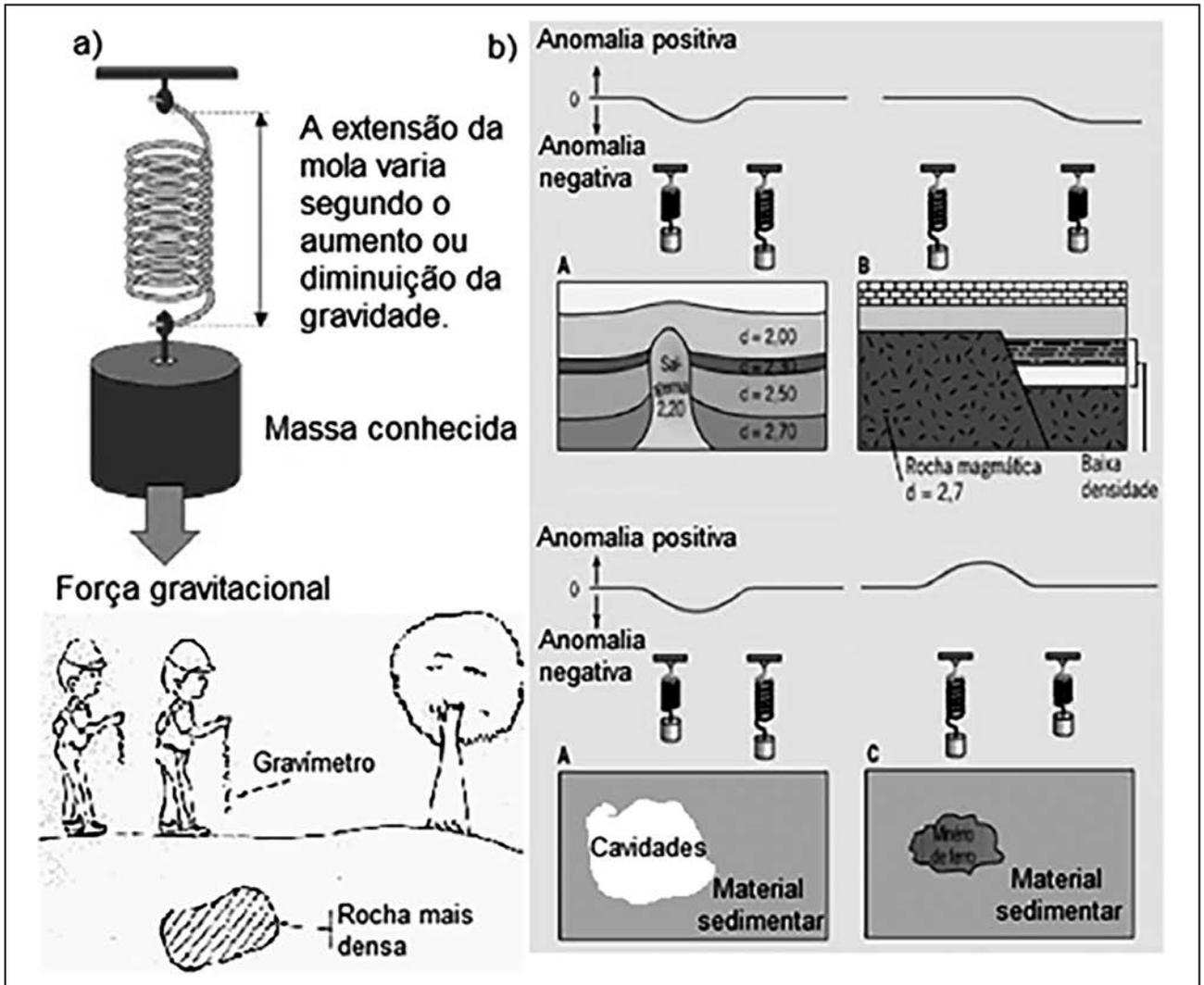


Figura 10. a) Esquema simplificado de funcionamento de um gravímetro. b) Anomalias de gravidade em diferentes contextos geológicos.

