

CAROLINA MOREIRA CAPANEMA

**AVALIAÇÃO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS DE
VAZAMENTOS EM ADUTORAS DE ÁGUA: UMA APLICAÇÃO DA
ELETORRESISTIVIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Graduação em Engenharia
Civil do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dr^a. Hersília De Andrade E
Santos

Coorientadora: Dr^a. Tathiana Rodrigues
Caetano

BELO HORIZONTE

2026

C236a Capanema, Carolina Moreira
Avaliação de bancada experimental para estudos de vazamentos em adutoras de água: uma aplicação da eletrorresistividade / Carolina Moreira Capanema. – 2026.
55 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Civil.
Orientadora: Hersília de Andrade e Santos.
Coorientadora: Tathiana Rodrigues Caetano.
Bibliografia: f. 53-55.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Instrumentos e aparelhos científicos – Avaliação – Teses. 2. Vazamento de água – Teses. 3. Tubulações de água – Teses. 4. Tomografia de resistividade elétrica – Teses. 5. Geofísica – Métodos de simulação – Teses. I. Santos, Hersília de Andrade e. II. Caetano, Tathiana Rodrigues. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 681.2



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC N° 19/2026 - DEC (11.56.07)

N° do Protocolo: 23062.036927/2026-04

Belo Horizonte-MG, 16 de julho de 2026.

CAROLINA MOREIRA CAPANEMA

**AVALIAÇÃO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS DE VAZAMENTOS
EM ADUTORAS DE ÁGUA: Uma aplicação da eletrorresistividade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Gameleira, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 15 de julho de 2026.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Hersilia de Andrade e Santos - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Tathiana Rodrigues Caetano - Coorientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Rachel Jardim Martini Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Júlia Amâncio Fonseca
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

**Belo Horizonte
2026**

(Assinado digitalmente em 16/07/2026 11:45)

HERSILIA DE ANDRADE E SANTOS

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

PPGEC (11.52.06)

Matrícula: ###049#6

(Assinado digitalmente em 17/07/2026 14:29)

RACHEL JARDIM MARTINI SANTOS

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DEC (11.56.07)

Matrícula: ###719#2

(Assinado digitalmente em 17/07/2026 08:42)

JÚLIA AMANCIO FONSECA

DISCENTE

Matrícula: 2024#####8

(Assinado digitalmente em 17/07/2026 09:17)

Carolina Moreira Capanema

DISCENTE

Matrícula: 2015#####2

(Assinado digitalmente em 16/07/2026 10:17)

TATHIANA RODRIGUES CAETANO

DISCENTE

Matrícula: 2017#####4

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **19**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **16/07/2026** e o código de verificação: **1bf334f86c**

AGRADECIMENTOS

Após anos de dedicação e noites mal dormidas, finalmente encerro uma trajetória de altos e baixos e muitas incertezas, mas também de muita gratidão a tudo o que aprendi e desenvolvi nesses anos.

Desde o primeiro período, sentia medo do TCC. Sempre achei que não seria capaz ou que não chegaria até aqui. Mas, graças a Deus, encontrei pessoas durante a minha jornada que me auxiliaram, me incentivaram a nunca desistir e me mostraram que era possível superar todas as minhas inseguranças e limitações para conquistar o tão sonhado diploma. Então, eu não poderia deixar de agradecer a todos que foram tão importantes nessa trajetória.

Ao CEFET, que me deu toda a estrutura necessária para me tornar a profissional que sou hoje. Sempre serei grata por todo o ensinamento e pela forma como fui moldada para ser uma profissional que não desiste; que não fala “não sei fazer”, mas sim corre atrás da resposta, mesmo que tenha que ver 10 cursos e ler 50 artigos para resolver um problema que ninguém mais soube solucionar. Uma instituição que me ensinou a não aceitar a mediocridade, a criar processos, a procurar o melhor caminho, a estudar, a dar o melhor de mim e a ser uma profissional mais qualificada dia após dia.

À minha família, por todo o apoio durante o curso. À minha mãe, Margarete, e ao meu pai, José Carlos: vocês batalharam a vida inteira para dar a melhor educação aos filhos. E, até o momento, temos três formadas em faculdades públicas, um graduando da UFMG e uma muito bem encaminhada.

Às minhas irmãs, Gabriela, Giovanna e Juliana, e ao meu irmão, Guilherme. Foram incontáveis dias de cobrança e incentivo e, claro, o meu maior combustível foi ver a trajetória e o sucesso de vocês. São quatro pessoas inteligentíssimas e com um futuro brilhante, cada um com uma personalidade completamente diferente, mas que nos torna, os cinco, completos.

Aos meus amigos da matemática, que estão mais ansiosos do que eu pela minha formatura. Ter largado a UFMG foi muito difícil para mim, mas no final tudo valeu a pena.

À Marina, que participou ativamente da execução deste TCC e passou noites em claro comigo. Sem você e o seu incentivo, eu não teria conseguido concluir esta etapa tão importante. Obrigada por toda a paciência neste último ano e por ter me

apoiado mesmo quando precisei me ausentar dos eventos ou ficar horas enfurnada no quarto.

À Hersília de Andrade e Santos, minha orientadora. Obrigada por toda a paciência e auxílio ao longo dos anos, e, de forma muito especial, nesta reta final. A sua entrega e o seu compromisso com a minha formação, mesmo diante dos desafios, foram essenciais. Serei eternamente grata por você ter lutado por mim e não ter soltado a minha mão.

À Tathiana Rodrigues Caetano, minha coorientadora, obrigada por acreditar e confiar em mim para participar de um dos momentos mais importantes da sua formação. Quantos dias passamos no CEFET quebrando a cabeça, recomeçando, malhando o braço trabalhando com o solo e estudando para realizarmos o sonho de ambas. Muito obrigada mesmo por tudo, Tathi, e por todo o auxílio durante a execução deste TCC.

RESUMO

As perdas de água nos sistemas de abastecimento representam um dos principais desafios do saneamento básico no Brasil, atingindo aproximadamente 39,2% do volume produzido. Parte considerável dessas perdas ocorre em adutoras de água tratada que operam por gravidade, isto é, com pressão atmosférica no interior da tubulação. Nessas condições, métodos convencionais de detecção baseados em acústica ou em gradiente de pressão apresentam limitações de aplicação, uma vez que dependem da pressão interna para geração de sinais detectáveis. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma bancada experimental em escala laboratorial para avaliar a capacidade de reprodução de condições controladas de vazamento em adutoras e a identificação das alterações associadas por meio da Tomografia de Eletrorresistividade (ERT). A bancada consistiu em um recipiente de material plástico com dimensões de 104 cm × 66 cm × 60 cm, preenchido com solo argiloso previamente caracterizado, com teor de umidade gravimétrica controlado entre 18% e 20%, e compactado em camadas sucessivas. Duas tubulações foram instaladas: uma íntegra, utilizada como condição de referência, e outra com orifício central para simulação de vazamento. As medições de resistividade elétrica foram realizadas com o equipamento Lippmann 4 Point Light 10 W, operando a 5 Hz, utilizando o arranjo eletrodódico dipolo-dipolo, com eletrodos dispostos na superfície do solo. Foram avaliados dois cenários experimentais: Cenário 1, correspondente à condição sem vazamento, e Cenário 2, correspondente à condição com vazamento simulado. As análises foram realizadas por comparação entre as respostas de voltagem e de resistividade aparente obtidas em ambos os cenários, permitindo identificar alterações quantitativas associadas à presença do vazamento no meio poroso. No Cenário 1 (sem vazamento), as medições de voltagem mantiveram-se estáveis ao longo do tempo, variando aproximadamente entre 6000 V e 6400 V, sem tendência de crescimento ou redução, o que indica estabilidade elétrica do sistema durante todo o período de aquisição. Em contraste, no Cenário 2 (com vazamento), observou-se uma redução progressiva da voltagem ao longo do ensaio, passando de aproximadamente 4000 V para cerca de 1500 V ao final do período de monitoramento (60 minutos). Essa mudança temporal indica a evolução do processo de infiltração de água no meio poroso, com impacto direto na resposta elétrica medida pela bancada experimental. Essas variações temporais foram complementadas pelas pseudoseções de resistividade aparente, nas quais se

observou a formação de uma anomalia de baixa resistividade no Cenário 2, ausente no Cenário 1. A anomalia identificada coincide com a posição onde o vazamento foi induzido experimentalmente, evidenciando correspondência entre a alteração hidráulica e a resposta geoeletrica do meio. Conclui-se que a bancada experimental constitui uma ferramenta adequada para simulação de vazamentos em ambiente controlado e para avaliação comparativa entre condições operacionais distintas. O estudo contribui para o desenvolvimento de abordagens experimentais aplicadas à análise de vazamentos em sistemas de abastecimento de água utilizando eletroresistividade.

Palavras-chave: Detecção de vazamentos. Eletroresistividade. ERT. Adutoras de água. Bancada experimental. Métodos geofísicos.

ABSTRACT

Water losses in supply systems represent one of the main challenges in sanitation infrastructure in Brazil, reaching approximately 39.2% of the total volume produced. A significant portion of these losses occurs in gravity-driven water transmission pipelines, i.e., systems operating under atmospheric pressure conditions within the pipe. Under these conditions, conventional leak detection methods based on acoustics or pressure gradients present operational limitations, as they rely on internal pressurization to generate measurable signals. This study aimed to develop a laboratory-scale experimental setup to evaluate its ability to reproduce controlled leakage conditions in pipelines and to assess the associated changes using Electrical Resistivity Tomography (ERT). The experimental bench consisted of a plastic tank measuring 104 cm × 66 cm × 60 cm, filled with previously characterized clayey soil, with gravimetric water content controlled between 18% and 20%, and compacted in successive layers. Two pipelines were installed: one intact, used as a reference condition, and another with a central orifice to simulate leakage. Electrical resistivity measurements were performed using a Lippmann 4 Point Light 10 W system operating at 5 Hz, employing a dipole–dipole electrode configuration with surface electrodes. Two experimental scenarios were evaluated: Scenario 1 (no-leak condition) and Scenario 2 (leak condition). Data analysis was conducted by comparing voltage and apparent resistivity responses between both scenarios, allowing the identification of quantitative changes associated with the presence of leakage in the porous medium. In Scenario 1, voltage measurements remained stable over time, ranging approximately from 6000 V to 6400 V, with no significant trend, indicating electrical stability of the system throughout the acquisition period. In contrast, Scenario 2 exhibited a progressive decrease in voltage from approximately 4000 V to about 1500 V over the 60-minute monitoring period. This temporal evolution reflects the progression of water infiltration within the porous medium, directly affecting the electrical response recorded by the experimental setup.

These temporal variations were corroborated by apparent resistivity pseudosections, which revealed the development of a low-resistivity anomaly in Scenario 2, absent in Scenario 1. The anomaly coincides with the experimentally induced leakage location, demonstrating a clear spatial correspondence between hydraulic disturbance and geoelectrical response. It is concluded that the proposed experimental bench is an effective tool for simulating leakage processes under controlled laboratory conditions

and for comparative evaluation of operational scenarios. The study contributes to the development of experimental approaches for leak detection in water supply systems using electrical resistivity methods.

Keywords: Leak detection. Electrical resistivity. ERT. Water pipelines. Experimental apparatus. Geophysical methods.

