



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

TATHIANA RODRIGUES CAETANO

**Rastreio de perdas de água em adutoras por
meio da eletrorresistividade**

Tese de doutorado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, outubro de 2024

PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Tathiana Rodrigues Caetano

**RASTREIO DE PERDAS DE ÁGUA EM ADUTORAS POR MEIO DA
ELETORRESISTIVIDADE**

Tese de doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Doutorado em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Hersília de Andrade e Santos

Belo Horizonte, outubro de 2024

C128r Caetano, Tathiana Rodrigues
Rastreio de perdas de água em adutoras por meio da eletrorresistividade /
Tathiana Rodrigues Caetano. – 2024.
121 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Hersília de Andrade e Santos.

Bibliografia: f. 104-113.

Tese (doutorado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Vazamento de água – Teses. 2. Detectores de vazamento – Teses.
3. Eletrorretinografia – Teses. 4. Geofísica – Teses. I. Santos, Hersília de
Andrade e. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624.151

ATA DE DEFESA DE TESE

A Banca Examinadora reunida de forma híbrida, presencialmente no prédio 18 do Campus 2 do CEFET-MG e por conferência web via Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), no dia 15 de outubro de 2024, as 08:30, registra que a aluna TATHIANA RODRIGUES CAETANO, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, fez a apresentação de defesa de doutorado intitulada “Rastreamento de perdas de água em adutoras por meio da eletrorresistividade” como parte dos requisitos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG para obtenção do título de “Doutora em Engenharia Civil”.

A apresentação teve início às 8:30 horas e término às 11:00. A candidata foi submetida à apresentação oral e arguição por todos os membros da Banca Examinadora, que, ao assinarem, declaram ter assistido e participado integralmente da defesa e que consideram a proposta de qualificação:

☒ APROVADO

☐ APROVADO COM CORREÇÕES

☐ REPROVADO

Observações

Adequar o documento de acordo com as sugestões apresentadas pela banca.

Se necessário, usar folha adicional, assinada pelos membros da banca examinadora

A Ata foi lavrada por mim, Prof. Hersília de Andrade e Santos, Presidente da Banca Examinadora, que, lida e aprovada, segue assinada (digital ou presencialmente) por todos os membros.

Banca examinadora

Nome	Assinatura
Profa. Hersília de Andrade e Santos –Presidente	
Prof. Remke Leander Van Dam (co-orientador) –CEFET-MG	
Prof. Rogerio Cabral de Azevedo– CEFET-MG	
Prof. Carlos Barreira Martinez - UNIFEI	
Prof. Vagner Roberto Elis - USP	

OBSERVAÇÃO: No caso de APROVAÇÃO COM CORREÇÕES, preencher a continuidade da ata (Anexo I).

Ciente

Coordenador do Curso



USPAssina - Autenticação digital de documentos da USP

Registro de assinatura(s) eletrônica(s)

Este documento foi assinado de forma eletrônica pelos seguintes participantes e sua autenticidade pode ser verificada através do código NPIJ-1QXF-H966-6JIX no seguinte link: <https://portalservicos.usp.br/iddigital/NPIJ-1QXF-H966-6JIX>

Vagner Roberto Elis

Nº USP: 1929522

Data: 22/10/2024 20:18



ATA DE DEFESA DE TESE Nº 45/2024 - PPGEC (11.52.06)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 11/11/2024 14:46)

PETER LUDVIG
COORDENADOR - TITULAR
PPGEC (11.52.06)
Matrícula: ###848#9

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 45, ano: 2024, tipo:
ATA DE DEFESA DE TESE, data de emissão: 07/11/2024 e o código de verificação: **f77be9e513**

AGRADECIMENTOS

Para desenvolver um trabalho é necessária uma rede de apoio, que vai desde ajuda prática, nos laboratórios, conseguindo material ou esclarecendo dúvidas que surgem no meio do caminho, ou ajuda moral, aquela que não te deixa desistir e te coloca pra cima quando acha que nada vai dar certo. Assim, reservo esta parte do trabalho para agradecer a todos que ajudaram no desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família, por todo o apoio durante todo o tempo. Ao meu pai Antônio Carlos Caetano, minha mãe Iracilda Rodrigues Caetano, avó Maria Therezinha de Jesus e irmão Gustavo Henrique Rodrigues Caetano. Meu muito obrigada.

Ao Fabrício por me aguentar e sanar minhas dúvidas, quando eu achava que não estava fazendo as coisas corretamente.

Aos meus amigos, Pablo, Camila, Marina e Fernanda. Vocês são pessoas que o CEFET me deu e que vou levar pra toda vida.

À Hersília de Andrade e Santos, minha orientadora, obrigada por todos esses anos de aprendizado.

Às alunas de IC que me ajudaram em várias etapas no decorrer deste trabalho, Arielle, Bruna, Ana Beatriz e Carolina.

À professora Jussara Provenzani de Almeida, pela ajuda com o solo para a realização dos experimentos em bancada.

Aos técnicos de laboratório Ivan Batista Moraes, Lucas Thadeu da Silva Ramos e André Barroso Mourão, pelo apoio no decorrer dos ensaios laboratoriais.

Aos professores que me ajudaram no decorrer do percurso, Rogério Cabral de Azevedo e Rachel Jardim Martini.

Além disso, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.", da FAPEMIG por meio do projeto de pesquisa TEC - RDP-00186-10 e APQ-01145-15, e do CNPq por meio do projeto de pesquisa 456390/2014-6. Assim, obrigada às agências de fomento e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

EPÍGRAFE

É hora de dar tchau!
(*Teletubbies*)

RESUMO

O Brasil vem sofrendo com a escassez de água apesar de ser detentor de uma porcentagem considerável da água doce disponível no mundo. Para solucionar este problema, diversas medidas são estudadas, incluindo formas de melhoria dos sistemas de abastecimento de água. Estes sistemas são passíveis de perdas por vazamentos, e estas existem em todos os países do mundo. Na Dinamarca a perda de água é cerca de 7%, no Reino Unido, 20%, na África do Sul, 35%, na Itália e em Portugal, 36%, e no Brasil a perda de água é de aproximadamente 39% do total da água tratada no país. O foco do presente estudo foi analisar como os métodos geofísicos, em especial a eletrorresistividade (ERT), podem auxiliar a identificar vazamentos, ajudando a mitigar problemas relacionados a perda de água em adutoras. A ERT é um método geofísico que mede a resistividade elétrica do meio percorrido por uma corrente elétrica. Para isto, o equipamento conta com eletrodos que emitem a corrente elétrica e que permitem a medição do potencial elétrico (DV). A presente proposta realizou a aplicação de técnica de ERT em dois formatos: (1) a primeira em condições tradicionalmente utilizadas para identificar problemas na subsuperfície, ou seja, com eletrodos no solo próximo a tubulação com vazamento (tradicional) e (2) a segunda, em condições normalmente não aplicadas para este tipo de problema, com os eletrodos de corrente colocados dentro da tubulação (novo). Para tanto foram realizadas análises em campo e laboratório, bem como um estudo de revisão sistemática da literatura. Este trabalho sustentou como hipótese principal que a condução da corrente elétrica na água, dentro da tubulação, fornece um campo elétrico mais direcionado ao local do vazamento, o que tornará o segundo método mais preciso que o primeiro. Assim, foram perguntas de pesquisa dessa tese: (1) Os problemas relacionados a vazamentos em tubulações de água tratada internacionalmente são os mesmos que ocorrem no Brasil? (2) Quais são as técnicas de rastreamento de vazamentos aplicados internacionalmente e no Brasil? (3) Existe alguma relação entre os problemas de vazamento em tubulações de água tratada e o funcionamento hidráulico das mesmas bem como seus materiais de construção? (4) Qual a acurácia da ERT na identificação de vazamentos de adutoras de água? (5) A acurácia alcançada é comparável com outras técnicas geofísicas que podem ser aplicadas à vazamento em tubulações? (6) A aplicação do ERT no novo formato fornecer melhor acurácia que formato usual em situações laboratoriais em tubos preenchidos com carga hídrica estática? Como principais respostas tem-se que: (1) Existem diferentes questões relacionadas a vazamentos em diferentes partes do mundo, principalmente considerando formas funcionamento de tubulações; (2) As técnicas mais aplicadas para detecção de vazamentos são acústicas; (3) Existem relações entre as técnicas de detecção de vazamentos, materiais das tubulações e funcionamento hidráulico dos sistemas; (4) A acurácia dos resultados depende de fatores ambientais (umidade do solo e granulometria) e da duração associada a cada vazamento. No estudo em campo, foram identificadas zonas de vazamento com larguras de 6 a 15 m e profundidades de até 2,5 m; (5) As acurácias obtidas foram comparáveis a técnicas de GPR; (6) O cenário novo forneceu resultados mais precisos em laboratório na ordem de 70% dos valores medianos na determinação dos vazamentos. Acredita-se que a pesquisa aqui apresentada irá contribuir significativamente para o desenvolvimento de metodologias avançadas de detecção de vazamentos, proporcionando ferramentas mais eficazes e sustentáveis para enfrentar os desafios contemporâneos na gestão de redes de distribuição de água.