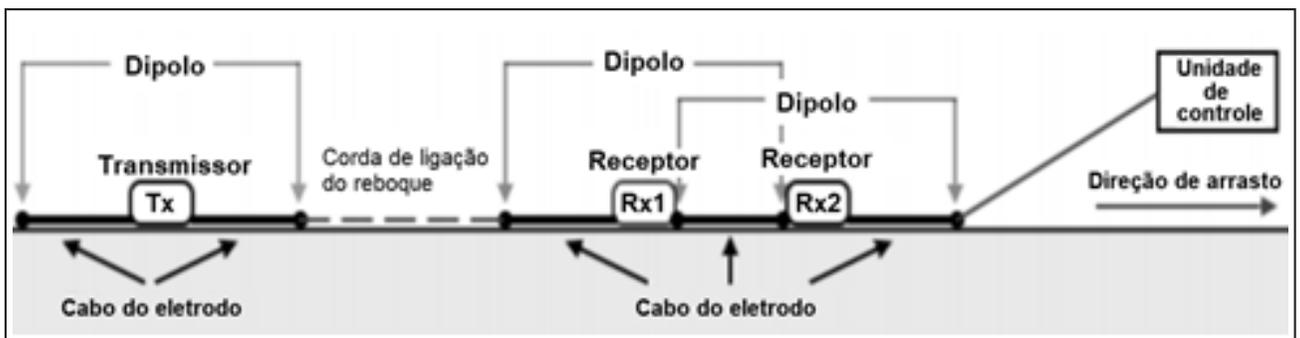


Figura 11. Esquema de um arranjo dipolo-dipolo no método CCR.

sobre ótica de metodologias que utilizam parâmetros físicos diferentes possibilita uma interpretação geológico-estrutural mais robusta, evitando possíveis ambiguidades.

O método de Potencial Espontâneo (SP) tem sido bastante utilizado em estudos envolvendo barragens. Os resultados adquiridos nas pesquisas citadas apresentam uma boa resposta na

avaliação estrutural em barragens, sobretudo na identificação de erosões internas e rotas de *piping*. Este método permite uma avaliação qualitativa e quantitativa (em alguns casos), tanto lateralmente quanto em profundidade. Cabe destacar que o método apresentou limitação no que se refere à profundidade de investigação.

A Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT) permite obter um panorama dos valores de resistividade predominantes nos domínios de interesse ao longo da barragem. O método se mostrou eficiente na caracterização hidrogeológica da área em estudo por distinguir com segurança as feições anômalas de resistividade, típicas de saturação. Em boa parte das pesquisas a ERT apresentou uma correspondência satisfatória com outras metodologias.

Em relação aos métodos sísmicos cabe destaque a Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW), um método que tem sido utilizado de forma complementar em estudos envolvendo integridade de barragens. Nesses estudos a técnica possibilitou classificar os estratos em profundidade, inclusive com sensibilidade capaz de fazer distinção entre solos adjacentes com maior rigidez e solos com menor rigidez. O método se mostrou útil também na detecção de tubos de drenagem, linhas de esgoto cruzado e um dique em subsuperfície.

O método Resistividade Capacitivamente Acoplada (CCR) tem obtido sucesso em problemas envolvendo *piping*. Uma vez que as barragens de aterro possuem uma geologia conhecida, as erosões internas e o *piping* surgem na imagem como anomalias de condutividade. Os estudos constataram também que o CCR apresenta bons resultados quando o grau de saturação do solo é alto e a profundidade de interesse é rasa. Por essa razão o método CCR tem sido utilizado em conjunto com outros métodos, a exemplo do MASW.

As publicações analisadas, com utilização conjunta de vários métodos, foram desenvolvidas na última década e a partir delas depreendemos que existe uma tendência evidente na área

de geotecnia de barragens em fazer uso de métodos geofísicos. O aprimoramento das práticas de campo e as facilidades de acesso aos softwares de processamento, aliado à favorável relação custo/benefício tem motivado o uso desses métodos, sobretudo em ambientes corporativos.

Para além da praticidade associada à coleta dos dados, temos que a geofísica apresenta um repertório diversificado de metodologias, analisando a problemática dos *pipings* a partir da distribuição de diversas propriedades físicas e possibilitando correlações que, por sua vez, tornam o diagnóstico cada vez mais confiável.