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Eletrodos de corrente (C1 e C2), os eletrodos de potencial (P1 e P2)	26
Figura 2: Fluxograma das etapas de desenvolvimento e avaliação da bancada experimental	32
Figura 3: Vistas da bancada experimental representados no Autocad	33
Figura 4: Quatro eletrodos com espaçamento de 0,05m ligados ao aparelho <i>point light</i> 10 W	35
Figura 5: Amostras de solo após a preparação para os ensaios de caracterização geotécnica	38
Figura 6: Monitoramento do teor de umidade do solo com o medidor ECOWITT WH0291	39
Figura 7: Primeira camada de solo na bancada experimental e fita métrica para controle do adensamento	40
Figura 8: Representação esquemática do sistema hidráulico utilizado na bancada experimental, evidenciando o reservatório superior (garrafa PET) e o equipo como elemento de controle manual da passagem do fluido	41
Figura 9: Tubulação de PVC utilizada na bancada experimental, no cenário 2, com o orifício lateral empregado na simulação do vazamento	43
Figura 10: Esquema do posicionamento inicial e do caminhamento dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo ao longo da bancada experimental	45
Figura 11: Análise granulométrica do solo	46
Figura 12: Resultado da medição de voltagem em um intervalo de tempo	47
Figura 13: Perfil da coleta sem vazamento - pseudo-seção resistividade aparente	49
Figura 14: Perfil da coleta com vazamento - pseudo-seção resistividade aparente	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configuração dos cenários	37
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla	Significado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
ERT	<i>Electrical Resistivity Tomography</i> (Tomografia de Eletrorresistividade)
ETA	Estação de Tratamento de Água
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i> (Radar de Penetração no Solo)
NBR	Norma Brasileira
PVC	Policloreto de Polivinila
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i> (Reflectometria no Domínio do Tempo)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Pergunta de Pesquisa	14
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.1.3	Justificativa.....	15
1.1.4	Restrições e Limitações	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Sistemas de Abastecimento de Água.....	18
2.2	Perdas de Água em Tubulações	19
2.2.1	Tipos de Perdas e de Vazamentos	19
2.2.2	Causas dos Vazamentos.....	21
2.3	Métodos convencionais de detecção de vazamentos	22
2.4	Métodos Geofísicos.....	22
2.4.1	Tomografia de Eletrorresistividade — ERT	23
2.5	Influência da Água na Resposta Geométrica dos Solos.....	27
2.5.1	Alterações Geométricas Associadas aos Vazamentos	29
2.5.2	Aplicações da Resposta Geométrica na Detecção de Vazamentos 29	
2.6	Estudos laboratoriais	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Classificação da Pesquisa.....	32
3.2	BANCADA EXPERIMENTAL	33
3.2.1	Construção e Dimensões	33
3.2.2	Sistema de aquisição de dados (ERT)	35
3.2.3	Solo Utilizado e Controle de Umidade.....	37

3.2.4	Sistema hidráulico de simulação de vazamento.....	41
3.2.5	Análise de dados.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Caracterização do solo utilizado.....	46
4.2	Medições de Voltagem ao Longo do Tempo	47
5	CONCLUSÃO	51
6	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água potável em contextos urbanos e as pressões decorrentes das mudanças climáticas e do crescimento populacional tornam a eficiência dos sistemas de abastecimento de água um tema de fundamental importância para a Engenharia Civil. Os sistemas de abastecimento de água são o conjunto de obras, equipamentos e serviços que visam a disponibilização de água potável para determinada população, abrangendo as etapas de captação, adução, tratamento, reservação e distribuição (HELLER; PÁDUA, 2010; TSUTIYA, 2006). Para que esses sistemas operem de maneira eficiente, as tubulações que os compõem devem ser capazes de manter a qualidade da água, transportar os volumes necessários ao abastecimento e resistir aos esforços internos e externos a que estão submetidas (TSUTIYA, 2006).

As perdas de água constituem um problema endêmico nos sistemas de abastecimento em todo o mundo (GUO et al., 2020). Estima-se que, mundialmente, as perdas totais entre as estações de tratamento e os consumidores finais variem tipicamente entre 20% e 30% da produção. Em algumas partes do Brasil, essas perdas chegam a 40% do volume coletado (KARADIREK, 2016). Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) apontam que, para o ano de 2023, a média de perdas no Brasil foi de 39,2%.

As perdas em sistemas de abastecimento dividem-se em perdas aparentes — volumes consumidos mas não contabilizados, como erros de medição e ligações clandestinas — e perdas reais, que são perdas físicas por vazamentos em adutoras, redes, ramais e reservatórios (ANA, 2025). As perdas reais não podem ser completamente eliminadas, mas devem ser administradas dentro de limites economicamente aceitáveis (THORNTON et al., 2008). A localização precisa dos vazamentos em tubulações subterrâneas constitui uma etapa fundamental para a redução das perdas físicas e para a gestão eficiente dos recursos hídricos (GUO et al., 2020; TSO et al., 2020).

O método mais aplicado para detecção de vazamentos não visíveis é o acústico, baseado na propagação de ondas mecânicas pelas paredes da tubulação. Contudo, esse método apresenta melhor desempenho em tubulações pressurizadas, nas quais o vazamento gera sinais acústicos capazes de se propagar ao longo da estrutura da tubulação. Quando as tubulações operam sob baixas pressões ou em condições não pressurizadas, a geração e propagação dos sinais acústicos tornam-

se menos pronunciadas, dificultando a detecção de vazamentos por métodos convencionais (SCUSSEL et al., 2023; YAN et al., 2023).

As adutoras de água tratada que operam por gravidade, com pressão atmosférica no interior da tubulação, representam um cenário particularmente desafiador para a detecção de vazamentos, uma vez que a geração e propagação dos sinais acústicos tornam-se menos pronunciadas em condições de baixa pressão (SCUSSEL et al., 2023; YAN et al., 2023). A revisão sistemática da literatura conduzida por Caetano (2024), com análise de 87 artigos científicos, revelou que 90% dos estudos de detecção de vazamentos tratam de tubulações pressurizadas, 84% utilizam métodos acústicos, e apenas 1% dos trabalhos analisados aborda tubulações não pressurizadas. Isso evidencia uma lacuna técnica e científica que demanda investigação específica, sobretudo considerando que os estudos recentes continuam concentrados em métodos acústicos aplicados a tubulações pressurizadas.

Nesse contexto, a Tomografia de Eletrorresistividade (ERT) se destaca como uma alternativa promissora para a detecção de vazamentos em adutoras não pressurizadas. Trata-se de um método geofísico que obtém, de forma não intrusiva, informações da subsuperfície a partir da injeção de corrente elétrica no solo, sendo raramente influenciado por tráfego ou ruídos acústicos (TSO et al., 2020; BELLANOVA et al., 2020). Caetano (2019) demonstrou a viabilidade da ERT na detecção de vazamentos em adutora de concreto do Sistema Produtor do Rio das Velhas (MG), identificando zonas de baixa resistividade compatíveis com a saturação do solo por água proveniente de vazamentos conhecidos.

O presente trabalho descreve o desenvolvimento e a operação de uma bancada experimental em escala laboratorial, concebida para avaliar e comparar o método ERT (dipolo-dipolo) na detecção de vazamentos em tubulações não pressurizadas, por meio de dois cenários. A bancada foi construída nos laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG, como parte das atividades de pesquisa conduzidas por Caetano (2024).

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

A Tomografia de Eletrorresistividade (ERT), na configuração dipolo–dipolo, é capaz de identificar variações na resposta geoeletrica do solo associadas à

ocorrência de vazamentos em uma bancada experimental de adutoras não pressurizadas?

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a detecção de vazamentos em adutoras não pressurizadas por meio de uma bancada experimental, utilizando a Tomografia de Eletorresistividade (ERT) na configuração dipolo–dipolo, a partir da análise das variações na resposta geoeétrica do meio.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar parâmetros para especificar o bancada experimental a ser utilizada.
- Desenvolver e construir a caixa que compõe o modelo reduzido experimental;
- Definir e caracterizar o tipo de solo utilizado na bancada experimental;
- Controlar as condições iniciais e a variação da umidade do solo ao longo dos ensaios;
- Definir o espaçamento dos eletrodos utilizados nos ensaios geofísicos;
- Aplicar o método da eletorresistividade (ERT) para monitorar as variações de umidade do solo;
- Avaliar se as respostas geofísicas foram diferentes em termos de presença ou ausência de vazamento no aparato experimental.

1.1.3 Justificativa

A realização desta pesquisa justifica-se pela urgente necessidade técnica, econômica e ambiental de reduzir o desperdício de água tratada no Brasil. A manutenção da integridade das tubulações e o controle de vazamentos são fundamentais para assegurar a segurança hídrica. No contexto brasileiro, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023) indica que os sistemas de abastecimento apresentam elevados índices de perdas de água na distribuição, com valores médios em torno de 36% a 40% do volume produzido. Esses dados evidenciam que uma parcela significativa da água tratada não chega ao consumidor final, refletindo ineficiências estruturais, operacionais e de gestão. O SNIS (2023) também aponta que essas perdas estão associadas a fatores como envelhecimento das redes, variações de pressão de serviço, limitações nos programas de

manutenção e dificuldades na detecção de vazamentos não visíveis em subsuperfície. Assim, o volume de perdas deve ser interpretado como o principal reflexo da eficiência operacional e do estado de conservação de toda a rede.

Do ponto de vista técnico, a aplicação de métodos não destrutivos em ambiente controlado permite a avaliação do comportamento de técnicas geofísicas voltadas à detecção de vazamentos em meios porosos. Nesse contexto, métodos convencionais de detecção, especialmente os baseados em análise acústica e variações de pressão, apresentam limitações em determinadas condições operacionais, o que reforça a necessidade de abordagens complementares baseadas em propriedades físicas e na resposta geoeletrica do meio (WU et al., 2023; CAETANO, 2024).

Economicamente, a melhoria na identificação e localização de vazamentos contribui para a redução de custos operacionais associados a escavações desnecessárias, retrabalho e tempo de intervenção das equipes de manutenção, além de minimizar perdas financeiras ao longo do sistema de distribuição (THORNTON et al., 2008; ZENG et al., 2020). Ambientalmente, a redução das perdas de água implica menor demanda por captação, tratamento e bombeamento, resultando em menor consumo energético e maior eficiência dos sistemas de abastecimento. Conforme destaca Von Sperling (2005), a eficiência operacional dos sistemas de saneamento está diretamente associada à preservação dos recursos hídricos e à sustentabilidade ambiental.

Além disso, o desenvolvimento de um modelo experimental em bancada contribui como ferramenta de apoio à pesquisa acadêmica, permitindo a análise controlada de fenômenos associados a vazamentos e possibilitando a avaliação de métodos geofísicos em condições reprodutíveis, bem como sua aplicação em estudos futuros de monitoramento inteligente (CAETANO, 2024; JEON; YOON, 2024).

Além dos estudos laboratoriais, a aplicação da Tomografia de Eletroresistividade em condições reais de campo tem demonstrado resultados consistentes na detecção de vazamentos em sistemas de abastecimento.

Cataldo et al. (2014), em ensaios de campo, observaram comportamento semelhante ao identificado em laboratório, com redução localizada da resistividade elétrica nas regiões afetadas por vazamentos. Esses resultados permitiram delimitar áreas de infiltração e identificar padrões de migração da água no subsolo.

Essas observações reforçam a capacidade da ERT de identificar anomalias em condições reais, demonstrando sua aplicabilidade em sistemas de distribuição de água e sua utilidade em programas de manutenção e controle de perdas hídricas

1.1.4 Restrições e Limitações

Esta pesquisa apresenta restrições inerentes ao seu caráter experimental. O estudo limita-se à escala laboratorial, não reproduzindo todas as variáveis complexas de um ambiente urbano real, como a presença de asfalto, tráfego de veículos ou interferências de outras redes de utilidades. O trabalho foca exclusivamente na aplicação do método da eletrorresistividade, por meio do arranjo dipolo-dipolo, e em tubulações de pequeno diâmetro em PVC, não abrangendo testes em tubulações metálicas ou de grandes diâmetros.

Além disso, a aplicação do método da eletrorresistividade (ERT) em escala laboratorial pode apresentar limitações relacionadas à resolução espacial do método e à sensibilidade às variações de umidade no meio.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os sistemas de abastecimento de água são compostos por um conjunto integrado de unidades responsáveis pela captação, adução, tratamento, reservação e distribuição de água potável, constituindo a base da infraestrutura de saneamento e desempenhando papel essencial na saúde pública, no desenvolvimento urbano e na qualidade de vida da população (HELLER; PÁDUA, 2010; TSUTIYA, 2006).

Segundo Tsutiya (2006), esses sistemas devem ser compreendidos como estruturas hidráulicas interdependentes, nas quais cada etapa operacional influencia diretamente o desempenho global do sistema. Dessa forma, o funcionamento adequado depende da integração entre todas as unidades, sendo que falhas localizadas podem comprometer a eficiência de todo o sistema de abastecimento.

De maneira geral, independentemente do porte da população atendida, esses sistemas são compostos por: captação, adução, tratamento, reservação e distribuição (HELLER; PÁDUA, 2010; TSUTIYA, 2006). A captação envolve a extração da água de mananciais superficiais ou subterrâneos; a adução é a etapa de transporte da água captada até a estação de tratamento, ou da água tratada até os reservatórios de distribuição; o tratamento transforma a água bruta em potável; a reservação garante o volume de reserva necessário para o atendimento das variações de demanda; e a distribuição abastece os usuários finais (TSUTIYA, 2006).

As adutoras constituem um componente fundamental dos sistemas de abastecimento. São as canalizações que conduzem a água para as unidades que precedem a rede de distribuição. Elas podem ser classificadas quanto à natureza da água transportada (bruta ou tratada) e quanto à forma de energia para o escoamento que é por gravidade, por recalque ou mista (TSUTIYA, 2006). O presente trabalho foca nas adutoras de água tratada (AAT) que funcionam por gravidade, ou seja, adutoras em que a pressão interna é a pressão atmosférica (HELLER; PÁDUA, 2010). Esse tipo de adutora é comumente construído em concreto armado, como é o caso do Sistema Produtor do Rio das Velhas, que abastece cerca de 2,4 milhões de habitantes da Região Metropolitana de Belo Horizonte com uma adutora de 2,4 metros de diâmetro e aproximadamente 18 km de extensão (CAETANO, 2019).