Palavras-chave: Vazamentos de água. Detecção de vazamentos. Geofísica aplicada. ERT.

ABSTRACT

Brazil has been suffering from water scarcity despite holding a considerable percentage of the world's available freshwater. To address this issue, various measures are being studied, including improvements to water supply systems. These systems are prone to losses due to leaks, and such leaks exist in all countries around the world. In Denmark, water loss is about 7%, in the United Kingdom, 20%, in South Africa, 35%, in Italy and Portugal, 36%, and in Brazil, water loss is approximately 39% of the total treated water in the country. The focus of this study was to analyze how geophysical methods, especially electrical resistivity tomography (ERT), can help identify leaks, aiding in the mitigation of water loss problems in pipelines. ERT is a geophysical method that measures the electrical resistivity of a medium traversed by an electric current. To achieve this, the equipment uses electrodes that emit the electric current and allow the measurement of the electrical potential (DV). This study applied the ERT technique in two formats: (1) the first in conditions traditionally used to identify subsurface problems, i.e., with electrodes on the ground near the leaking pipeline (traditional), and (2) the second, in conditions not typically applied to this type of problem, with current electrodes placed inside the pipeline (new). Field and laboratory analyses were conducted, as well as a systematic literature review. The main hypothesis of this work was that conducting electric current in water inside the pipeline provides a more directed electric field to the location of the leak, making the second method more accurate than the first. Thus, the research questions of this thesis were: (1) Are the issues related to leaks in treated water pipelines internationally the same as those occurring in Brazil? (2) What are the leak detection techniques applied internationally and in Brazil? (3) Is there any relationship between leak problems in treated water pipelines and their hydraulic operation as well as their construction materials? (4) What is the accuracy of ERT in identifying leaks in water pipelines? (5) Is the accuracy achieved comparable to other geophysical techniques that can be applied to pipeline leaks? (6) Does the application of ERT in the new format provide better accuracy than the usual format in laboratory situations with pipes filled with static water load? The main findings are: (1) There are different issues related to leaks in various parts of the world, primarily considering pipeline operation; (2) The most commonly applied techniques for leak detection are acoustic; (3) There are relationships between leak detection techniques, pipeline materials, and hydraulic system operation; (4) The accuracy of the results depends on environmental factors (soil moisture and granulometry) and the duration associated with each leak. In the field study, leak zones were identified with widths ranging from 6 to 15 meters and depths of up to 2.5 meters; (5) The accuracies obtained were comparable to Ground Penetrating Radar (GPR) techniques; (6) The new scenario provided more accurate results in the laboratory, with accuracy around 70% of median values in leak detection. It is believed that the research presented here will significantly contribute to the development of advanced leak detection methodologies, providing more effective and sustainable tools to address contemporary challenges in water distribution network management.

Keywords: Water leaks. Detection of leaks. Applied geophysics. ERT.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
SUMÁRIO	3
1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivo geral.....	13
1.1.2. Objetivos específicos	13
1.2. ESTRUTURAÇÃO DA TESE	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. Sistemas de abastecimento de água	15
2.2. Perdas de água em tubulações.....	17
2.3. Métodos Geofísicos.....	21
2.3.1. Eletrorresistividade - ERT	22
2.3.2. Arranjo de eletrodos	25
2.3.3. Ground Penetrating Radar – GPR	28
2.4. Detecção de vazamentos de água em tubulações por meio de métodos geofísicos - Estado da Arte.....	29
3 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	31
3.1. Classificação da Pesquisa.....	31
3.2. Método dos procedimentos	31
3.2.1. Revisão Sistemática da Literatura	33
3.2.2. Técnica utilizada	34
3.2.3. Local de estudo e Visitas em campo	34
3.2.4. Ensaios em Laboratório – Experimento de bancada	35
3.2.5. Análise do solo	39
3.2.6. Análise de dados	40
4 ARTIGO 1 - Identificação de vazamentos em tubulações de concreto não pressurizadas pelo uso de métodos geofísicos	41
5 ARTIGO 2 - Métodos geofísicos: Eficiência e abrangência na identificação de vazamentos	61
6 ARTIGO 3 - Identificação de vazamentos em tubulações de concreto não pressurizadas pelo uso da eletrorresistividade.....	79
7 CONCLUSÕES DA TESE	101
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
9 REFERÊNCIAS	104
APÊNDICE A.....	114

APÊNDICE B.....	121
-----------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema típico de um sistema de abastecimento de água -----	15
Figura 2.2 - Diagnóstico do Abastecimento de Água Urbano. Os municípios em azul possuem abastecimento satisfatório, em amarelo, os que necessitam de ampliação do sistema e de vermelho aqueles que possuem baixa garantia hídrica. -----	16
Figura 2.3 - Tipos de vazamentos. O A indica o tempo gasto para se ter consciência da existência do vazamento, o L, o tempo para sua localização e o R o tempo para o reparo. O eixo y, indicado pelo número 0, zero, indica o quanto de água é perdida com o vazamento.-----	19
Figura 2.4 - Perda de água nos países europeus. Os códigos utilizados para a representação dos países são, respectivamente, AT Áustria, BE Bélgica, BG Bulgária, CH Suíça, CY Chipre, CZ República Tcheca, DE Alemanha, DK Dinamarca, EE Estônia, EL Grécia, ES Espanha, FI Finlândia, FR França, HU Hungria, HR Croácia, IE Irlanda, IT Itália, LU Luxemburgo, MT Malta, NL Holanda, NO Noruega, PL Polónia, PT Portugal, RO Romênia, RS Sérvia, SE Suécia SI Eslovênia, SK Eslováquia, UK Reino Unido, EUR* membros do EurEau. O boxplot apresenta a média e a mediana dos valores de perda de água destes países. -----	21
Figura 2.5 - Variação da resistividade de acordo com a valiação a) da umidade; b) da temperatura; e c) da salinidade -----	25
Figura 2.6 - Diagramas esquemáticos de diferentes arranjos de eletrodos e os seus padrões de sensibilidade para levantamentos de resistividade 2D. Na figura, C ₁ e C ₂ são os eletrodos de corrente positivo e negativo, respectivamente. P ₁ e P ₂ são dois eletrodos de potencial. As letras a e n são os parâmetros que controlam o espaçamento e o espaçamento máximo dos arranjos. Os padrões de sensibilidade mostrados são apenas um exemplo de cada uma das combinações indicadas, e nestes padrões, as cores quentes e o sinal positivo representam a região onde o modelo terá maior resolução, já as cores frias e o sinal negativo indicam onde a resolução será menor.-----	26
Figura 2.7 - Esquema do arranjo Dipolo-Dipolo -----	27
Figura 2.8 - Esquema do arranjo Polo-Dipolo-----	27
Figura 3.1 - Delineamento metodológico da pesquisa-----	31
Figura 3.2 - Fluxograma das etapas do trabalho-----	32
Figura 3.3 - Esquema da disposição dos eletrodos no método novo-----	34