Em suma, entendemos que os desafios para o uso dos métodos geofísicos em problemas específicos da geotecnia, como o *piping*, são: i) Compreender os princípios físicos de funcionamento do aparelho; ii) Compreender o contexto geológico no qual está inserido o problema; iii) Utilizar metodologias que permitam delimitar o problema através dos contrastes de propriedade física que sejam sensíveis ao problema em questão; iv) Combinar adequadamente as metodologias, atentando-se para o critério de validação e complementaridade das informações obtidas, para além da natureza do problema.

A geofísica consiste na principal metodologia de uso alternativo em geotecnia para a caracterização de materiais geológicos, tendo aplicação em diversas circunstâncias como, por exemplo, em estudos preliminares para implantação de barragens, em monitoramentos ou mesmo em análises técnicas periódicas. Caso a técnica seja bem aplicada será uma vantagem para a construção e a exploração de barragens, evitando problemas de grandes proporções.

## TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- ANTOINE, R., FAUCHARD, C., FARGIER, Y., & DURAND, E. (2015). Detection of Leakage Areas in an Earth Embankment from GPR Measurements and Permeability Logging. *International Journal of Geophysics*, 2015, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2015/610172>
- BIÈVRE, G., LACROIX, P., OXARANGO, L., GOUTALAND, D., MONNOT, G., & FARGIER, Y. (2017). Integration of geotechnical and geophysical techniques for the characterization of a small earth-filled canal dyke and the localization of water leakage. *Journal of Applied Geophysics*, 139, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.002>
- BOLTON SEED, H., & DUNCAN, J. M. (1987). The failure of Teton Dam. *Engineering Geology*, 24(1-4), 173-205. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(87\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(87)90060-3)
- BOVI, R. C., MOREIRA, C. A., ROSOLEN, V. S., ROSA, F. T. G., FURLAN, L. M., & HELENE, L. P. I. (2020). Piping process: Genesis and network characterization through a pedological and geophysical approach. *Geoderma*, 361, 114101. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114101>
- BRAGA, A. C. O. (2016). Geofísica Aplicada: métodos geoeletrico em hidrologia. São Paulo: Editora Oficina de Textos.
- BRASIL. (2002). Manual de segurança e inspeção de barragens. Ministério da Integração Nacional.
- BUTLER, D. K. (1984). Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities. *Geophysics*, 49(7), 1084-1096. <https://doi.org/10.1190/1.1441723>
- CAMARERO, P. L., MOREIRA, C. A., & PEREIRA, H. G. (2019). Analysis of the Physical Integrity of Earth Dams from Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 176(12), 5363-5375. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02271-8>