Heller e Pádua (2010) destacam que a confiabilidade dos sistemas de abastecimento está diretamente associada à capacidade de manutenção da

continuidade operacional sob condições variáveis de demanda, pressão e envelhecimento das infraestruturas. Nesse contexto, as redes de distribuição representam o componente mais vulnerável do sistema, devido à sua extensão, à exposição a esforços mecânicos e ao processo progressivo de degradação dos materiais.

De acordo com dados da Agência Nacional de Águas (2025), cerca de 84,2% dos municípios brasileiros possuem abastecimento por sistema isolado, ou seja, sem interligação com outras malhas de distribuição. Essa independência operacional torna a eficiência de cada unidade ainda mais rigorosa, pois qualquer falha local, como o agravamento de perdas por vazamentos não detectados, impacta diretamente o fornecimento, sem a possibilidade de compensação por sistemas vizinhos. Para que um sistema de abastecimento cumpra sua função, a qualidade da água deve ser preservada ao longo de toda a cadeia de transporte e distribuição. Von Sperling (2005) ressalta que o conceito de qualidade da água deve ser relativizado de acordo com o uso a que se destina, sendo expresso por meio de parâmetros físicos, químicos e biológicos. Quando os sistemas de abastecimento não são construídos ou operados adequadamente, não há garantia de saúde para a população atendida (TSUTIYA, 2006).

Diante desse cenário, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025) estabelece que a redução de perdas constitui uma diretriz estratégica para a segurança hídrica e eficiência dos sistemas de abastecimento no Brasil, reforçando a necessidade de modernização dos mecanismos de controle e monitoramento das redes.

2.2 PERDAS DE ÁGUA EM TUBULAÇÕES

2.2.1 Tipos de Perdas e de Vazamentos

As perdas de água em sistemas de abastecimento correspondem à diferença entre o volume de água disponibilizado no sistema e o volume efetivamente consumido ou faturado pelos usuários, sendo classificadas em perdas reais e perdas aparentes (ANA, 2025). As perdas aparentes representam a água que foi consumida, mas não contabilizada comercialmente, resultando em perda direta de faturamento. Segundo a ANA (2025) e Tsutiya (2006), esse deficit decorre de erros de medição, hidrômetros defeituosos, fraudes (como ligações clandestinas e by-pass em ramais), além de falhas de leitura e inconsistências cadastrais.

Por outro lado, as perdas reais referem-se ao volume físico de água que se perde ao longo da infraestrutura antes de chegar ao consumidor final. Esse tipo de perda ocorre na forma de vazamentos estruturais em adutoras, redes de distribuição, conexões, ramais e reservatórios (ANA, 2023; HELLER; PÁDUA, 2010).

Nesse contexto, o balanço hídrico constitui a principal metodologia utilizada para quantificação e análise dessas perdas em sistemas de abastecimento. De acordo com a *International Water Association* (IWA), essa abordagem permite a decomposição do volume total do sistema em entradas, consumos autorizados e perdas reais e aparentes, possibilitando a avaliação do desempenho operacional das redes de distribuição (ANA, 2025).

De forma geral, o balanço hídrico constitui um modelo de quantificação aplicado aos sistemas de abastecimento de água, utilizado para avaliação da eficiência operacional das redes de distribuição. Esse modelo é estruturado a partir da relação entre o volume de entrada no sistema, os consumos autorizados e as perdas reais e aparentes, permitindo a análise do comportamento hidráulico global do sistema e a identificação de ineficiências operacionais. Trata-se de um dos principais instrumentos de gestão e controle de perdas em sistemas de abastecimento (ANA, 2025; TSUTIYA, 2006; HELLER; PÁDUA, 2010).

O SNIS é responsável pelo monitoramento de indicadores operacionais dos sistemas de abastecimento de água e entre os principais indicadores relacionados às perdas de água, destacam-se:

- Índice de perdas na distribuição, que expressa a relação entre o volume de água produzido e o volume efetivamente consumido ou faturado, sendo um dos principais parâmetros de eficiência dos sistemas;
- Índice de perdas por ligação, que relaciona o volume perdido ao número de ligações ativas no sistema, permitindo avaliar a eficiência operacional por unidade de consumo;
- Perdas lineares ($\text{m}^3/\text{km.dia}$), que representam o volume de água perdido em relação à extensão da rede de distribuição, sendo um indicador diretamente relacionado à ocorrência de vazamentos físicos;
- Índice de perdas na distribuição por volume faturado, utilizado para avaliar o impacto econômico das perdas no sistema de abastecimento.

Esses indicadores demonstram que as perdas de água permanecem como um dos principais desafios estruturais do setor de saneamento, evidenciando a

necessidade de melhorias contínuas nos processos de monitoramento e manutenção das redes (SNIS, 2023).

2.2.2 Causas dos Vazamentos

As perdas reais estão diretamente relacionadas à integridade estrutural das redes de distribuição. Por operarem continuamente sob pressão e estarem expostas a esforços mecânicos, corrosivos e ambientais, as tubulações sofrem um processo de degradação progressiva. Tsutiya (2006) e Heller e Pádua (2010) concordam que fatores como o envelhecimento das redes, a qualidade dos materiais empregados e as oscilações na pressão de serviço culminam em fadiga e falhas em juntas e conexões.

O grande desafio operacional é que muitos desses rompimentos não são imediatamente perceptíveis na superfície. De acordo com a FUNASA (2014), os vazamentos podem ser classificados em visíveis, não visíveis e inerentes. Os vazamentos não visíveis são os mais críticos para a gestão da rede: por possuírem taxas de fluxo moderadas, podem permanecer ativos por longos períodos sem identificação, gerando um volume acumulado de perda altíssimo.

Diante dessa dificuldade de detecção, o conceito de Non-Revenue Water (NRW) — ou Água Não Faturada — torna-se central. Utilizado internacionalmente como um indicador global de eficiência, o NRW representa a parcela de água produzida que não gera retorno financeiro. AbuEltayef et al. (2023) destacam que a redução do NRW exige um modelo de gestão integrado, combinando monitoramento contínuo, atualização cadastral e o uso de ferramentas de análise espacial (como sistemas GIS) para priorizar áreas com maior probabilidade de falhas.

Sob uma perspectiva sistêmica, Von Sperling (2005) adverte que essa gestão deve transcender a eficiência hidráulica e incorporar a sustentabilidade. Afinal, as perdas físicas representam não só um problema operacional, mas impõem uma pressão insustentável sobre os mananciais e desperdiçam recursos hídricos já processados.

Portanto, as perdas de água configuram um problema multidimensional. Sua mitigação exige não apenas intervenções corretivas pontuais, mas o desenvolvimento e a aplicação de métodos mais eficientes para a identificação de vazamentos em subsuperfície. O entendimento detalhado dessa dinâmica serve como base técnica para a introdução de métodos avançados de detecção não destrutiva, tema que será abordado nos próximos capítulos.

2.3 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

A detecção de vazamentos em sistemas de abastecimento de água é tradicionalmente realizada por meio de métodos acústicos, hidráulicos e operacionais, amplamente consolidados na literatura técnica de saneamento e engenharia de redes (TSUTIYA, 2006; HELLER; PÁDUA, 2010). Essas técnicas são amplamente empregadas devido à sua aplicabilidade em campo e ao menor custo operacional quando comparadas a métodos não destrutivos mais avançados.

Os métodos convencionais de detecção de vazamentos são baseados na análise de variáveis hidráulicas do sistema, principalmente pressão e vazão ao longo da rede de distribuição. Essas variáveis são utilizadas como indicadores indiretos da ocorrência de falhas físicas nas tubulações (TSUTIYA, 2006). De acordo com Heller e Pádua (2010), o desempenho desses métodos está diretamente relacionado às condições operacionais da rede e às características da infraestrutura, o que influencia a capacidade de detecção de anomalias.

Os métodos convencionais apresentam limitações na detecção de vazamentos não visíveis em subsuperfície, especialmente em redes extensas ou envelhecidas, onde os sinais hidráulicos podem não ser suficientes para indicar com precisão a localização da falha (HELLER; PÁDUA, 2010).

Nesse contexto, observa-se que a identificação de vazamentos por métodos convencionais é mais eficiente para indicar a existência de anomalias no sistema do que para determinar sua localização exata.

Diante dessas limitações, torna-se necessária a utilização de métodos complementares capazes de investigar o subsolo de forma indireta, permitindo a identificação de alterações físicas associadas à presença de água infiltrada. Essa necessidade está diretamente relacionada à busca por maior precisão na detecção de vazamentos e à redução das perdas reais nos sistemas de abastecimento, conforme diretrizes estabelecidas pela ANA (2025).

2.4 MÉTODOS GEOFÍSICOS

A detecção de vazamentos em sistemas de abastecimento de água pode ser realizada por meio de diferentes abordagens, incluindo métodos convencionais baseados em análise hidráulica e métodos geofísicos não destrutivos, amplamente discutidos na literatura de engenharia de redes (TSUTIYA, 2006; HELLER; PÁDUA, 2010).

Esses métodos baseiam-se principalmente na análise de variáveis hidráulicas, como pressão e vazão, que permitem a identificação indireta de anomalias no comportamento da rede de distribuição. Embora amplamente utilizados devido à sua aplicabilidade operacional, esses métodos apresentam limitações na detecção e localização precisa de vazamentos não visíveis em subsuperfície, especialmente em sistemas extensos ou com infraestrutura envelhecida.

Nesse contexto, observa-se que tais abordagens são mais eficientes na identificação da existência de falhas do que na sua localização espacial, o que limita sua aplicação em cenários onde a precisão espacial é fundamental.

2.4.1 Tomografia de Eletrorresistividade — ERT

Diante dessas limitações, métodos geofísicos têm sido amplamente aplicados como alternativas complementares, permitindo a investigação indireta das propriedades físicas do subsolo. Entre esses métodos, destacam-se a Tomografia de Eletrorresistividade (ERT), o Ground Penetrating Radar (GPR) e a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), cada um com diferentes princípios físicos e níveis de aplicabilidade. Nesse contexto, métodos geofísicos têm sido amplamente utilizados para investigação de anomalias associadas à presença de água no solo. Entre eles, destaca-se a Tomografia de Eletrorresistividade (ERT), que se baseia na variação da resistividade elétrica do meio em função da presença de umidade. De acordo com Jeon e Yoon (2024), a ERT permite a identificação de alterações nas propriedades elétricas do subsolo, possibilitando a detecção indireta de vazamentos em sistemas enterrados.

A Tomografia de Eletrorresistividade (Electrical Resistivity Tomography – ERT) constitui uma evolução dos métodos convencionais de resistividade elétrica, como a sondagem elétrica vertical, permitindo a obtenção de imagens bidimensionais e tridimensionais da distribuição espacial da resistividade no subsolo. Essa técnica não destrutiva baseia-se na injeção controlada de corrente elétrica por meio de eletrodos dispostos na superfície ou em meios de investigação, seguida da medição das diferenças de potencial geradas no terreno. A partir dessas leituras, é possível inferir o comportamento geoeletrico da estrutura investigada (JEON; YOON, 2024; BELLANOVA et al., 2020).

O princípio físico fundamental da ERT está associado à determinação da resistividade aparente do meio. A resistividade aparente (ρ_a) é uma grandeza elétrica

obtida a partir de medições de diferença de potencial e corrente elétrica injetada no meio, considerando a configuração geométrica do arranjo eletrodódico utilizado. Essa grandeza não representa a resistividade real dos materiais do subsolo, sendo influenciada pela heterogeneidade do meio e pelas condições de aquisição dos dados. Dessa forma, a resistividade aparente constitui um valor equivalente utilizado como base para os processos de inversão geofísica, permitindo a estimativa da distribuição de resistividade em subsuperfície (CATALDO et al., 2014). Esse princípio é expresso matematicamente pela Equação 1:

$$\rho_a = k \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (1)$$

em que ρ_a representa a resistividade aparente, k corresponde ao fator geométrico do arranjo eletrodódico, ΔV é a diferença de potencial medida e I é a corrente elétrica injetada no terreno (CATALDO et al., 2014). É importante ressaltar que a resistividade aparente não representa diretamente a resistividade real dos materiais presentes no subsolo. Em meios geológicos heterogêneos, os dados adquiridos consistem em uma resposta equivalente e integrada de diferentes volumes investigados, sendo influenciados por variações laterais e verticais. Após a aquisição, esses dados geram pseudo-seções, que são representações espaciais iniciais da resistividade (CATALDO et al., 2014; BELLANOVA et al., 2020).

Para transformar esses dados brutos em representações interpretáveis da geometria real do subsolo, aplica-se a modelagem por inversão numérica. Esses procedimentos matemáticos iterativos ajustam continuamente um modelo teórico até minimizar as diferenças entre as respostas observadas em campo e as calculadas pelo *software*, gerando estimativas altamente representativas da distribuição real do meio (BELLANOVA et al., 2020; CATALDO et al., 2014).