Figura 3.4 - Exemplos de vazamentos encontrados no trecho da adutora do Sistema Produtor do Rio das Velhas (Minas Gerais). V0, V1 e V2 indicam pontos de vazamentos localizados previamente pela companhia de saneamento. -----	35
Figura 3.5 Esquema do experimento de bancada a ser construído em laboratório --	36
Figura 3.6 - Rolo usado para compactar o solo -----	37
Figura 3.7 Esquema do aparato experimental para manutenção das condições hidráulicas dentro da tubulação.-----	38
Figura 4.1 Localização do local do estudo e pontos de vazamento V0, V1 e V2.-----	45
Figura 4.2 - Aquisição de dados geofísicos usando (a) equipamento ERT e (b) GPR em locais de vazamento V1 e V2, respectivamente. As linhas pretas correspondem aos perfis ERT e GPR.-----	46
Figura 4.3 - Perfis de GPR e resistividade elétrica, (a) em V0, (b) em V1 e (c) em V2. As setas indicam o local do vazamento. -----	47
Figura 4.4 Correlação de Pearson para os dados do campo de resistividade elétrica V0, onde K é o fator geométrico. -----	52
Figura 4.5 (a) Seção de pseudopropriedade de resistividade aparente coletada em V0 para a coleção principal. (b) Seção de pseudopropriedade de resistividade recíproca aparente coletada em V0.-----	53
Figura 4.6 Resultados geofísicos para o ponto de vazamento V1: (a) Seção do modelo de resistividade com áreas de baixa resistividade indicadas por círculos pretos tracejados. A resistividade mais baixa foi considerada como sendo aproximadamente 35 a 90 Ω .m. O espaçamento do eletrodo unitário foi de 0,5 m; (b) Radargrama obtido com antenas de 200 MHz, com a área de atenuação de sinal aumentada marcada por um retângulo tracejado. A seta preta representa um vazamento previamente localizado por meio de inspeção visual. A linha laranja está relacionada a camadas provavelmente com diferenças na compactação do solo ou composição do material. A linha verde indicou duas hipérboles. -----	54
Figura 4.7 Resultados geofísicos para o ponto de vazamento V2: (a) Seção do modelo de resistividade, com áreas de baixa resistividade sendo indicadas por círculos pontilhados pretos. A resistividade mais baixa foi considerada como sendo aproximadamente 5 a 60 Ω .m. O espaçamento do eletrodo unitário foi de 1 m; (b) Radargrama obtido com antenas de 200 MHz, com retângulos tracejados pretos indicando áreas de maior atenuação do sinal. O retângulo tracejado em vermelho indica o local onde colocamos galhos para cruzar uma área de água parada. A seta	

preta representa o vazamento localizado anteriormente. A linha laranja está relacionada a camadas provavelmente com diferenças na compactação do solo ou na composição do material. -----	55
Figura 4.8 Distribuição granulométrica dos solos coletados nos pontos V1 e V2, obtida por ensaio de granulometria e granulometria a laser em analisador CILAS 1090 (condições de medição: modo seco; potência ultrassônica, 50 W; obscurecimento , 5%; difração a laser baseada nas teorias de espalhamento de Fraunhofer). -----	57
Figura 5.1 - Quantidade de artigos analisados por ano de sua publicação -----	71
Figura 5.2 Material da tubulação analisada nos artigos. -----	72
Figura 5.3 Funcionamento hidráulico da tubulação analisada nos artigos. -----	72
Figura 5.4 Método de detecção de vazamento utilizado nos artigos. -----	73
Figura 5.5 Análises realizadas nos artigos. -----	74
Figura 5.6 Revistas nas quais os artigos da base de dados analisada foram publicados -----	75
Figura 5.7 Relação entre as palavras-chave presente no banco de dados -----	76
Figura 5.8 Análise F.O.F.A. realizada para o uso de métodos geofísicos na detecção de vazamentos em tubulações -----	78
Figura 6.1 Esquema do experimento de bancada construído em laboratório -----	82
Figura 6.2 - Rolo usado para compactar o solo -----	83
Figura 6.3 - Primeira camada de solo colocada na caixa com detalhe para a fita métrica fixada em uma de suas paredes. -----	83
Figura 6.4 - Medição da umidade do solo sendo realizada -----	84
Figura 6.5 - Aparato experimental para manutenção das condições hidráulicas dentro da tubulação. (a) Esquema de montagem; (b) Foto do aparato montado. -----	84
Figura 6.6 - Exemplo de como foi realizada a medição nos gráficos de média e mediana a) para as medições no método tradicional; b) para as medições no método novo. As setas pretas indicam os como foram feitas as medições dos valores das médias e medianas. -----	88
Figura 6.7 - Análise granulométrica do solo utilizado no experimento -----	89
Figura 6.8 - Resultado da medição de voltagem no método tradicional sem vazamento. O erro obtido em nas medições variou de 0,2% a 1,2%. -----	89
Figura 6.9 - Resultado da medição de voltagem no método tradicional com vazamento. O erro obtido em nas medições variou de 0,3% a 0,9%. -----	90

Figura 6.10 - Resultado da medição de voltagem no método novo com vazamento. O erro obtido em todas as medições foi de 25,5%. -----	91
Figura 6.11 – Detalhe do resultado da medição de voltagem no método novo com eletrodo centralizado e com vazamento. -----	91
Figura 6.12 - Valores de voltagem por unidade para o método tradicional sem vazamento juntamente com a regressão linear destes valores. -----	92
Figura 6.13 - Valores de voltagem por unidade para o método tradicional com vazamento juntamente com a regressão linear destes valores. -----	92
Figura 6.14 - Valores de voltagem por unidade para o método novo com vazamento juntamente com a regressão linear destes valores. -----	93
Figura 6.15 – Perfil da coleta sem vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos centralizados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em nas medições variou de 0,2% a 25,5%. -----	94
Figura 6.16 – Perfil da coleta sem vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos deslocados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em nas medições variou de 0,3% a 25,5%. -----	94
Figura 6.17 – Perfil da coleta com vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos centralizados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos. A seta preta representa o local do vazamento; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em nas medições variou de 0,2% a 25,5%. -----	95
Figura 6.18 – Perfil da coleta com vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos deslocados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos. A seta preta representa o local do vazamento; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em nas medições variou de 0,4% a 25,5%. -----	95
Figura 6.19 – Perfil da coleta com vazamento utilizando o método novo e os eletrodos centralizados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos. A seta preta representa o local do	

vazamento; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em todas as medições foi de 25,5%.-----96

Figura 6.20 – Perfil da coleta com vazamento utilizando o método novo e os eletrodos deslocados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos. A seta preta representa o local do vazamento; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em todas as medições foi de 25,5%.-----96

Figura 6.21 - Boxplot dos valores máximos de X e Y para os gráficos da média e mediana -----97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Caracterização geral das perdas.....	18
Tabela 2.2 - Causa dos vazamentos	18
Tabela 2.3 - Métodos Geofísicos.....	22
Tabela 3.1 - Eixos de pesquisa e palavras-chave utilizados para a realização da revisão sistemática da literatura da tese.....	33
Tabela 3.2 Cenários analisados	38
Tabela 3.3 Resumo dos parâmetros utilizados.....	39
Tabela 4.1 - Coletas de campo realizadas, com suas respectivas datas.	46
Tabela 4.2 - Configurações usadas para coleta de dados com GPR	49
Tabela 4.3 - Teor de umidade dos solos coletados em V1 e V2V2	56
Tabela 4.4 - Configurações usadas para a coleta dos dados com ERT	60
Tabela 5.1 - Eixos de pesquisa e palavras-chave utilizados para a realização da revisão sistemática da literatura da tese.....	63
Tabela 5.2 - Artigo selecionados para compor a base de dados analisada.....	64
Tabela 6.1 Cenários analisados	85
Tabela 6.2 Resumo dos parâmetros utilizados.....	86
Tabela 6.3 - Resumo dos valores obtidos nas regressões lineares realizadas	93
Tabela 6.4 - Valores máximos de X e Y para os gráficos de média e mediana em centímetros.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
AAT	Adutora de Água Tratada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
ETA	Estação de Tratamento de Água
ERT	<i>Electrical Resistivity Tomography</i> (Tomografia Elétrica)
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i> (Radar de Penetração no Solo)
JCR	<i>Journal Citation Reports</i>
m	Metro
m ²	Metro quadrado
mA	Miliampère
MASW	<i>Multi-channel Analysis of Surface Waves</i> (Análise Multicanal de Ondas de Superfície)
mV	Milivolts
PEP	Perfilagem Elétrica de Poços
PV	Poço de Visita
PVC	Policloreto de Polivinila
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i> (Erro Quadrático Médio)
s	Segundo
S	Siemens
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SPRV	Sistema Produtor do Rio das Velhas
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i> (Reflectometria no Domínio do Tempo)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
V	Volts

LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{A}$	Vetor área
σ	Condutividade elétrica (S/m)
I	Corrente elétrica (mA)
$\vec{J}$	Densidade de corrente de condução (A/m ²)
ΔV	Diferença de potencial (mV)
K	Fator geométrico que depende da configuração de eletrodos
$\vec{E}$	Intensidade do campo elétrico (V/m)
η	Viscosidade cinemática
Ω	Ohm
∇^2	Laplaciano
R	Resistência elétrica (Ω)
p	pressão
ρ	Resistividade elétrica ($\Omega.m$)
ρ_a	Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$)
ρ^*	Massa específica
$\vec{v}$	Vetor velocidade
W	Teor de umidade

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de abastecimento de água é o conjunto de obras, equipamentos e serviços que visam a disponibilização de água potável para a população de determinado local. Ele usualmente é planejado de forma a se captar a água de um manancial (superficial ou subterrâneo), trata-la em uma estação de tratamento de água (ETA) e posteriormente distribuir a água tratada para a população. As tubulações destes sistemas devem atender alguns aspectos durante seu funcionamento, como por exemplo, serem capazes de manter a qualidade da água, ser capaz de transportar a quantidade de água necessária para o abastecimento e resistir a esforços tanto internos quanto externos (TSUTIYA, 2006). Assim, os principais materiais utilizados nessas tubulações são aço, ferro fundido, materiais plásticos (PVC, Poliéster reforçado com fibra de vidro, etc.) e concreto (HELLER; PÁDUA, 2010; TSUTIYA, 2006).

Os sistemas de abastecimento são dimensionados para o fornecimento constante de água em quantidade suficiente às demandas dos usuários e com pressão hidrostática e qualidade de água em valores mínimos estabelecidos por legislações locais. Dessa forma, uma vez que alguns de seus componentes individuais (por exemplo, tubos, válvulas ou bombas) podem falhar, os sistemas de distribuição de água são projetados com margem em termos de quantidade, qualidade e pressão de água para seu funcionamento adequado, mesmo em caso de comprometimento de algum componente individual (MAYS, 1996).

As perdas totais de água correspondem à diferença entre o volume total de água produzido nas ETA e à soma dos volumes recebidos nas residências (e medidos por equipamentos chamados hidrômetros). Essas perdas, podem ser classificadas como reais ou aparentes. A perda aparente é toda água que não é medida, seja por ligação clandestina, erros de medição etc. Por sua vez, a perda real é uma perda física ocasionada por vazamentos ou transbordamentos existentes nas estruturas que compõem o sistema de abastecimento de água (GONÇALVES; ALVIM, 2007). Estima-se que mundialmente a perda total entre as estações de tratamento e os consumidores finais tipicamente varia entre 20 e 30% da produção (HUNAIDI et al., 2000). Em algumas partes do Brasil, as perdas de água nos sistemas de distribuição de água podem chegar a 40% do volume coletado (KARADIREK, 2016), e são comuns até em países europeus onde, em média, 25% da água tratada não chega ao consumidor final

(THE EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL WATER SERVICES (EUREAU), 2021). A perda de água ocorre em praticamente todos os sistemas de distribuição e o volume da perda depende das características da rede de dutos, do nível de tecnologia e do conhecimento aplicado para o controle de vazamentos (FARLEY; TROW, 2003).

É impossível, portanto, que as perdas reais sejam eliminadas completamente. No entanto, elas podem e devem ser administradas de forma que fiquem dentro dos limites econômicos (THORNTON et al., 2008), sendo esse um dos maiores desafios no gerenciamento de sistemas de água mundialmente. Portanto, a localização de vazamentos em tubos subterrâneos é uma das etapas cruciais para a otimização do uso de recursos hídricos, pois o vazamento geralmente é o maior componente de perda de distribuição (CATALDO et al., 2017b).

Neste trabalho, o conceito de vazamento utilizado será o de abertura ou local, por onde a água escorre ou vaza. Diversos tipos de vazamentos (inerentes, visíveis e não visíveis) podem ocorrer em tubulações, e por isso, existem também diversas formas de detectar e analisar cada tipo de vazamento (SANDBERG et al., 1989).

Os avanços nas pesquisas de detecção de vazamentos cresceram notavelmente, principalmente após os anos 2000. A partir desta data, houve o aumento da conscientização da importância da conservação e escassez dos recursos hídricos, além do surgimento de novas tecnologias que são capazes de facilitar e automatizar o processo de detecção de vazamentos. Existem, portanto, diversas formas de detecção de vazamentos em tubulações, que vão desde a utilização de traçadores, equipamentos acústicos e eletromagnéticos até o balanço de massa e volume na rede e observação da vegetação presente na região onde as tubulações estão assentadas (EL-ZAHAB; ZAYED, 2019).

Os métodos geofísicos e outros métodos não invasivos podem contribuir para o mapeamento do solo e mesmo a interação solo-tubulação em problemas de vazamentos. Entre os métodos não invasivos, a utilização de sinais acústicos é o procedimento mais aplicado para a detecção destes problemas (COLOMBO et al., 2009; HUNAIDI; WANG, 2006) e baseiam-se na propagação de ondas mecânicas. À semelhança de outras técnicas, o desempenho dos métodos acústicos depende do material e do diâmetro dos tubos. Este método é recomendado para tubulações pressurizadas, aquelas onde o tubo é inteiramente preenchido pela água e a pressão é maior do que a atmosfera (CATALDO et al., 2014a). Quando as tubulações possuem baixa pressão ou não são pressurizadas, como é o caso das tubulações construídas

em concreto, as detecções de vazamentos são mais difíceis de serem realizadas por meio de métodos acústicos e por balanço de pressão (PUUST et al., 2010).

De acordo com a revisão realizada por El-Zahab e Zayed (2019) mais de 50% da detecção de vazamentos de água dependem de hardware baseado em acústica ou em pressão. Ou seja, existe uma lacuna na detecção de vazamentos onde a pressão atuante é a atmosférica, quando não é possível a utilização dos métodos mais usuais (métodos acústicos e de medição de pressão).

As adutoras, canalizações que conduzem a água para as unidades que precedem a rede de distribuição, podem ser classificadas quanto a natureza da água transportada (bruta ou tratada), e quanto à energia para a movimentação da água (por gravidade, por recalque ou mistas) (TSUTIYA, 2006). Este trabalho é focado na detecção de vazamentos em adutoras de água tratada (tubulações que transportam a água da ETA até os reservatórios elevados para a posterior distribuição à população), que funcionam por gravidade, ou seja, aquelas onde a pressão atuante dentro da tubulação é a pressão atmosférica (HELLER; PÁDUA, 2010).