- CARDARELLI, E. (2002).  
Ray tracing in elliptical anisotropic media using the linear traveltime interpolation (LTI) method applied to traveltime seismic tomography.  
*Geophysical Prospecting*, 50(1), 55-72. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2002.00297.x>
- CARDARELLI, E., CERCATO, M., DE DONNO, G., & DI FILIPPO, G. (2014).  
Detection and imaging of piping sinkholes by integrated geophysical methods.  
*Near Surface Geophysics*, 12(3), 439-450. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013051>
- CHO, I.-K., & YEOM, J.-Y. (2007).  
Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam.  
*Geophysics*, 72(2), G31-G38. <https://doi.org/10.1190/1.2435200>
- COKER, F. (2018).  
Geophysical Assessment of Subsurface Soil Conditions Using Capacitively Coupled Resistivity.  
*Master of Science in Civil Engineering. University of Oklahoma.*
- DAVIS, J. L., & ANNAN, A. P. (1989).  
Ground Penetrating Radar For High Resolution Mapping Of Soil And Rock Stratigraphy.  
*Geophysical Prospecting*, 37(5), 531-551. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- DUTTA, N. P. (1984).  
Seismic refraction method to study the foundation rock of a dam.  
*Geophysical Prospecting*, 32(6), 1103-1110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1984.tb00757.x>
- EIKMEIER, C. (2014).  
Emprego do método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) em área urbana: um estudo na cidade de São Paulo.  
*Simpósio de Iniciação Científica Do IAG-USP*, 132. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29710.36161>
- EZERSKY, M., BRUNER, I., KEYDAR, S., TRACHTMAN, P., & RYBAKOV, M. (2006).  
Integrated study of the sinkhole development site on the Western shores of the Dead Sea using geophysical methods.  
*Near Surface Geophysics*, 4(5), 335-343. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006007>
- FONTENELLE, M., ALEXANDRE, M., & YAGO, M. (2017).  
Avaliações de risco em barragens: estudo de caso da barragem Malcozinhado no nordeste brasileiro.  
*Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 14(1), 22.
- FOSTER, M., FELL, R., & SPANNAGLE, M. (1998)  
Analysis of embankment dam incidents.  
*UNICIV Report N° R-374 - UNSW, Sydney, Austrália.*
- FOSTER, M. & FELL, R. (1999)  
A framework for estimating the probability of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods.  
*UNICIV Report No R-377, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. ISBN 85841 344 2, Sydney, Austrália.*
- GALLAS, J. D. F. (2005).  
O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais.  
*Revista Brasileira de Geofísica*, 23(2), 133-144. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000200003>
- GEOMETRICS. (2021).  
OhmMapper Capacitively Coupled Resistivity System.  
*Alphageofísica*. <http://www.geometrics.com/OhmMapper/ohmmmap.html>
- HENRIET, P., SCHITTEKAT, J., & HELDENS, P. (1983).  
Borehole Seismic Profiling and Tube Wave Applications in a Dam Site Investigation.  
*Geophysical Prospecting*, 31(1), 72-86. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01042.x>
- JOHANSSON, S., & DAHLIN, T. (1996).  
Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements.  
*European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1(3), 229-247.
- KEAREY, P., BROOKS, M., & HILL, I. (2009).  
Geofísica de exploração. (3°).  
*Oficina de Textos.*
- KIM, H.-J., PARK, J.-M., & SHIN, J.-H. (2019).  
Flow behaviour and piping potential at the soil-structure interface.  
*Géotechnique*, 69(1), 79-84. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.T.020>
- KIRSCH, R., & YARAMANCI, U. (2006).  
Geophysical characterisation of aquifers.  
*In Groundwater geophysics: A tool for hydrogeology (pp. 439-457). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6\_15*