Uma das grandes vantagens da ERT, após a consolidação desse modelo, é a sua capacidade de monitoramento temporal de processos hidrogeológicos. A repetição de levantamentos permite identificar dinâmicas no conteúdo de água do solo, possibilitando o acompanhamento de processos como infiltrações, anomalias hidráulicas e vazamentos (TSO et al., 2020).

2.4.1.1 Arranjos Eletródicos na ERT

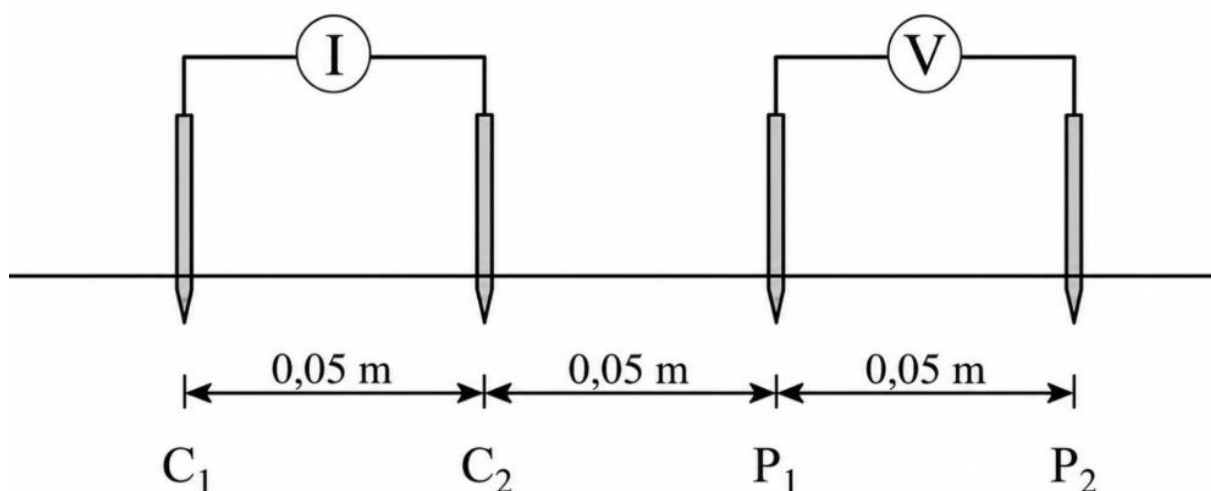
Como evidenciado pela equação da resistividade aparente, a eficiência do método ERT e a qualidade dos modelos gerados estão diretamente subordinadas à configuração geométrica dos eletrodos (o fator k). Esses arranjos controlam a

distribuição da corrente elétrica no subsolo, influenciando parâmetros fundamentais como a sensibilidade, a resolução espacial e a profundidade de investigação (BELLANOVA et al., 2020; REYNOLDS, 2011; JEON; YOON, 2024).

Diferentes configurações produzem padrões distintos de campo elétrico, determinando a capacidade do método em identificar contrastes de resistividade. Os levantamentos podem empregar diversas disposições, sendo os arranjos Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo os mais consolidados na literatura:

- **Wenner e Schlumberger:** São tradicionalmente associados a levantamentos mais estáveis, com excelente relação sinal-ruído e resistência a interferências externas. Embora possuam menor sensibilidade a variações laterais abruptas, são altamente eficientes em estudos de caracterização geral, nos quais a continuidade horizontal das estruturas geológicas é o fator mais relevante (REYNOLDS, 2011).
- **Polo-dipolo:** Atua como uma configuração intermediária entre resolução e profundidade de investigação. É frequentemente utilizado de forma complementar ao dipolo-dipolo, permitindo aumentar a robustez dos modelos obtidos por inversão numérica ao oferecer uma representação mais completa das heterogeneidades (BELLANOVA et al., 2020).
- **Dipolo-dipolo:** No arranjo dipolo-dipolo, os eletrodos de corrente são agrupados em um dipolo e os eletrodos de potencial formam um segundo dipolo, separado por uma distância variável ao longo do perfil investigado, conforme representado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Durante a aquisição dos dados, diferentes combinações de espaçamento entre os dipolos são utilizadas, permitindo amostrar distintos volumes do subsolo e gerar imagens bidimensionais da distribuição de resistividade elétrica. Esse arranjo é amplamente empregado em estudos ambientais e hidrogeológicos devido à sua elevada sensibilidade a variações laterais de resistividade. Em aplicações voltadas à detecção de vazamentos, essa característica é particularmente importante, uma vez que as zonas de infiltração geralmente produzem anomalias localizadas associadas à redução da resistividade elétrica do solo.

Figura 1: Eletrodos de corrente (C1 e C2), os eletrodos de potencial (P1 e P2)



Fonte: Adaptado de Gandolfo e Gallas (2007)

Revisões sobre aplicações da ERT em problemas ambientais indicam que o dipolo-dipolo é frequentemente adotado em experimentos controlados e em monitoramentos temporais (*time-lapse*), justamente por permitir boa resolução espacial na identificação de heterogeneidades no meio investigado (TSO et al., 2020; JEON; YOON, 2024). Resultados semelhantes foram observados por Cataldo et al. (2014), que empregaram o arranjo dipolo-dipolo em experimentos laboratoriais e de campo voltados à detecção de vazamentos. Os autores verificaram reduções expressivas da resistividade nas regiões afetadas pela infiltração de água, demonstrando a capacidade do método para localizar zonas de fuga e acompanhar a propagação da umidade no solo (CATALDO et al., 2014).

Além disso, o dipolo-dipolo permite uma variação sistemática da profundidade de investigação por meio do aumento do fator geométrico n , o que possibilita a análise de diferentes níveis do subsolo com boa resolução lateral. Entretanto, Bellanova et al. (2020) observam que essa configuração pode apresentar maior sensibilidade a ruídos ambientais e interferências superficiais, o que pode comprometer a qualidade dos dados em ambientes urbanos ou altamente heterogêneos.

Cataldo et al. (2014) destacam que esse arranjo apresenta desempenho significativo na identificação de zonas associadas à infiltração de água no solo, sendo frequentemente utilizado em estudos voltados à detecção de vazamentos em tubulações enterradas.

A análise comparativa entre os arranjos evidencia que a escolha deve ser criteriosa e alinhada ao objetivo da investigação. Reynolds (2011) reforça que a utilização combinada de diferentes configurações pode aumentar significativamente a confiabilidade dos modelos geoeletricos, reduzindo incertezas interpretativas.

2.4.1.2 Aplicação na Detecção de Vazamentos

No contexto de tubulações enterradas, vazamentos estão associados à alteração localizada do teor de água no solo, o que resulta em variações na resistividade elétrica do meio poroso. Esse comportamento constitui a base física para a aplicação de métodos geofísicos em investigações indiretas de infiltração de água em solos (REYNOLDS, 2011; TSO et al., 2020).

Entre os métodos geofísicos comumente utilizados para a detecção de vazamentos, destacam-se o Ground Penetrating Radar (GPR) e a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). O GPR apresenta elevada resolução espacial na identificação de estruturas e descontinuidades no subsolo, porém pode sofrer atenuação significativa do sinal em solos argilosos e de alta condutividade elétrica (BELLANOVA et al., 2020). Já a TDR apresenta alta sensibilidade à variação de umidade, porém fornece informações essencialmente pontuais, restritas à região de instalação das sondas (CATALDO et al., 2014).

Diante dessas características, a Tomografia de Eletroresistividade (ERT) foi selecionada como método deste estudo por sua capacidade de fornecer informações espaciais contínuas da distribuição da resistividade elétrica no meio poroso, permitindo a análise de variações associadas à infiltração de água ao longo da bancada experimental. Estudos indicam que a resistividade do solo está diretamente relacionada ao teor de umidade, o que fundamenta a aplicação da ERT em investigações de processos de vazamento em meios porosos (REYNOLDS, 2011; TSO et al., 2020).

2.5 INFLUÊNCIA DA ÁGUA NA RESPOSTA GEOELÉTRICA DOS SOLOS

A resposta geoeletrica dos solos é fortemente influenciada pela presença de água nos vazios, uma vez que a condução elétrica em materiais geológicos ocorre predominantemente por mecanismos eletrolíticos associados à água presente nos poros do solo. Dessa forma, alterações no teor de umidade provocam mudanças significativas nos valores de resistividade elétrica, tornando esse parâmetro um importante indicador de processos de infiltração e saturação do solo

(SANGPRASAT; PUTTIWONGRAK; INAZUMI, 2025).

De acordo com Sangprasat, Puttiwongrak e Inazumi (2025), a umidade constitui um dos principais fatores responsáveis pela variabilidade da resistividade elétrica dos solos. Os autores destacam que existe uma relação predominantemente inversa entre essas variáveis, de modo que o aumento do teor de água promove redução da resistividade elétrica devido ao aumento da mobilidade iônica e da conectividade entre os poros saturados.

Resultados semelhantes foram observados em estudos realizados com solos orgânicos submetidos a diferentes condições de umidade. Nesses experimentos, verificou-se que o aumento do conteúdo de água provocou reduções expressivas nos valores de resistividade, evidenciando a forte dependência desse parâmetro em relação às condições hidráulicas do meio.

Além da quantidade de água presente nos vazios, a resposta geoeletrica dos solos também é influenciada por fatores como composição mineralógica, teor de argila, densidade, temperatura e salinidade da solução intersticial. Solos argilosos tendem a apresentar menores valores de resistividade devido à elevada capacidade de retenção de água e à presença de minerais com maior atividade eletroquímica. Em contrapartida, materiais predominantemente arenosos geralmente apresentam resistividades mais elevadas, especialmente em condições de baixa saturação (SANGPRASAT; PUTTIWONGRAK; INAZUMI, 2025).

Quando ocorre um vazamento em uma tubulação enterrada, a água liberada passa a infiltrar-se no solo adjacente, promovendo alterações progressivas nas condições de umidade e saturação. Esse processo gera uma região úmida que se expande gradualmente a partir do ponto de fuga, formando uma zona de transição conhecida como frente de molhamento.

A frente de molhamento corresponde à interface entre o solo previamente não saturado e a região afetada pela infiltração. À medida que a água se desloca através dos poros, ocorre aumento da saturação e consequente modificação das propriedades físicas e elétricas do meio. Como resultado, são produzidas alterações espaciais na distribuição da resistividade elétrica que podem ser identificadas por métodos geofísicos (LAI et al., 2016).

Em experimentos laboratoriais realizados por Lai et al. (2016), verificou-se que a água proveniente de vazamentos se propaga progressivamente através do solo, produzindo uma zona de influência hídrica que se expande ao longo do tempo.

Os autores observaram que a evolução dessa região pode ser monitorada por técnicas geofísicas capazes de detectar alterações nas propriedades eletromagnéticas e elétricas do meio.

2.5.1 Alterações Geoelétricas Associadas aos Vazamentos

A infiltração da água modifica diretamente a distribuição da resistividade elétrica do solo. À medida que a saturação aumenta, ocorre redução da resistividade em função da ampliação dos caminhos condutivos disponíveis para o fluxo de corrente elétrica. Dessa forma, regiões afetadas por vazamentos tendem a apresentar valores inferiores de resistividade quando comparadas às áreas não impactadas.

Cataldo et al. (2014) demonstraram experimentalmente que a presença de vazamentos produz anomalias geoelétricas claramente identificáveis em levantamentos de Tomografia de Eletorresistividade. Os autores observaram significativa redução da resistividade nas proximidades dos pontos de fuga, permitindo localizar as áreas afetadas e acompanhar a evolução do processo de infiltração.

Em um dos experimentos realizados pelos autores, verificou-se que as imagens de resistividade permitiram não apenas identificar o vazamento, mas também visualizar a direção preferencial de propagação da água no solo. Segundo Cataldo et al. (2014), as variações de resistividade observadas refletiram diretamente o processo de difusão da água através do meio poroso.

Os resultados obtidos por Tso et al. (2020) reforçam essa interpretação. Utilizando monitoramento geoelétrico temporal, os autores demonstraram que alterações no conteúdo de água dos poros podem ser detectadas por levantamentos sucessivos de ERT, permitindo acompanhar a evolução espacial e temporal de vazamentos subterrâneos.

2.5.2 Aplicações da Resposta Geoelétrica na Detecção de Vazamentos

A elevada sensibilidade da resistividade elétrica às variações de umidade torna a ERT uma ferramenta particularmente adequada para a investigação de vazamentos em sistemas enterrados. Diferentemente dos métodos convencionais, que frequentemente dependem da proximidade ao ponto de fuga ou da existência de manifestações superficiais, a tomografia elétrica permite detectar alterações indiretas produzidas pela infiltração da água no solo.

De acordo com Jeon e Yoon (2024), a ERT constitui uma técnica não

destrutiva capaz de fornecer informações espaciais detalhadas sobre a distribuição das propriedades elétricas dos materiais investigados. Essa característica favorece sua aplicação em estudos voltados à detecção de anomalias relacionadas à presença de água, incluindo vazamentos em tubulações, infiltrações e monitoramento hidrogeológico.