Para tanto, pretende-se empregar o método geofísico da eletrorresistividade (ERT). Tal método obtém, de forma não intrusiva, informações da subsuperfície analisada a partir da injeção de corrente elétrica no solo (SAMOUËLIAN et al., 2005). As limitações desta técnica são: 1) as anomalias de presença no subsolo podem levar a uma má interpretação dos dados e 2) a necessidade de conhecimento prévio da condutividade elétrica das tubulações (CATALDO et al., 2014a). Contudo, a ERT raramente é influenciada pelo tráfego ou ruídos acústicos e as medições da subsuperfície para detectar vazamentos em tubos enterrados são uma alternativa interessante porque é menos dispendiosa do que os métodos baseados na amostragem do solo e métodos sísmicos, como a tomografia de poço (*borehole tomography*) (JORDANA et al., 2001).

A ERT consiste na injeção de corrente elétrica no solo e na medição das diferenças potenciais resultantes. Para tanto, são utilizados quatro eletrodos, dois deles utilizados para a injeção da corrente elétrica (eletrodos de corrente), e dois para medir a diferença de potencial (eletrodos de potencial) decorrente desta injeção de corrente. Essas diferenças de potencial fornecem informações sobre as propriedades da subsuperfície, que, neste trabalho, serão associadas à presença de vazamentos de água (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Existem diferentes arranjos dos eletrodos para aplicação da técnica da ERT em caracterização da subsuperfície. O arranjo dipolo-dipolo pode ser utilizado na caracterização de áreas sob efeito de vazamentos e suas principais vantagens estão relacionadas à sua simetria, além da sua boa resolução lateral (GANDOLFO; GALLAS, 2007). Ressalta que aplicação desse arranjo já ocorre em determinadas situações de perda de fluido (JORDANA et al., 2001). Entretanto, a aplicação de tal disposição carece de maior compreensão a respeito da sua precisão na localização do vazamento de água. Ressalta-se que existem vários métodos para detectar vazamentos em tubulações (SANDBERG et al., 1989), sendo a maioria centrada na quantificação da perda sem se concentrar na localização do vazamento (PUUST et al., 2010).

De maneira a tentar identificar os locais passíveis de perdas em tubulações de grande diâmetro (adutoras), o presente trabalho pretende analisar criticamente, por meio de uma revisão sistemática da literatura, a aplicação de métodos geofísicos na detecção de vazamentos em tubulações de água. Em termos de precisão, um novo arranjo do ERT poderá fornecer valores mais precisos. Essa aplicação consiste em inserir o eletrodo de corrente dentro da tubulação de água, enquanto o par de eletrodos de corrente estarão na superfície. Tal configuração apresentou resultado superior em termos de sensibilidade do que a aplicação convencional, ou seja, a com eletrodos alinhados no solo, em membranas geossintéticas no estudo foi realizado por Binley e Daily (2003). Uma comparação da precisão entre as duas formas de aplicação do ERT para localização de vazamentos em adutoras de grandes diâmetros e em concreto é, portanto, algo inédito internacionalmente.

Dessa forma, considerando as lacunas científicas mencionadas acima, essa pesquisa pretende responder as seguintes perguntas: (1) Os problemas relacionados a vazamentos em tubulações de água tratada internacionalmente são os mesmos que ocorrem no Brasil? (2) Quais são as técnicas de rastreamento de vazamentos aplicados internacionalmente e no Brasil? (3) Existe alguma relação entre os problemas de vazamento em tubulações de água tratada e o funcionamento hidráulico das mesmas bem como seus materiais de construção? (4) Qual a precisão da ERT na identificação de vazamentos de adutoras de água? (5) A precisão alcançada é comparável com outras técnicas geofísicas que podem ser aplicadas à vazamento em tubulações? (6) A aplicação do ERT no novo formato fornecer melhor precisão que formato usual para diferentes condições de solo, localização do vazamento e formato

de tubulação, em situações laboratoriais em tubos preenchidos com carga hídrica estática?

Assim, as respostas para as perguntas da pesquisa serão alcançadas a partir da revisão sistemática da literatura, experimentação laboratorial e da coleta de dados em campo. A hipótese levantada é que a eletrorresistividade aplicada de maneira não convencional (com um eletrodo dentro da tubulação que possui vazamento) é diferente e fornece resultados mais precisos, quando comparada ao método ERT convencional, para identificação do posicionamento dos vazamentos em tubulações de grandes diâmetros e não pressurizadas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Analisar a aplicação de métodos geofísicos, em especial da eletrorresistividade, na detecção de vazamentos em tubulações não pressurizadas de grandes diâmetros, com o foco em regiões de grande desperdício de água.

1.1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Revisar sistematicamente quais são os problemas relacionados a vazamentos em tubulações de água tratada internacionalmente e no Brasil;
- Revisar sistematicamente quais são as técnicas de rastreamento de vazamentos aplicados internacionalmente e no Brasil;
- Relacionar os problemas de vazamento em tubulações de água tratada e o funcionamento hidráulico das mesmas;
- Relacionar os problemas de vazamento em tubulações de água tratada e os materiais utilizados na construção dessas tubulações;
- Analisar a precisão da ERT na identificação de vazamentos de adutoras de água;
- Verificar se precisão do ERT é comparável com outras técnicas geofísicas que podem ser aplicadas à vazamento em tubulações;
- Verificar se a precisão do método proposto é melhor do que a do formato usual em escala laboratorial.

1.2. ESTRUTURAÇÃO DA TESE

O trabalho está dividido em quatro capítulos. No primeiro capítulo foi apresentada uma breve introdução sobre o tema, bem como sua relevância e justificativa, os objetivos, geral e específico, e as contribuições inovadoras deste trabalho.

No capítulo 2 tem-se a revisão teórica do tema estudado. Nele são descritos os principais conceitos e informações importantes para o entendimento do que será realizado no decorrer da pesquisa. Dessa forma, o capítulo que é dividido em subitens, tratará de temas como o sistema de abastecimento de água, em especial os vazamentos existentes nas tubulações destinadas a este fim; os métodos geofísicos estudados para a detecção destes vazamentos, onde será focado a eletrorresistividade.

No capítulo 3 será apresentada a metodologia do trabalho. Assim, tem-se os métodos de abordagem e procedimentos adotados, bem como a descrição do local de estudo, e como serão realizadas as coletas de dados e suas análises.

Os próximos capítulos são um artigo diferente, resultados desta pesquisa. No capítulo 4 é apresentado o artigo já publicado ao *Journal of Applied Geophysics*, que trata da precisão dos métodos geofísicos na detecção de vazamentos de água em tubulações de concreto não pressurizadas. O capítulo 5 contém o segundo artigo, que aborda a eficiência e abrangência na identificação de vazamentos. Este artigo refere-se de uma revisão sistemática sobre o tema abordado.

O capítulo 6 é apresentado o último artigo de resultado da tese. Ele contém os resultados dos experimentos em laboratório comparando os dois métodos. Por fim, no capítulo 7 tem-se a conclusão da tese bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sistemas de abastecimento de água

Os sistemas de abastecimento de água podem ser projetados de diversas formas e ser um sistema isolado ou integrado, mas de maneira geral, é composto por: captação, adução, tratamento, reservação e distribuição (figura 2.1). O que determina o porte destes sistemas é o tamanho da população que será atendida (HELLER; PÁDUA, 2010; TSUTIYA, 2006).



Figura 2.1 - Esquema típico de um sistema de abastecimento de água
FONTE: (ALFACOMP, 2019)

Um sistema é isolado quando abastece isoladamente bairros, setores, localidades ou até um município inteiro, não possuindo ligação ou interferência de outro sistema. Por sua vez, um sistema integrado é aquele que abastece diversos municípios simultaneamente ou quando mais de uma unidade produtora abastece um único município, bairro, setor ou localidade (BRASIL, 2005).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2015), cerca de 85% dos municípios brasileiros possuem abastecimento por sistema isolado. Além disso, apenas 40% de todo abastecimento é satisfatório e, dos 60% restantes, 48% requer ampliação do sistema e 12% requer novo manancial para a captação de água (figura 2.2).