- LADEIRA, J.E.R. (2007)  
Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE-São Simão.  
Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- LEE, B.; OH, S.; YI, M. (2020)  
Mapping of leakage paths in damaged embankment using modified resistivity array method,  
*Engineering Geology*, Volume 266, 105469, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105469>.
- LOKE, M. (2016).  
Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys.  
*Geotomo Software Company*.
- LUO, D., GOODIN, D. G., & CALDAS, M. M. (2019).  
Spatial-Temporal Analysis of Land Cover Change at the Bento Rodrigues Dam Disaster Area Using Machine Learning Techniques.  
*Remote Sensing*, 11(21), 2548. <https://doi.org/10.3390/rs11212548>
- MARTÍNEZ-MORENO, F. J., GALINDO-ZALDÍVAR, J., PEDRERA, A., GONZÁLEZ-CASTILLO, L., RUANO, P., CALAFORRA, J. M., & GUIRADO, E. (2015).  
Detecting gypsum caves with microgravity and ERT under soil water content variations (Sorbas, SE Spain).  
*Engineering Geology*, 193, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.011>
- MASI, M., FERDOS, F., LOSITO, G., & SOLARI, L. (2020).  
Monitoring of internal erosion processes by time-lapse electrical resistivity tomography.  
*Journal of Hydrology*, 589, 125340. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125340>
- MEDEIROS, W. E., & LIMA, O. A. L. (1999).  
Origem do potencial elétrico espontâneo em rochas cristalinas fraturadas e sua utilização na locação de poços.  
*Revista Brasileira de Geofísica*, 17(2-3), 113-115. <https://doi.org/10.1590/s0102-261x1999000200001>
- MUGUIO, M., FAGGION, P., VEIGA, L., NADAL, C., CRUZ, W., SOARES, M., & FIGUEIRA, I. (2017).  
Avaliação Da Anomalia Da Gravidade Na Região Do Barramento Da Usina Hidrelétrica De Mauá.  
*Boletim Paranaense de Geociências*, 73(1), 55-62. <https://doi.org/10.5380/geo.v73i1.49105>
- NETTO, L. G., FILHO, W. M., PAES, R. A. S., & COURA, M. M. (2018).  
Análise de Fluxo No Interior de Barragens de Terra A Partir do Método do Potencial Espontâneo (SP).  
*16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 1-7.
- Ogilvy, A. A., Ayed, M. A., & Bogoslovsky, V. A. (1969).  
Geophysical Studies Of Water Leakages From Reservoirs.  
*Geophysical Prospecting*, 17(1), 36-62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1969.tb02071.x>
- OH, S., & SUN, C.-G. (2008).  
Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam.  
*Environmental Geology*, 54(1), 31-42. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0790-y>
- PANTHULU, T. V., KRISHNAIAH, C., & SHIRKE, J. M. (2001).  
Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods.  
*Engineering Geology*, 59(3-4), 281-295. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00082-X)
- PARK, C. B., MILLER, R. D., XIA, J., & IVANOV, J. (2007).  
Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods.  
*The Leading Edge*, 26(1), 60-64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>
- PERINI, D. S. (2019)  
Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra.  
Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- PORSANI, J. L. (1999).  
Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP.  
Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- PUEYO ANCHUELA, Ó., FRONGIA, P., DI GREGORIO, F., CASAS SAINZ, A. M., & POCOVÍ JUAN, A. (2018).  
Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis: A case study of the Medau Zirimilis Dam (Sardinia, Italy).  
*Engineering Geology*, 237, 129-139. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.015>
- RAHIMI, S., MOODY, T., WOOD, C., KOUCHAKI, B. M., BARRY, M., TRAN, K., & KING, C. (2019).  
Mapping Subsurface Conditions and Detecting Seepage Channels for an Embankment Dam Using Geophysical Methods: A Case Study of the Kinion Lake Dam.  
*Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 24(3), 373-386. <https://doi.org/10.2113/JEEG24.3.373>

- REYNOLDS, J. (2011).  
An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.  
*Wiley BlackWell*.
- RICHARDS, K. S., & REDDY, K. R. (2007).  
Critical appraisal of piping phenomena in earth dams.  
*Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(4), 381-402. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0095-0>
- SCHIMSCHAL, U. (1981).  
The relationship of geophysical measurements to hydraulic conductivity at the brantley damsite, New Mexico.  
*Geoexploration*, 19(2), 115-125. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(81\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0016-7142(81)90024-7)
- SENTENAC, P., BENES, V., & KEENAN, H. (2018).  
Reservoir assessment using non-invasive geophysical techniques.  
*Environmental Earth Sciences*, 77(7), 293. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7463-x>
- SHIN, S.; PARK, S.; KIM, J. (2019)  
Time-lapse electrical resistivity tomography characterization for piping detection in earthen dam model of a sandbox,  
*Journal of Applied Geophysics*, V. 170, 103834, ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103834>.
- SJÖDAHL, P., DAHLIN, T., & JOHANSSON, S. (2005).  
Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden.  
*Environmental Geology*, 49(2), 267-273. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0084-1>
- SJÖDAHL, P., DAHLIN, T., JOHANSSON, S., & LOKE, M. H. (2008).  
Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam.  
*Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4), 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.07.003>
- WANG, F., OKEKE, A. C.-U., KOGURE, T., SAKAI, T., & HAYASHI, H. (2018).  
Assessing the internal structure of landslide dams subject to possible piping erosion by means of microtremor chain array and self-potential surveys.  
*Engineering Geology*, 234, 11-26. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.023>
- XU, X., ZENG, Q., LI, D., WU, J., WU, X., & SHEN, J. (2010).  
GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams.  
*Engineering Geology*, 111(1-4), 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.001>
- ZHU, W., JIA, S., DEVINENI, N., LV, A., & LALL, U. (2019).  
Evaluating China's Water Security for Food Production: The Role of Rainfall and Irrigation.  
*Geophysical Research Letters*, 46(20), 11155-11166. <https://doi.org/10.1029/2019GL083226>