Assim, o monitoramento das alterações geoelétricas associadas à infiltração da água representa o princípio físico fundamental que sustenta a utilização da Tomografia de Eletrorresistividade na detecção de vazamentos em redes de abastecimento, justificando sua adoção como método de investigação no presente estudo.

2.6 ESTUDOS LABORATORIAIS

Os estudos laboratoriais desempenham papel fundamental na compreensão dos mecanismos físicos associados à detecção geoelétrica de vazamentos, uma vez que permitem o controle de variáveis como vazão, tipo de solo, profundidade da tubulação e tempo de infiltração.

Entre os trabalhos mais relevantes da literatura, destaca-se o estudo de Cataldo et al. (2014), no qual foram realizados experimentos controlados utilizando Tomografia de Eletrorresistividade, Ground Penetrating Radar (GPR) e Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para investigação de vazamentos em tubulações enterradas. Os autores observaram que a ERT foi capaz de identificar reduções significativas da resistividade nas regiões afetadas pela infiltração de água, permitindo localizar com precisão as zonas de vazamento.

Além disso, os resultados demonstraram que as imagens tomográficas obtidas permitiram visualizar a propagação da água no solo e sua distribuição espacial ao longo do tempo. Segundo os autores, há uma forte correlação entre as anomalias de resistividade e o comportamento da umidade no meio poroso, evidenciando a capacidade da ERT de representar processos hidráulicos subterrâneos (CATALDO et al., 2014).

De forma complementar, Lai et al. (2016) investigaram a propagação da água proveniente de vazamentos em meios porosos por meio de experimentos laboratoriais. Os autores identificaram a formação de uma zona de influência hídrica progressiva, conhecida como frente de molhamento, que se desenvolve a partir do ponto de fuga.

Essa frente de molhamento representa a interface entre o solo não saturado e

a região afetada pela infiltração, sendo caracterizada por variações contínuas de saturação. À medida que a água se desloca no meio poroso, ocorre alteração significativa das propriedades físicas e elétricas do solo, resultando em variações detectáveis por métodos geofísicos como a ERT (LAI et al., 2016).

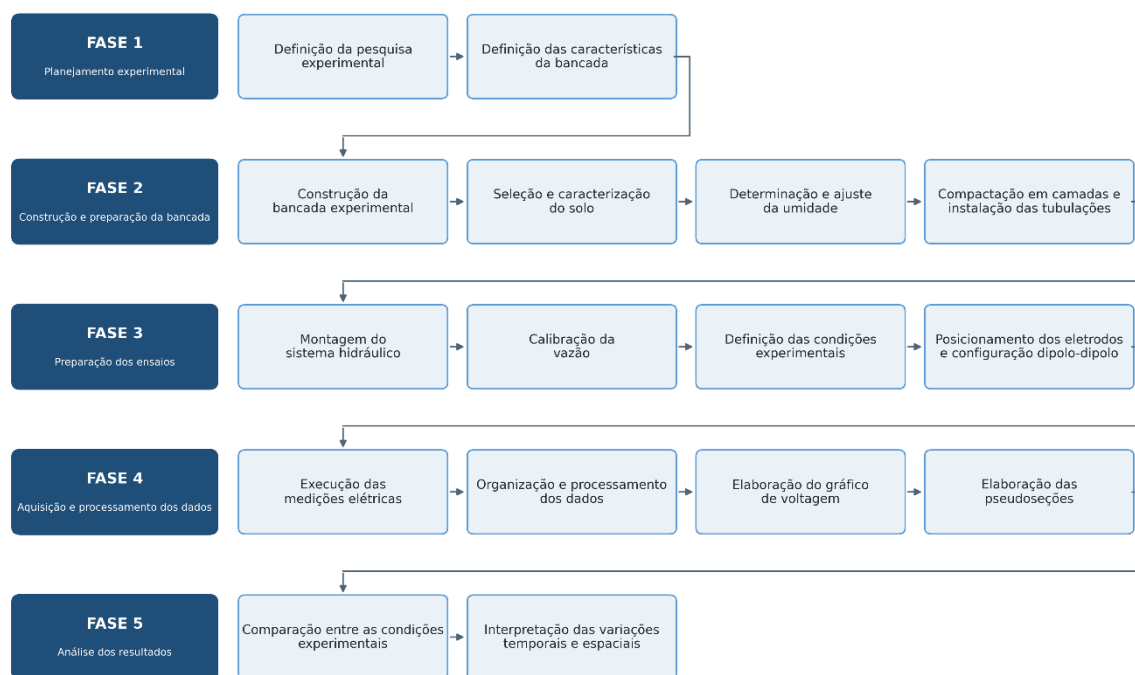
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Do ponto de vista da sua natureza, o presente trabalho caracteriza-se como pesquisa aplicada, na medida em que busca gerar conhecimentos com aplicação prática em problemas específicos da engenharia de saneamento. Quanto aos objetivos, classifica-se como pesquisa experimental e explicativa. Quanto aos procedimentos técnicos, envolve experimento laboratorial com controle de variáveis e análise estatística dos resultados. A estratégia de pesquisa adotada contemplou a execução de ensaios em bancada laboratorial para a obtenção de dados primários de resistividade elétrica, com posterior análise por meio de regressões lineares, pseudoseções de resistividade aparente.

Para facilitar a compreensão do procedimento experimental, a metodologia foi organizada em cinco fases principais: planejamento experimental; construção e preparação da bancada; preparação dos ensaios; aquisição e processamento dos dados; e análise dos resultados. A sequência das etapas desenvolvidas em cada fase é apresentada na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma das etapas de desenvolvimento e avaliação da bancada experimental



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

3.2 BANCADA EXPERIMENTAL

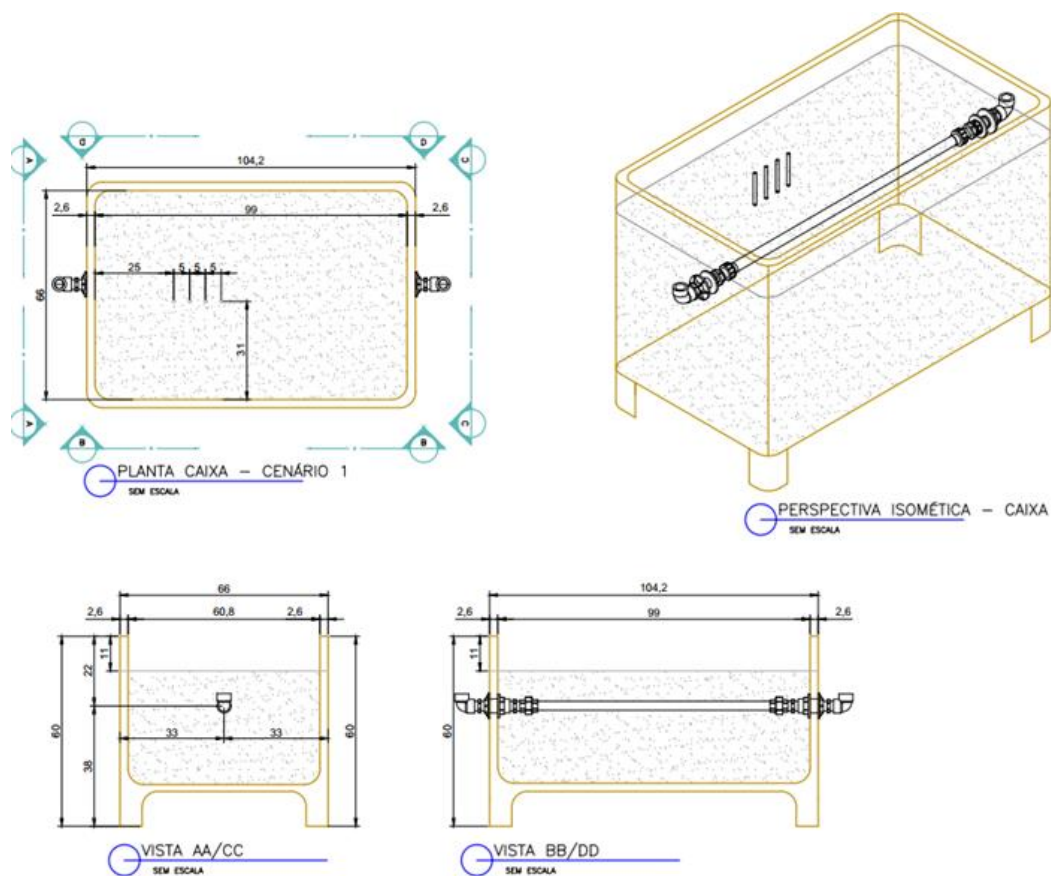
3.2.1 Construção e Dimensões

A bancada experimental utilizada neste estudo foi concebida com o objetivo de reproduzir, em escala laboratorial controlada, as condições hidráulicas e geoeletricas associadas a uma adutora enterrada em meio poroso, permitindo a análise da resposta da Tomografia de Eletroresistividade (ERT) frente à ocorrência de vazamentos pontuais.

Assim, o objetivo não foi representar a adutora de maneira isolada, mas sim o sistema formado pela interação entre a tubulação enterrada e o meio poroso no qual ela está inserida.

A estrutura física consiste em uma caixa de material plástico rígido, com dimensões internas de 104 cm de comprimento, 66 cm de largura e 60 cm de altura, conforme apresentado na Figura 3. Essas dimensões foram definidas de modo a conciliar a representatividade do modelo físico com a viabilidade de execução dos ensaios em ambiente laboratorial.

Figura 3: Vistas da bancada experimental representados no Autocad



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

O volume útil da bancada possibilitou a instalação da tubulação e do sistema de aquisição de dados, além de oferecer espaço suficiente para o preenchimento com solo, permitindo o desenvolvimento da pluma de infiltração decorrente do vazamento simulado e a formação de gradientes de umidade no solo.

As dimensões adotadas também viabilizaram a disposição do arranjo de eletrodos na configuração dipolo-dipolo, permitindo a realização das medições de resistividade elétrica ao longo da superfície do modelo experimental.

A altura de 60 cm foi estabelecida de modo a permitir a compactação do solo em camadas sucessivas, a instalação horizontal da tubulação simulada e o controle adequado das condições de saturação e umidade durante os ensaios. Essa configuração também facilitou a remoção e a reorganização do solo entre os diferentes cenários experimentais, contribuindo para a repetibilidade dos testes e para a padronização das condições iniciais.

Do ponto de vista construtivo, a bancada foi executada em material plástico rígido, escolhido por ser eletricamente isolante e por não interferir significativamente nas medições de resistividade elétrica do solo. Adicionalmente, por se tratar de uma caixa plástica impermeável, evitou-se a perda de água para o ambiente externo durante os ensaios, contribuindo para a manutenção das condições de umidade estabelecidas ao longo de cada experimento.

A bancada foi instalada sobre uma superfície nivelada, de modo a manter a distribuição uniforme do solo e evitar interferências decorrentes de desníveis durante a execução dos ensaios. O nivelamento também favoreceu a infiltração da água no meio poroso de forma mais uniforme ao longo da bancada, contribuindo para a padronização das condições experimentais.

A bancada experimental foi utilizada como sistema físico composto por três elementos principais: o meio poroso (solo argiloso compactado), o elemento condutor (tubulação de PVC) e o elemento de perturbação hidráulica (vazamento simulado por orifício na tubulação). Essa configuração foi empregada para possibilitar a análise da resposta elétrica do solo frente à introdução controlada de água no meio.

Após a montagem da estrutura física da bancada experimental, foi realizada a preparação e caracterização do solo utilizado nos ensaios, etapa que incluiu o controle de umidade e a compactação do material, conforme procedimentos descritos nas normas ABNT NBR 6457:2016, NBR 7181:2016 e NBR 16097:2012,

sendo esta etapa apresentada na subseção seguinte.

3.2.2 Sistema de aquisição de dados (ERT)

As medições de eletrorresistividade foram realizadas diretamente na bancada experimental, após o estabelecimento das condições de cada cenário analisado. O procedimento consistiu na aplicação de corrente elétrica no meio por meio de eletrodos dispostos na superfície e na leitura da diferença de potencial resultante entre pares de eletrodos receptores, formando o conjunto de dados utilizado na caracterização elétrica do sistema.

O arranjo eletródico utilizado foi do tipo dipolo-dipolo, composto por quatro eletrodos ativos identificados como C1, C2 (eletrodos de corrente) e P1, P2 (eletrodos de potencial). Esse arranjo foi o escolhido por ser um dos mais utilizados em levantamento de eletrorresistividade, devido a sua alta resolução lateral e boa capacidade de delimitar estruturas verticais.

Esses eletrodos foram posicionados linearmente sobre a superfície da bancada experimental, mantendo espaçamento uniforme entre os cenários. O espaçamento entre eletrodos utilizado no sistema era de 0,05 m, o que foi configurado no equipamento empregado. Essa disposição está indicada na Figura 3 e na Figura 4.