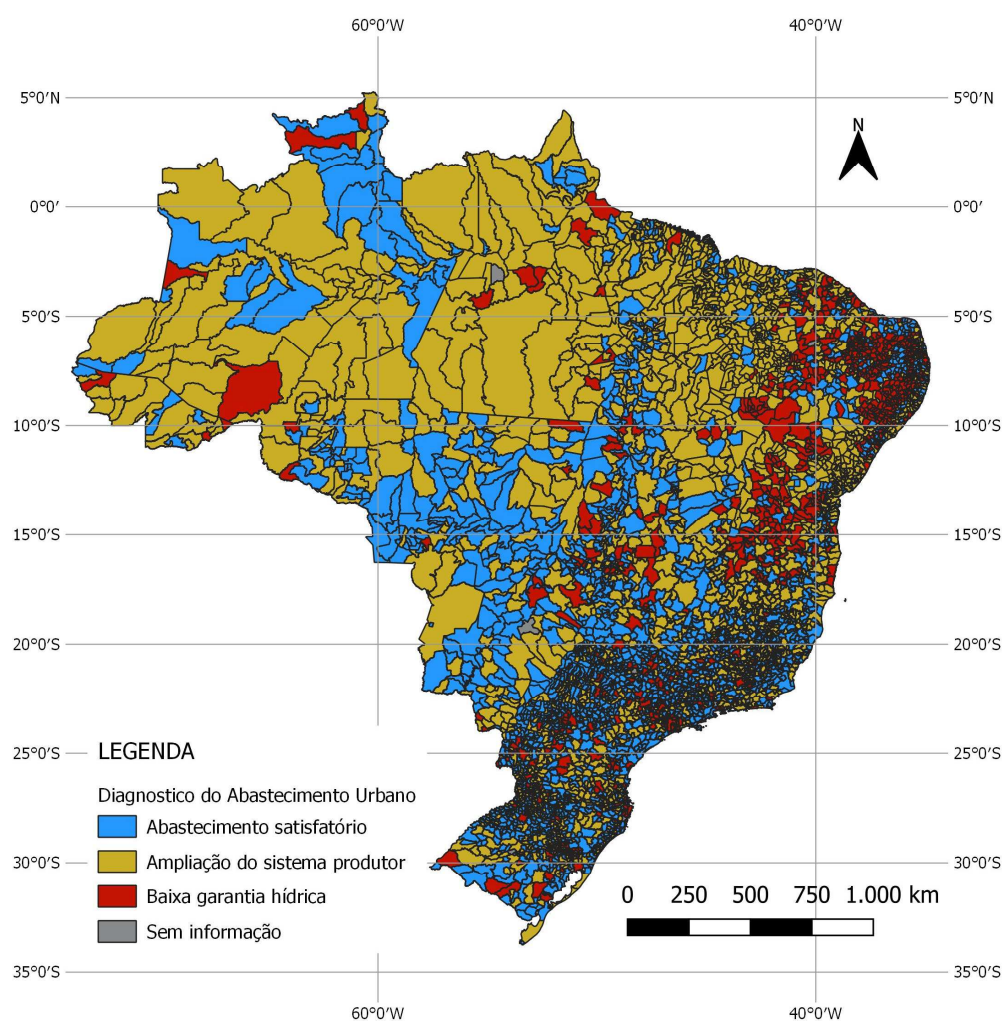


Figura 2.2 - Diagnóstico do Abastecimento de Água Urbano. Os municípios em azul possuem abastecimento satisfatório, em amarelo, os que necessitam de ampliação do sistema e de vermelho aqueles que possuem baixa garantia hídrica.

Fonte: Autoria própria de acordo com os dados disponíveis no SNIS.

A escassez de água é agravada com o aumento da desigualdade social e da falta de manejo e usos sustentáveis dos recursos hídricos. Aglomerações urbanas, o a ocupação do solo desordenado, o aumento das demandas hídricas e a deficiência da infraestrutura hídrica, quando associados a períodos de escassez de chuvas, resultam em crises hídricas como as que afetaram o Brasil principalmente entre os anos de 2012 e 2017 (BRASIL, 2019).

Além da quantidade, para a água ser consumida pela população também deve ser de qualidade. Mas, devido ao uso múltiplo que a água possui, o conceito de “qualidade da água” deve ser relativizado de acordo com o uso a que se destina. Essa qualidade é representada por meio de diversos parâmetros, que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas da água (VON SPERLING, 2005). Ressalta-se que, quando os sistemas de abastecimento de água não são

construídos ou operados adequadamente, não há a garantia de saúde para a população que usufrui deste serviço, isto é, não há segurança hídrica (TSUTIYA, 2006).

Quando a água está disponível em quantidade e qualidade suficientes tanto para o atendimento às necessidades humanas, quanto para os demais usos, como a prática das atividades econômicas e a conservação dos ecossistemas aquáticos, e além disso, ainda permite a resiliência a eventos extremos relacionados aos recursos hídricos (secas e inundações), é dito que há segurança hídrica (BRASIL, 2019).

Segundo Heller e Pádua (2010), mesmo considerando a disponibilidade hídrica contida na legislação, deve-se utilizar a água da melhor maneira possível, ou seja, deve-se evitar os desperdícios e as perdas. O primeiro está ligado ao mau uso do recurso, já o segundo, está ligado à gestão do sistema.

2.2. Perdas de água em tubulações

As perdas são caracterizadas como ineficiências técnicas e estão presentes em qualquer sistema de abastecimento de água. Entretanto, quando são elevadas, representam desperdício de recursos naturais, operacionais e de receita para o prestador de serviços (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL), 2010; BRASIL, 2018).

De acordo com Copasa (2003), Agência Nacional de Águas (Brasil) (2010) e Brasil (2018), perda de água é toda perda real ou aparente que determina aumento do custo de funcionamento ou que impeça a realização plena da receita operacional. As perdas aparentes correspondem ao volume de água consumido, mas não contabilizado, devido a erros de medições, fraudes, ligações clandestinas dentre outros. Já as perdas reais correspondem ao volume de água produzido que não chega ao consumidor final, devido à ocorrência de vazamentos em adutoras, redes, ramais, conexões, reservatórios e outras unidades operacionais do sistema. Estes vazamentos estão associados à qualidade dos materiais utilizados, à idade das tubulações, à qualidade da mão-de-obra e à ausência de programas de monitoramento de perdas, dentre outros fatores. Na tabela 2.1 é apresentada a caracterização geral das perdas e na tabela 2.2 as causas dos vazamentos.

Tabela 2.1 - Caracterização geral das perdas

Item	Características principais	
	Perdas reais	Perdas aparentes
Tipo de ocorrência mais comum	• Vazamento	• Erro de medição
Custos associados ao volume de água perdido	• Custos de produção da água tratada	• Valor cobrado no varejo ao consumidor
Efeito no meio ambiente	• Desperdício de recursos naturais	• Não é relevante
	• Maiores impactos ambientais devido à necessidade de ampliação da exploração dos mananciais	
Efeito na saúde pública	• Riscos de contaminação	• Não é relevante
Ponto de vista empresarial	• Perda de produto "industrializado"	• Perda elevada de receita
Ponto de vista do consumidor	• Imagem negativa da empresa associada ao desperdício e ineficiência	• Não é uma preocupação imediata
Efeitos finais no consumidor	• Repasse de custos à tarifa	• Repasse de custos à tarifa
	• Desincentivo ao uso racional da água	• Incitamento ao roubo e fraudes

FONTE: (TARDELLI FILHO, 2006)

Tabela 2.2 - Causa dos vazamentos

	CAUSAS INTERNAS	CAUSAS EXTERNAS
BOMBAS	Desgastes nas gaxetas	
	Ajustes inadequados nos registros, válvulas e juntas	
	Pressões elevadas	
RESERVATÓRIOS	Má qualidade dos materiais	
	Má execução da obra	
	Envelhecimento dos materiais	
TUBULAÇÕES	Material	Ambiente
	Má qualidade dos materiais	Carga de tráfego
	Corrosão	Agressividade do solo (corrosão externa)
	Envelhecimento	Polição do solo
	Execução	Desastres naturais
	Assentamento inadequado	Movimentos de terra ocasionados por obras
	Encaixes inadequados	Deslizamentos
	Corrosão	Movimentos sísmicos
	Operação	
	Golpe de aríete	
	Pressão alta	
	Qualidade da água (corrosão interna)	

FONTE: (TARDELLI FILHO, 2006)

Ressalta-se que todo sistema de distribuição de água possui um certo volume

de perdas reais, e que as perdas reais não podem ser eliminadas completamente. No entanto, estas perdas podem e devem ser administradas de forma que fiquem dentro dos limites econômicos. As perdas reais elevadas exigem indiretamente que os fornecedores de água extraiam, tratem e transportem volumes maiores de água do que a demanda de seus clientes (THORNTON et al., 2008).

Segundo a Fundação Nacional de Saúde, FUNASA, (2014), os vazamentos em tubulações são classificados em: inerentes, não visíveis e visíveis (figura 2.3). Para cada um deles existem também formas distintas de se detectar e analisar o problema.

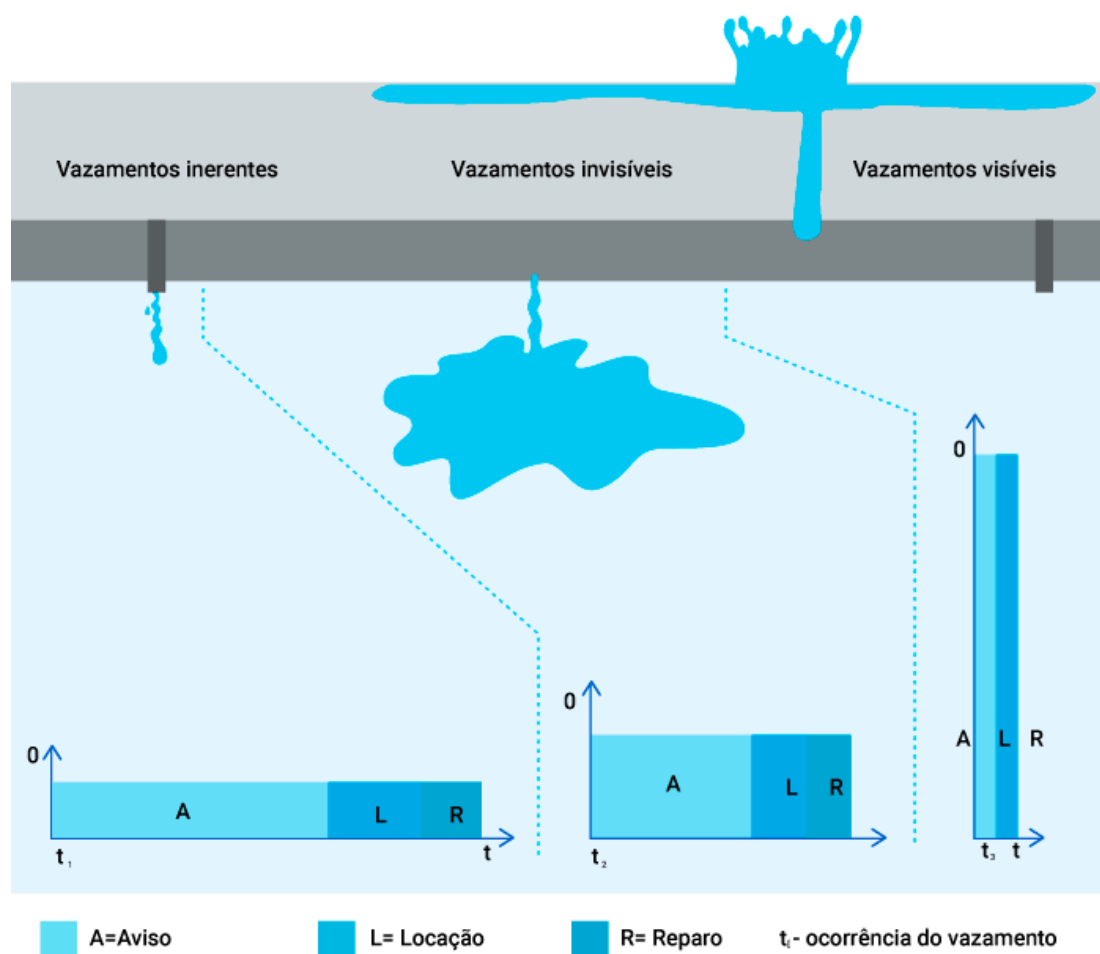


Figura 2.3 - Tipos de vazamentos. O A indica o tempo gasto para se ter consciência da existência do vazamento, o L, o tempo para sua localização e o R o tempo para o reparo. O eixo y, indicado pelo número 0, zero, indica o quanto de água é perdida com o vazamento. Fonte: (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ), 2011; MANZI, 2017)

Os vazamentos inerentes correm em juntas ou conexões e são difíceis de serem localizados, possuem taxas de fluxo muito pequenas, o que os tornam difíceis de serem detectados por métodos convencionais. Eles ocorrem continuamente até que pioram gradualmente ao ponto de tornarem-se detectáveis. A única maneira de

reduzir este tipo de vazamento é por meio de gerenciamento de pressão ou substituição de infraestrutura. Os vazamentos não visíveis normalmente possuem taxas de fluxo moderadas e um longo tempo de existência, uma vez que as concessionárias devem buscar esses vazamentos para se tornar ciente deles. Eles são localizados através técnicas ativas de detecção. Por sua vez, os vazamentos visíveis normalmente têm altas taxas de fluxo, são visivelmente evidentes, e têm um curto tempo de existência antes de serem relatados à concessionária (THORNTON et al., 2008).

No Brasil, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) calcula indicadores de perdas em sistemas de abastecimento de água segundo três escalas diferentes: Percentual; Litros por ligação ao dia; e Metros cúbicos por quilômetro de rede ao dia. Para o ano de 2019, a média de perdas no Brasil é de 39,2%. Ressalta-se, entretanto, que existe uma grande variação de perdas de acordo com regiões do país e com o tipo de prestadora do serviço de distribuição. Por exemplo, a porcentagem de perdas totais da região norte é 55,2%, o que faz dela a região cujo percentual de perdas é o maior do país, já a região centro-oeste é a que possui o menor índice de perdas totais no Brasil, 34,4% (BRASIL, 2020).

Entretanto, ressalta-se que este é um problema global, não apenas do Brasil. Na Dinamarca a perda de água é cerca de 7%, no Reino Unido, 20%, na África do Sul, 35%, na Itália e em Portugal, 36% (REPUBLIC OF SOUTH AFRICA, 2018; THE EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL WATER SERVICES (EUREAU), 2021). As perdas totais de água nos países da Europa, que fazem parte do *European Federation of National Associations of Water Services* (EurEau), é apresentada na figura 2.4. Essas perdas foram apresentadas no último relatório da instituição divulgado no ano de 2021. O relatório afirma que as perdas têm um significado no contexto local, considerando a gestão e idade da rede de distribuição de água e a origem das perdas. Os valores médios a nível nacional apresentados são extrapolados a partir de dados de nível local, por esse motivo não são recomendadas comparações entre países neste contexto.