Figura 4: Quatro eletrodos com espaçamento de 0,05m ligados ao aparelho 4 point light 10 W.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

O experimento consistiu em dois cenários, o primeiro sem vazamento e o

segundo com vazamento, os dois nas mesmas condições iniciais, permitindo assim a comparação dos resultados e do comportamento elétrico em cada cenário. A tubulação sem vazamento foi utilizada como controle do experimento.

No cenário 1 (condição sem vazamento), o procedimento de aquisição foi realizado com a bancada em condição de referência, sem a introdução de fluxo de vazamento na tubulação. A sequência de medições seguiu a variação sistemática das combinações entre dipolos de corrente e potencial ao longo da linha de eletrodos, mantendo o mesmo arranjo geométrico e espaçamento fixo de 0,05 m entre eletrodos adjacentes. Os dados obtidos representam o comportamento elétrico do meio sem perturbação hidráulica induzida.

No cenário 2 (condição com vazamento), o procedimento de aquisição foi realizado sob a mesma configuração geométrica de eletrodos, mantendo o mesmo arranjo dipolo-dipolo e o mesmo espaçamento de 0,05 m. A diferença operacional deste cenário consiste na presença de vazamento simulado na tubulação da bancada experimental, durante a execução das leituras elétricas. As medições foram realizadas seguindo a mesma sequência de varredura eletródica aplicada no cenário 1, permitindo a comparação direta entre as respostas obtidas nas duas condições.

Os valores de diferença de potencial registrados entre os eletrodos foram associados às respectivas configurações geométricas de medição e utilizados para o cálculo da resposta elétrica aparente do meio. Os dados foram organizados em conjuntos correspondentes a cada cenário experimental, respeitando a sequência de aquisição realizada na bancada.

Após a etapa de registro, os conjuntos de dados foram organizados para processamento numérico, sendo submetidos a procedimentos de inversão para geração dos modelos bidimensionais de resposta elétrica do meio na bancada experimental. As medições foram realizadas de forma sequencial ao longo do tempo, caracterizando a abordagem temporal do tipo time-lapse, na qual os registros elétricos refletem a evolução das condições do meio entre os cenários analisados.

Tabela 1: Configuração dos cenários

Cenário	Arranjo eletrodódico	Número de eletrodos	Espaçamento entre eletrodos	Configuração geométrica	Condição experimental
1	Dipolo-dipolo	4	0,05 m	Eletrodos C1, C2, P1 e P2 dispostos linearmente na superfície da bancada, com formação sequencial de dipolos de corrente e potencial	Sem vazamento
2	Dipolo-dipolo	4	0,05 m	Mesma disposição linear de eletrodos e mesma geometria de dipolos, com aquisição realizada durante a ocorrência de vazamento na tubulação	Com vazamento

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

As diferenças entre os cenários estão associadas exclusivamente à condição hidráulica imposta durante as medições, mantendo-se inalterados o arranjo geométrico e o procedimento de aquisição elétrica.

3.2.3 Solo Utilizado e Controle de Umidade

O solo utilizado neste estudo constituiu o meio poroso empregado na montagem da bancada experimental, sendo composto por material de natureza predominantemente argilosa. Esse meio foi empregado nos ensaios de infiltração simulada realizados ao longo dos diferentes cenários experimentais.

Antes de sua inserção na bancada, o solo foi submetido a ensaios de caracterização geotécnica, com o objetivo de determinar suas propriedades físicas básicas e padronizar o material empregado nos experimentos. A caracterização física do solo utilizado na bancada experimental foi realizada com base em normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), garantindo padronização e reprodutibilidade dos ensaios. A distribuição granulométrica foi determinada conforme a ABNT NBR 7181:2016, permitindo a classificação do solo quanto à sua composição textural. A densidade dos grãos foi obtida de acordo com a ABNT NBR 6508:1984, enquanto a umidade natural do material foi determinada

seguindo procedimentos compatíveis com a ABNT NBR 6457:2016. A aplicação dessas normas assegura que as propriedades físicas do solo utilizadas na análise estejam alinhadas a procedimentos consolidados na engenharia geotécnica.

A primeira etapa consistiu na preparação das amostras, realizada conforme a ABNT NBR 6457:2016, que estabelece os procedimentos para preparação de amostras de solo destinadas a ensaios de caracterização geotécnica. Nessa etapa, o material foi inicialmente destorroado manualmente, com o objetivo de reduzir os agregados presentes e permitir a obtenção de uma massa mais homogênea. Em seguida realizou-se a homogeneização do solo, garantindo a distribuição uniforme das frações constituintes. Ao final desse procedimento, as frações obtidas foram acondicionadas separadamente para a realização dos ensaios de caracterização, conforme apresentado na Figura 5.

Na sequência, o solo da bancada foi caracterizado quanto à sua distribuição granulométrica, conforme a ABNT NBR 7181:2016, que estabelece o procedimento para determinação do tamanho das partículas por meio de peneiramento e sedimentação. Essa análise forneceu a distribuição granulométrica do material utilizado no preenchimento da bancada experimental, evidenciando a predominância de partículas finas, característica associada a solos de comportamento argiloso. Essa característica influencia diretamente o comportamento do meio poroso, especialmente no que se refere à permeabilidade e à interação entre água e solo durante os ensaios de simulação de vazamento.

Figura 5: Amostras de solo após a preparação para os ensaios de caracterização geotécnica.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A determinação da densidade dos grãos do solo foi realizada pelo método da picnometria a laser, utilizando o Multi Picnômetro Quantachrome MVP-6DC, disponível no prédio 18 do campus Nova Gameleira do CEFET-MG. A picnometria a laser é uma técnica de alta precisão que determina o volume real das partículas sólidas por deslocamento de gás, permitindo o cálculo da massa específica dos grãos.

Posteriormente, foi determinado o teor de umidade do solo conforme a ABNT NBR 16097:2012, que estabelece métodos expeditos para a determinação da quantidade de água presente em amostras de solo. O controle do teor de umidade gravimétrica foi realizado com o medidor de umidade do solo ECOWITT, modelo WH0291, durante toda a duração dos experimentos. O teor de umidade foi estabelecido entre 18% e 20%, sendo o monitoramento realizado periodicamente com o equipamento, conforme apresentado na Figura 6.

Durante o preenchimento, a água foi adicionada gradualmente por um aspersor, misturando bem o solo até atingir a umidade entre 18% e 20%. Foram utilizados 500 mL de água por camada de solo. Após a compactação inicial, o teor de umidade foi monitorado regularmente durante o período de medições. Caso variações fossem detectadas, o ajuste era realizado adicionando água ou permitindo que o solo secasse até retornar ao intervalo alvo.

Figura 6: Monitoramento do teor de umidade do solo com o medidor ECOWITT WH0291.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A compactação do solo foi realizada em três camadas. O procedimento completo foi o seguinte:

- 1) Uma camada inicial de solo foi colocada dentro do aparato experimental, espalhando-o uniformemente em toda a área. Esta camada correspondeu a aproximadamente $\frac{1}{3}$ da altura total da caixa, conforme apresentado na Figura 7;
- 2) Utilizou-se um rolo de compactação de 2,26 kg para aplicar força sobre o solo. O número de passadas realizadas por camada foi de 20 passadas. A cada novo cenário experimental, o solo era retirado da bancada, seco e adensado novamente. Cuidou-se especialmente de adensar o solo ao redor da tubulação para evitar espaços vazios;
- 3) Uma fita métrica foi fixada na lateral da caixa para acompanhar o adensamento ao longo das camadas;
- 4) O solo foi umedecido gradualmente durante o adensamento, conforme descrito no item 3.2.2.
- 5) O procedimento de compactação com rolo de 2,26 kg e 20 passadas por camada, em três camadas, garantiu densidade uniforme e reprodutibilidade das condições entre os diferentes cenários experimentais.

Figura 7: Primeira camada de solo na bancada experimental e fita métrica para controle do adensamento.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

As etapas de caracterização realizadas forneceram os parâmetros físicos do solo utilizados na montagem da bancada experimental e no controle das condições iniciais dos ensaios, contribuindo para a padronização do material empregado ao longo dos diferentes cenários experimentais.

3.2.4 Sistema hidráulico de simulação de vazamento

O sistema hidráulico utilizado nos ensaios foi responsável pela alimentação da tubulação instalada na bancada experimental e pelo controle manual da passagem da água, viabilizando a execução dos cenários experimentais analisados no estudo. A configuração do sistema hidráulico empregado é apresentada na Figura 8.

A alimentação do sistema foi realizada por meio de um reservatório superior constituído por uma garrafa PET, a partir do qual a água era conduzida até a tubulação por ação da gravidade. O controle da passagem do fluido foi realizado por meio de um equipo, utilizado como elemento regulador manual do tipo abre-e-fecha, permitindo o acionamento e a interrupção do fluxo durante a realização dos ensaios.

Figura 8: Representação esquemática do sistema hidráulico utilizado na bancada experimental, evidenciando o reservatório superior (garrafa PET) e o equipo como elemento de controle manual da passagem do fluido.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Antes da realização dos ensaios, o sistema hidráulico foi calibrado experimentalmente por meio do ajuste do equipo regulador. A calibração consistiu na medição do volume de água escoado em um intervalo de 180 s, sendo realizadas cinco medições sucessivas. A condição selecionada para os ensaios correspondeu a um volume de aproximadamente 47 mL em 180 segundos, equivalente a uma vazão aproximada de 0,26 mL/s, obtida pela relação entre o volume coletado e o tempo de escoamento.

Foram utilizadas duas tubulações de PVC com seção transversal cilíndrica, introduzidas nas aberturas laterais da bancada:

- 1) Tubulação com orifício central: possui um orifício de dimensão controlada na parede lateral e na região central de seu comprimento, destinado à simulação do ponto de vazamento;
- 2) Tubulação íntegra (controle): sem orifício, utilizada como referência nas medições realizadas sem vazamento.

A utilização de duas tubulações distintas permitiu a comparação direta entre as condições com e sem vazamento, mantendo-se constantes as demais variáveis experimentais. Durante os ensaios, as tubulações permaneceram preenchidas em 80% da capacidade, para representar a condição real de campo de uma adutora, de acordo com a condição analisada.

O orifício foi executado na parede lateral da tubulação com o objetivo de reproduzir, em escala laboratorial, a localização de fissuras observadas em tubulações enterradas. Arrais et al. (2015), ao analisarem tubos de ferro fundido utilizados em redes de esgoto, observaram que grande parte das fissuras se encontrava nas regiões laterais, associadas à movimentação da tubulação e às condições de seu assentamento. De forma semelhante, Tang et al. (2025), em estudo experimental com tubulações enterradas de PVC-UH, posicionaram a fissura na região lateral da seção transversal do tubo. Assim, a localização lateral do orifício adotada neste trabalho buscou aproximar a configuração experimental de situações relatadas na literatura, possibilitando a liberação de água diretamente para o solo adjacente e o acompanhamento das alterações produzidas no meio poroso.

A Figura 9 apresenta a tubulação utilizada na simulação, com destaque para o orifício lateral por meio do qual a água foi liberada e infiltrada no solo compactado da bancada.

Figura 9: Tubulação de PVC utilizada na bancada experimental, no cenário 2, com o orifício lateral empregado na simulação do vazamento.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A configuração adotada para o sistema hidráulico, composta pelo reservatório superior, pelo controle manual de fluxo por meio de equipo e pela calibração experimental da vazão, possibilitou a reprodução controlada da alimentação hidráulica utilizada nos ensaios, contribuindo para a padronização das condições de operação da bancada e para a repetibilidade das medições realizadas.

A pluma de umidade foi formada a partir do vazamento controlado de água da tubulação de PVC enterrada. O vazamento ocorreu por meio de um orifício de pequeno diâmetro localizado na região lateral da tubulação, com vazão constante de aproximadamente 0,26 mL/s. As medições foram iniciadas somente após a estabilização da pluma de umidade. Considerou-se que a pluma havia atingido condição de estabilidade quando sua geometria e extensão apresentavam variações pouco significativas entre observações consecutivas, indicando um estado aproximadamente permanente entre a vazão aplicada e a redistribuição da água no solo.

3.2.5 Análise de dados

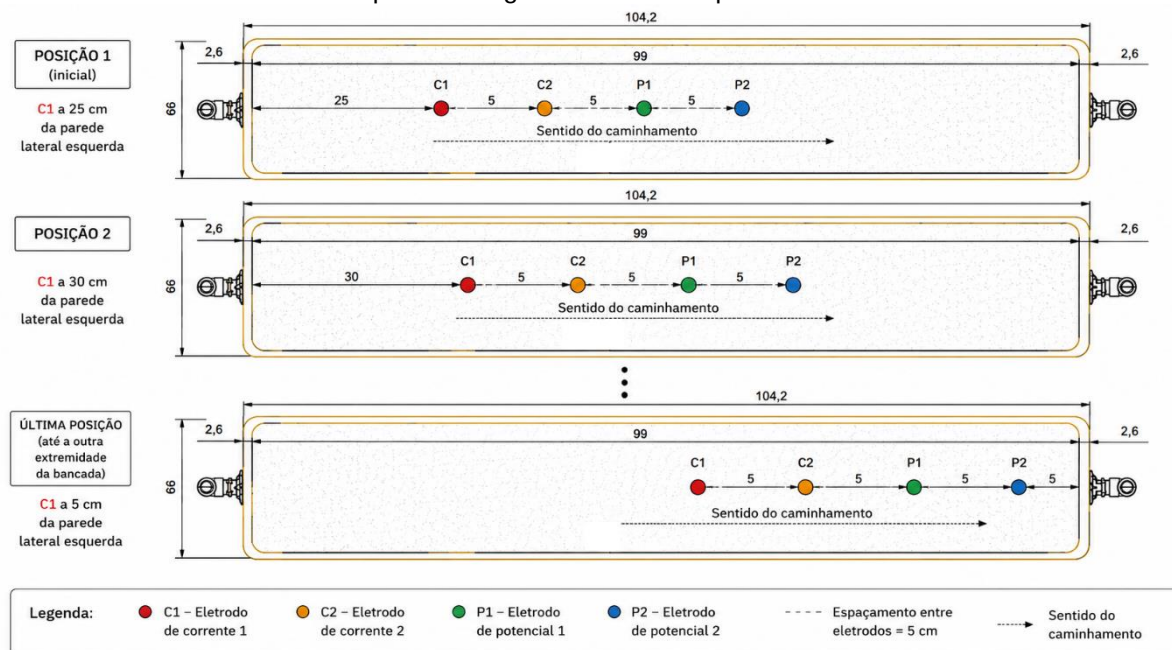
A aquisição dos dados foi realizada com corrente elétrica de 10 mA, valor mantido constante em todas as medições, a fim de garantir a padronização das condições de aquisição e a comparação entre os diferentes cenários experimentais.

O espaçamento de 0,05 m entre os eletrodos foi definido em função das dimensões reduzidas da bancada experimental, que possui comprimento limitado. A adoção desse espaçamento possibilitou realizar o maior número possível de posições de medição ao longo da extensão da caixa, aumentando a densidade dos dados adquiridos e, conseqüentemente, a resolução espacial das pseudo-seções de resistividade. Espaçamentos maiores reduziriam o número de pontos de aquisição e poderiam comprometer a identificação detalhada das alterações geoeletricas associadas ao vazamento. Dessa forma, o espaçamento de 5 cm representou um compromisso entre a limitação física da bancada e a necessidade de obter maior detalhamento das variações de resistividade ao longo do modelo experimental.

As medições foram realizadas utilizando quatro eletrodos superficiais dispostos segundo o arranjo dipolo-dipolo, na sequência C1–C2–P1–P2, mantendo-se um espaçamento constante de 0,05 m entre eletrodos adjacentes. Inicialmente, o primeiro eletrodo de corrente (C1) foi posicionado a 0,25 m da parede lateral esquerda da bancada, sendo os demais eletrodos distribuídos sequencialmente ao longo da superfície do solo.

Após cada aquisição, o conjunto de eletrodos foi deslocado longitudinalmente no sentido da extremidade oposta da bancada, conforme ilustrado na Figura X. O caminhamento foi realizado em incrementos de 0,05 m, correspondentes ao espaçamento entre eletrodos, de modo que a posição inicial do eletrodo C1 passou sucessivamente para 0,30 m, 0,35 m, 0,40 m, e assim sucessivamente até a última posição de medição. Durante todo o procedimento, o espaçamento de 0,05 m entre os eletrodos foi mantido constante e a sequência C1–C2–P1–P2 foi preservada, garantindo a manutenção do arranjo dipolo-dipolo em todas as aquisições. O deslocamento foi realizado por meio da reconexão dos cabos do equipamento aos eletrodos posicionados imediatamente à frente, sem alteração da geometria do arranjo.

Figura 10: Esquema do posicionamento inicial e do caminhamento dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo ao longo da bancada experimental.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Os dados obtidos durante os ensaios foram organizados após a etapa de aquisição das medições de eletrorresistividade, considerando os dois cenários experimentais avaliados no estudo. As informações foram inicialmente estruturadas de acordo com os registros temporais associados a cada ensaio, permitindo a separação dos conjuntos de dados referentes às condições sem vazamento e com vazamento.

Para a análise espacial dos resultados, os dados de resistividade aparente foram processados e interpolados para a geração das pseudo-seções e mapas de distribuição da resistividade no interior da bancada experimental. Esse processamento foi realizado no *software* Tecplot, permitindo a visualização espacial das variações associadas às diferentes condições hidráulicas avaliadas.

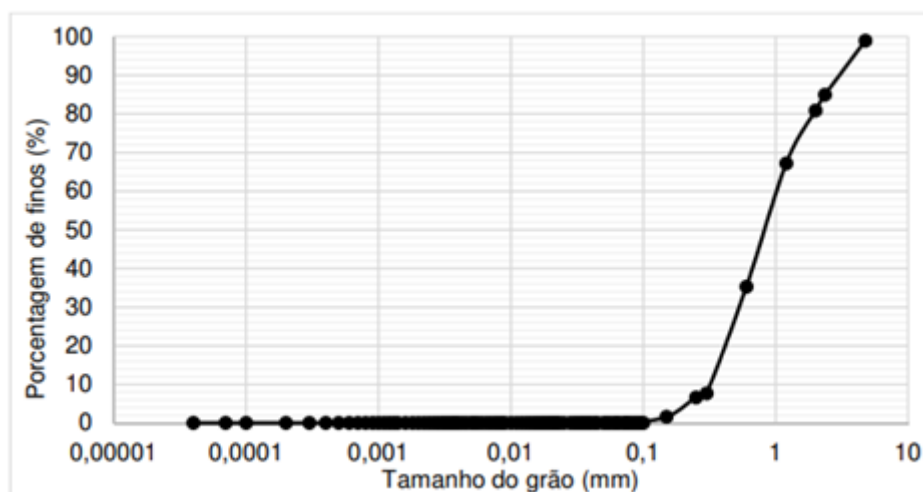
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO UTILIZADO

Antes da execução das medições na bancada experimental, realizou-se a caracterização física do solo utilizado em seu preenchimento, uma vez que as propriedades desse material influenciam diretamente a distribuição da água no meio poroso.

A Figura 11 apresenta a curva granulométrica do solo empregado na bancada.

Figura 11: Análise granulométrica do solo



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A análise granulométrica revelou que o solo utilizado na bancada é predominantemente argiloso, com curva granulométrica característica de solos finos. A distribuição dos tamanhos de grãos indica elevada porcentagem de partículas menores que 0,002 mm (argila) e 0,075 mm (finos em geral), conforme metodologia da ABNT NBR 7181:2016. O caráter argiloso do material tem implicação direta na condutividade elétrica do solo e, consequentemente, nos valores de resistividade medidos, pois solos argilosos apresentam maior área superficial específica das partículas, o que aumenta a condução elétrica superficial e reduz a resistividade em comparação com solos mais grossos.

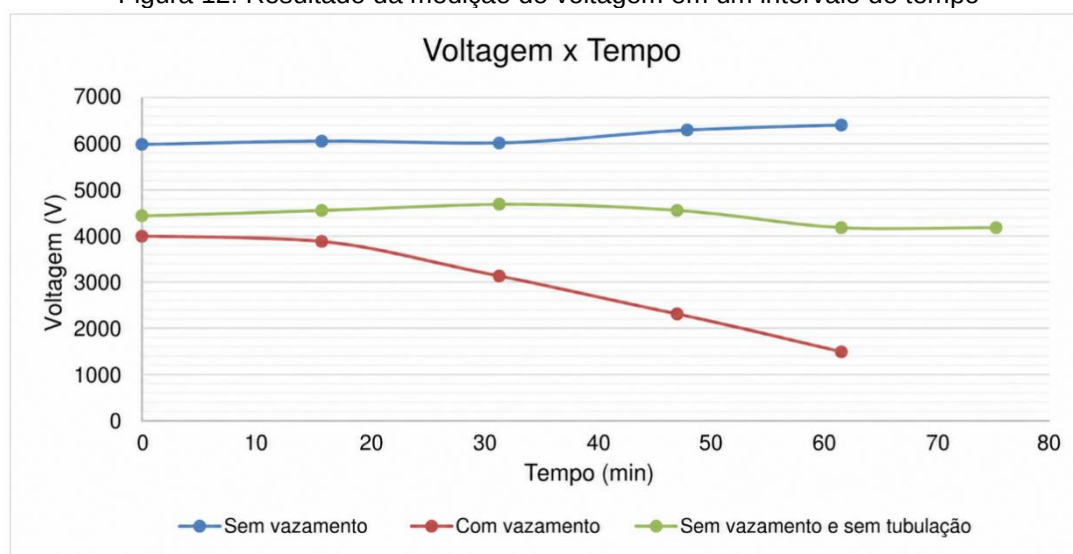
O ensaio de picnometria a laser determinou que a densidade dos grãos do solo utilizado é de 2,508 g/cm³, com coeficiente de variação de 0,2405%. O valor é compatível com densidades típicas de solos argilosos. A relação de umidade no solo composto predominantemente por argila foi de 11,034%, sendo esse o valor base

antes do umedecimento para os ensaios.

4.2 MEDIÇÕES DE VOLTAGEM AO LONGO DO TEMPO

A Figura 12 a seguir apresenta a evolução da voltagem medida ao longo do tempo para os Cenários 1 (sem vazamento), 2 (com vazamento) e uma condição adicional de referência (sem vazamento e sem tubulação), obtidas com o arranjo dipolo-dipolo e eletrodos centralizados.

Figura 12: Resultado da medição de voltagem em um intervalo de tempo



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

No Cenário 1 (sem vazamento), os valores de voltagem permanecem elevados e relativamente estáveis durante todo o período de monitoramento, variando aproximadamente entre 6000 V e 6400 V. O comportamento da curva não apresenta tendência de crescimento ou queda, mantendo pequenas variações ao longo do tempo. Isso indica que, na ausência de vazamentos da tubulação, não são observadas variações significativas na resposta elétrica ao longo do tempo.

No Cenário 2 (com vazamento), observa-se um comportamento diferente a partir dos primeiros 10 a 20 minutos de medição. Inicialmente, os valores de voltagem são próximos de 4000 V, porém a partir desse intervalo ocorre uma redução progressiva e contínua ao longo do tempo, atingindo aproximadamente 1500 V ao final do ensaio (60 minutos). Essa variação gradual indica que o impacto do vazamento se propaga pelo solo ao longo do tempo.

A comparação direta entre os dois cenários evidencia não apenas diferenças de magnitude, mas principalmente de tendência temporal: enquanto o Cenário 1

mantém estabilidade ao longo de toda a aquisição, o Cenário 2 apresenta uma trajetória de decaimento contínuo. A separação entre as curvas se torna mais evidente após aproximadamente 20 minutos de ensaio, quando o comportamento do cenário com vazamento passa a se afastar de forma sistemática do comportamento do cenário de referência.

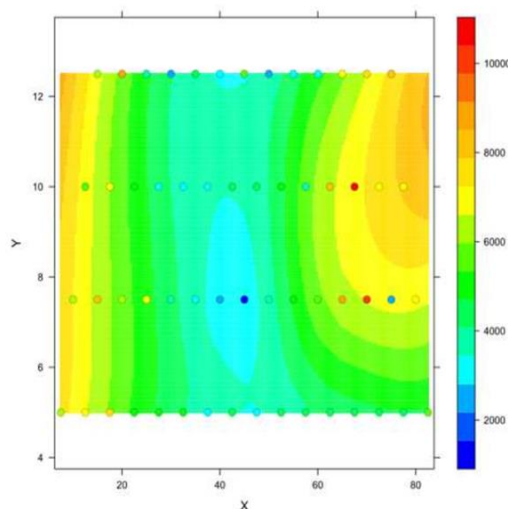
Os resultados mostram que a bancada foi capaz de diferenciar os cenários e registrar variações temporais consistentes associadas ao desenvolvimento do vazamento ao longo do ensaio.

Em relação à resistividade, serão representadas abaixo as pseudo-seções de resistividade aparente obtidas para os cenários sem vazamento e com vazamento, respectivamente, a partir das medições realizadas com o arranjo dipolo-dipolo. Essas imagens representam a distribuição espacial da resistividade no interior da bancada experimental, permitindo a comparação direta entre as duas condições avaliadas.

Na Figura 13 (sem vazamento), observa-se uma distribuição contínua da resistividade aparente ao longo da bancada. No gráfico, o eixo X representa o comprimento da bancada experimental, enquanto o eixo Y representa a profundidade investigada. Nota-se a presença de um gradiente suave entre as regiões laterais e a porção central, sem a formação de zonas bem delimitadas de baixa resistividade ou contrastes abruptos. Esse comportamento indica uma resposta elétrica compatível com um meio sem perturbações hidráulicas localizadas, em que a distribuição de umidade permanece relativamente uniforme ao longo do domínio experimental.

As variações observadas nas regiões laterais podem estar associadas a efeitos de borda inerentes ao modelo físico finito da bancada experimental, não representando necessariamente alterações no meio poroso.

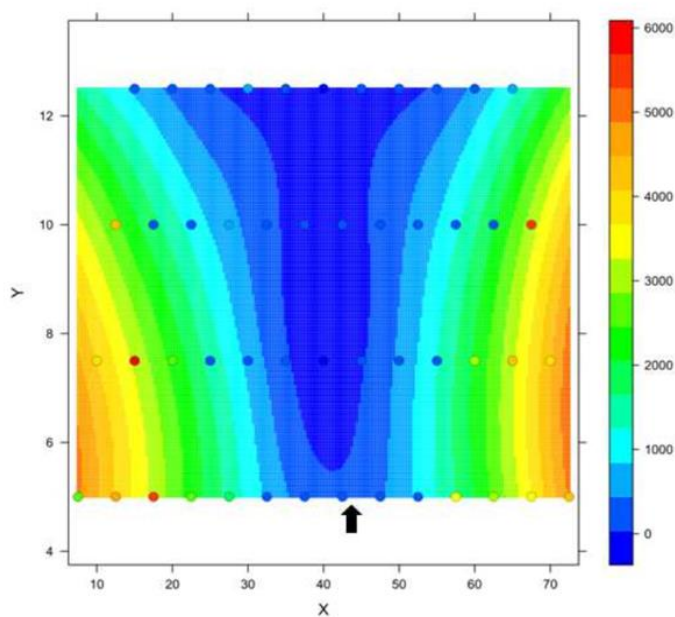
Figura 13: Perfil da coleta sem vazamento - pseudo-seção resistividade aparente



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Em contraste, a Figura 14 (com vazamento) apresenta uma alteração significativa no padrão de distribuição da resistividade aparente. No gráfico, o eixo X representa o comprimento da bancada experimental, enquanto o eixo Y representa a profundidade investigada. Observa-se a formação de uma região contínua de baixa resistividade na porção central da bancada, com desenvolvimento vertical a partir da base do modelo. Essa anomalia coincide com a posição em que o vazamento foi induzido experimentalmente (indicada pela seta), evidenciando a modificação local das propriedades elétricas do meio.

Figura 14: Perfil da coleta com vazamento - pseudo-seção resistividade aparente



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Essa diferença entre os cenários pode ser interpretada a partir da expressão da resistividade aparente, mencionada anteriormente:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

Durante os ensaios, tanto a corrente elétrica quanto o fator geométrico do arranjo permaneceram constantes. Dessa forma, as variações observadas nas pseudo-seções estão associadas às alterações na diferença de potencial (ΔV) provocadas pela modificação das propriedades elétricas do solo. A infiltração de água aumentou a condutividade elétrica do meio na região afetada, reduziu a diferença de potencial medida entre os eletrodos e, conseqüentemente, diminuiu a resistividade aparente (ρ_a) e resultou na anomalia observada na Figura 14.

A comparação entre as duas pseudo-seções evidencia que a bancada experimental foi capaz de distinguir as condições com e sem vazamento. A anomalia de baixa resistividade identificada no Cenário 2 ocorre na mesma posição em que o vazamento foi induzido experimentalmente, demonstrando que a resposta elétrica obtida não apenas indica a presença da alteração, mas também permite sua localização espacial dentro da bancada.

Esse comportamento pode ser interpretado de forma conjunta com os resultados apresentados na Figura 9, que mostra a evolução da voltagem ao longo do tempo para os dois cenários analisados. Enquanto no Cenário 1 os valores se mantêm aproximadamente estáveis durante todo o período de aquisição, no Cenário 2 observa-se uma variação progressiva a partir do início da infiltração de água no sistema. Essa mudança temporal antecede e é coerente com a formação da anomalia espacial observada na Figura 12 indicando que a resposta elétrica da bancada não ocorre de forma isolada, mas como consequência evolutiva do processo de alteração do meio.

Em conjunto, os resultados da Figura 12, Figura 13 e Figura 14, demonstram que a bancada experimental apresenta consistência entre resposta temporal e resposta espacial. Ou seja, o sistema não apenas atestou a alteração provocada pelo vazamento ao longo do tempo, como também é capaz de representar sua distribuição no espaço, permitindo a identificação da região afetada dentro do modelo físico.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a capacidade de uma bancada experimental em escala laboratorial de detectar vazamentos em adutoras de água não pressurizadas por meio da Tomografia de Eletorresistividade (ERT), utilizando a configuração dipolo-dipolo, a partir da análise das variações na resposta geoeétrica do meio.

Os resultados obtidos demonstraram que a bancada experimental desenvolvida foi capaz de diferenciar de forma consistente as condições sem vazamento e com vazamento, evidenciando variações significativas na resposta elétrica do sistema. No cenário sem vazamento, as medições de voltagem mantiveram-se estáveis ao longo do tempo, indicando manutenção das condições iniciais do meio experimental. Já no cenário com vazamento, observou-se uma redução progressiva da voltagem durante todo o experimento, associada à modificação das propriedades elétricas do solo decorrente da infiltração de água.

Essas variações temporais foram complementadas pela análise espacial das pseudo-seções de resistividade aparente, nas quais se observou a formação de uma anomalia de baixa resistividade bem definida no cenário com vazamento. A ausência dessa anomalia no cenário controle reforça que a alteração observada está associada à introdução do vazamento e não às condições iniciais do sistema.

A correspondência entre o comportamento temporal das medições e a distribuição espacial da resistividade evidencia que a bancada experimental não apenas registrou alterações no meio, mas também foi capaz de representar sua evolução e localização dentro do modelo físico. Esse conjunto de evidências atende ao objetivo geral do trabalho, ao demonstrar a aplicabilidade da ERT, na configuração adotada, como ferramenta de detecção de alterações geoeétricas associadas a vazamentos em ambiente controlado.

Em relação aos objetivos específicos, os resultados indicam que a construção da bancada possibilitou a reprodução controlada das condições experimentais propostas. A caracterização do solo, o controle das condições iniciais de umidade e a definição da configuração de aquisição permitiram a realização dos ensaios de forma reprodutível. As medições elétricas obtidas ao longo do tempo e sua representação espacial possibilitaram avaliar o comportamento geoeétrico do sistema nas condições com e sem vazamento, atendendo aos objetivos específicos estabelecidos para o estudo.

No que se refere à justificativa do estudo, os resultados obtidos reforçam a contribuição da bancada experimental como ferramenta de apoio à investigação de métodos de detecção de vazamentos em condições controladas. O sistema desenvolvido permite a análise reprodutível do comportamento elétrico do solo frente à presença de infiltração de água, contribuindo para o desenvolvimento e avaliação de métodos não destrutivos em ambiente experimental, com potencial para subsidiar futuras aplicações em sistemas reais de abastecimento.

Como limitações, destaca-se que os ensaios foram conduzidos em escala reduzida e em ambiente laboratorial controlado, não contemplando todas as variáveis presentes em sistemas reais de distribuição de água. Além disso, os experimentos foram realizados com um único tipo de solo e uma configuração específica de arranjo eletródico dipolo-dipolo, o que restringe a generalização direta dos resultados para diferentes condições geotécnicas e operacionais.

Dessa forma, conclui-se que a Tomografia de Eletorresistividade (ERT), empregada na configuração dipolo-dipolo na bancada experimental desenvolvida, foi capaz de identificar variações na resposta geoelétrica do solo associadas ao vazamento induzido, permitindo diferenciar os cenários analisados e localizar a região afetada. Assim, a pesquisa respondeu afirmativamente à pergunta de pesquisa e atingiu o objetivo geral proposto, demonstrando a aplicabilidade da ERT como ferramenta para a detecção de vazamentos em ambiente experimental controlado.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da investigação por meio da avaliação de diferentes tipos de solo, condições de umidade, profundidades de instalação da tubulação, diâmetros e vazões de vazamento, bem como da utilização de diferentes espaçamentos entre eletrodos e outros arranjos eletródicos, visando analisar a influência desses parâmetros na resolução e na sensibilidade do método da eletorresistividade. Além disso, a realização de ensaios em modelos experimentais de maiores dimensões e em condições de campo poderá contribuir para a validação dos resultados obtidos em laboratório e para o aperfeiçoamento da aplicação da técnica na detecção de vazamentos em sistemas reais de abastecimento de água.

6 REFERÊNCIAS

ABU ELTAYEF, A. et al. **Non-Revenue Water management and GIS-based prioritization of leaks**. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Gestão de perdas de água e balanço hídrico: diretrizes para controle de perdas em sistemas de abastecimento**. Brasília, DF: ANA, 2025.

ARRAIS, K. F.; PAZ, L. A. F. da; CORREIA, S. dos S. M.; LIMA, D. P.; DENES, A. J.; FERNANDES, F. A. da S. **Identificação dos fatores responsáveis pelo aparecimento de fissuras em tubos de ferro fundido nas redes de esgoto em Palmas-TO**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 2, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2016: Solo — Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2016: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16097:2012: Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BELLANOVA, J. et al. **GPR and ERT Investigations in Urban Areas: the Case-Study of Matera (Southern Italy)**. Remote Sensing, v. 12, n. 11, p. 1879, 10 jun. 2020.

CAETANO, Tathiana Rodrigues. **Deteção de vazamentos em adutoras de água por meio de métodos geofísicos**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil, Belo Horizonte, 2019.

CAETANO, Tathiana Rodrigues. **Rastreio de perdas de água em adutoras por meio da eletrorresistividade**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil, Belo Horizonte, 2024.

CATALDO, A. et al. **Time domain reflectometry, ground penetrating radar and**

electrical resistivity tomography: A comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes. 2014.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (BRASIL). **Redução de perdas em sistemas de abastecimento de água.** 2. ed. Brasília: Funasa, 2014.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano.** v. 2. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. **O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, 2007.

GUO, X. et al. **Leakage detection and localization in water distribution systems.** 2020.

JEON, J.; YOON, H. **Electrical resistivity tomography applications in underground infrastructure monitoring.** 2024.

KARADIREK, I. E. URBAN WATER LOSSES MANAGEMENT IN TURKEY: THE LEGISLATION and CHALLENGES. **Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi A - Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik**, v. 17, n. 3, p. 572–584, 3 out. 2016.

LAI, W. L. et al. **Leak detection and soil moisture migration using ground penetrating radar.** 2016.

LIN, B. et al. **Sensor fusion for pipeline leakage detection using Dempster-Shafer theory.** 2021.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics.** 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.

SANGPRASAT, N.; PUTTIWONGRAK, A.; INAZUMI, S. **Soil electrical resistivity variation under moisture conditions.** 2025.

SCUSSEL, O.; BRENNAN, M. J.; ALMEIDA, F. C. L.; MUGGLETON, J. M.; RUSTIGHI, E.; JOSEPH, P. F. **Estimating the spectrum of leak noise in buried plastic water distribution pipes using acoustic or vibration measurements remote from the leak.** Mechanical Systems and Signal Processing, v. 147, p. 107059, 2021.

SCUSSEL, O.; BRENNAN, M. J.; DE ALMEIDA, F. C. L.; IWANAGA, M. K.; MUGGLETON, J. M.; JOSEPH, P. F.; GAO, Y. **Key factors that influence the frequency range of measured leak noise in buried plastic water pipes: theory and experiment. Acoustics.** Anais...MDPI, 2023

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico temático – serviços de água e esgoto: gestão técnica da água.** Brasília: Ministério das Cidades, 2023.

TANG, P.; LU, C.; HU, S.; GUO, Y.; DENG, N.; MO, S. **Mechanical response and failure pressure prediction of cracked PVC-UH buried thin-walled pipes.** Case Studies in Construction Materials, v. 22, e04438, 2025.

THORNTON, J.; STURM, R.; KUNKEL, G. **Water Loss Control.** 2. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2008.

TSO, C.-H. M. et al. **Integrated hydrogeophysical modelling and data assimilation for geoelectrical leak detection.** Journal of Hydrology, 2020.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água.** São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2006.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** v. 1. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

WU, X. et al. **Leakage Detection in Water Distribution Networks Based on Multi-Feature Extraction from High-Frequency Pressure Data.** Water, 2023.

YAN, S.; YUAN, H.; GAO, Y.; JIN, B.; DENG, L.; LI, K. **Extracting acoustic leakage signals in buried pipes.** Journal of Applied Geophysics, v. 209, 2023.

ZENG, W.; GONG, J.; SIMPSON, A. R.; CAZZOLATO, B. S.; ZECCHIN, A. C.; LAMBERT, M. F. **Paired IRF method for detecting leaks in pipe networks.** Journal of Water Resources Planning and Management, v. 146, 2020.