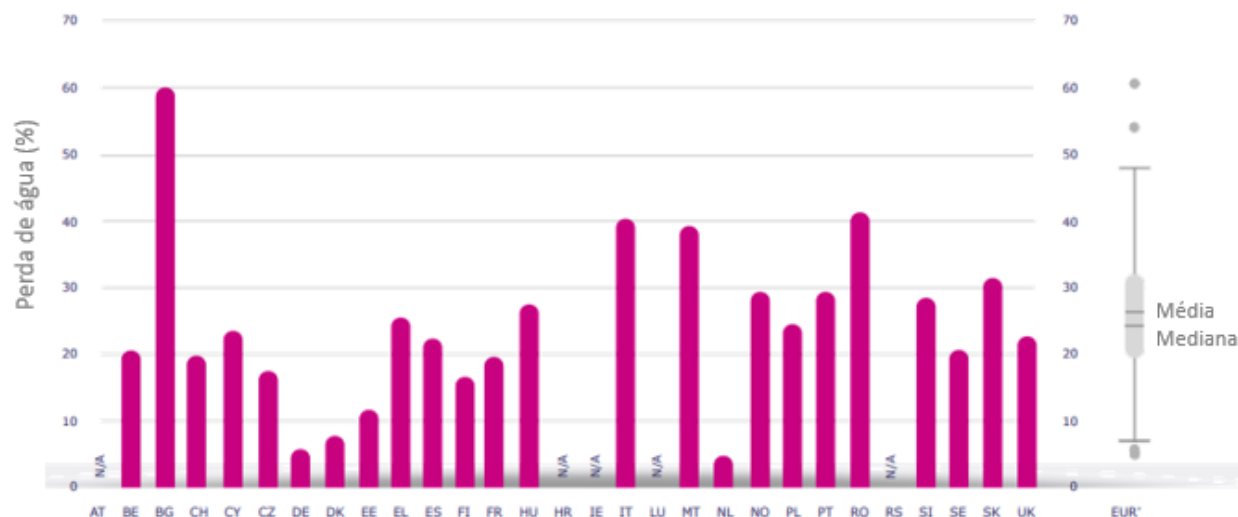


Figura 2.4 - Perda de água nos países europeus. Os códigos utilizados para a representação dos países são, respectivamente, AT Áustria, BE Bélgica, BG Bulgária, CH Suíça, CY Chipre, CZ República Tcheca, DE Alemanha, DK Dinamarca, EE Estônia, EL Grécia, ES Espanha, FI Finlândia, FR França, HU Hungria, HR Croácia, IE Irlanda, IT Itália, LU Luxemburgo, MT Malta, NL Holanda, NO Noruega, PL Polónia, PT Portugal, RO Romênia, RS Sérvia, SE Suécia SI Eslovênia, SK Eslováquia, UK Reino Unido, EUR* membros do EurEau. O boxplot apresenta a média e a mediana dos valores de perda de água destes países.

Fonte: (THE EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL WATER SERVICES (EUREAU), 2021)

Os vazamentos em tubulações do sistema de abastecimento de água trazem diversas consequências, que vão desde a má utilização da água como recurso natural até o aumento do uso de energia nas estações de tratamento (BRASIL, 2018). Outros problemas relacionados aos vazamentos são as possíveis brechas na qualidade da água transportada, devido a entrada de contaminantes através das fugas de água, como aponta Hunaidi e Wang (2006); e a formação de crateras e deslizamentos de terra, como mostra Zhou et al. (2014) e Sevil et al. (2017). Dessa forma é de fundamental importância a detecção e o reparo destes vazamentos nas tubulações do sistema de abastecimento de água.

2.3. Métodos Geofísicos

A geofísica é a ciência que aplica os princípios físicos ao estudo da Terra. Os métodos geofísicos (tabela 2.3) podem ser divididos em dois grandes grupos: os que fazem uso dos campos naturais da Terra, e aqueles que envolvem a aplicação na superfície de energia gerada artificialmente. Dentro de cada grupo existe uma ampla gama de métodos de levantamentos, e para cada um, há uma propriedade física relacionada à qual o método é sensível. Por esse motivo a propriedade física à qual um método responde determina seu campo de aplicação (KEAREY et al., 2009).

Tabela 2.3 - Métodos Geofísicos

Método	Parâmetro medido	Propriedades físicas relacionadas
Gravitacional	Variações espaciais da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnético	Variações espaciais da força do campo geomagnético	Suscetibilidade magnética e remanência
Sísmico	Tempos de percurso de ondas elástico acústicas refletidas/refratadas	Densidade e módulos elásticos, os quais determinam a velocidade de propagação de ondas sísmicas
Elétrico		
Resistividade	Resistência da Terra	Condutividade elétrica
Polarização induzida	Voltagens de polarização ou resistência do solo dependente da frequência	Capacitância elétrica
Potencial espontâneo	Potenciais elétricos	Condutividade elétrica
Eletromagnético	Resposta às radiações eletromagnéticas	Condutividade e indutância elétricas
Radar	Tempos de percurso de pulsos de radar refletidos	Constante dielétrica

OBS.: Os métodos da gravitacionais, magnéticos e de potencial espontâneo utilizam os campos naturais da Terra, os demais utilizam campos artificiais.

Fonte: (KEAREY et al., 2009)

2.3.1. Eletrorresistividade - ERT

A resistência elétrica (R) é a oposição interna do material à circulação de cargas, também chamada de corrente elétrica (I), quando submetido a uma diferença de potencial (ΔV) (equação 2.1). Ela depende do tipo de material, da geometria e da temperatura. Cada material possui sua resistência específica, denominada resistividade (ρ). Deste modo, a resistividade elétrica é o recíproco da condutividade, ou seja, um material que tem uma resistividade elevada terá uma condutibilidade baixa, e vice-versa (CREDER, 2007).

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad 2.1$$

A eletrorresistividade é um método geoeletrico. Seu princípio consiste na determinação da resistividade elétrica dos materiais, solos e rochas presentes na subsuperfície. Neste método, correntes elétricas, contínuas ou alternadas de baixa frequência, são injetadas no solo artificialmente através de um par de eletrodos, e as diferenças de potencial resultantes são medidas através de outro par de eletrodos. (BRAGA, 2016; KEAREY et al., 2002).

O objetivo dos levantamentos de resistividade elétrica é determinar a distribuição de resistividade, ρ [$\Omega \cdot m$], do volume de solo que está sendo estudado. Utilizando a Lei de Ohm (equação 2.2) e a geometria dos eletrodos é possível calcular a resistividade. Além disso, os padrões de diferença potencial, ΔV , obtidos fornecem informações sobre a estruturação da subsuperfície e a forma de heterogeneidades subsuperficiais (por exemplo, a existência de uma rocha diferente em determinado ponto da subsuperfície ou a influência do nível freático), e de suas propriedades elétricas. Quanto maior o contraste elétrico entre a matriz do solo e a heterogeneidade, mais fácil será a detecção desta heterogeneidade (KEAREY et al., 2002; SAMOUËLIAN et al., 2005).

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad 2.2$$

Onde

$\vec{J}$ é a densidade de corrente [A / m^2]

ρ é a resistividade elétrica [$\Omega \cdot m$]

$\vec{E}$ é o intensidade do campo elétrico existente em um meio condutor [N/C]

A resistividade elétrica do solo é uma função que leva em consideração vários fatores, como a natureza dos constituintes sólidos, arranjo de vazios, grau de saturação de água, resistividade elétrica da água presente no solo, e temperatura. Esses parâmetros afetam a resistividade elétrica, mas de maneiras diferentes e em diferentes graus (SAMOUËLIAN et al., 2005; TELFORD et al., 1990).

As variáveis existentes quando se realiza uma investigação elétrica por injeção de corrente são: as dimensões do material que será percorrido pela corrente elétrica, que será variável de acordo com a localização dos pontos de injeção desta corrente; e a heterogeneidade do meio. Assim, para relacionar os resultados obtidos utilizando a ERT com o que está em subsuperfície é necessário: conhecer a geologia local em termos estratigráficos; ter em mente a localização geográfica da área estudada e; conhecer valores típicos da resistividade dos materiais que se supõe encontrar com a investigação geofísica (BORGES, 2007; BRAGA, 2016; LOKE, 2000).

A configuração usual, utilizada para aquisição dos dados, consiste na utilização de quatro eletrodos (C1P1P2C2). Nesta configuração, um par de eletrodos é responsável por introduzir a corrente elétrica no solo, (eletrodos de corrente, C1 e C2) enquanto o outro par faz a medição da diferença de potencial, ΔV , (eletrodos de

potencial, P1 e P2) estabelecida entre eles (BORGES, 2007; DAHLIN; ZHOU, 2004).

Como a subsuperfície não é um meio homogêneo, a resistividade obtida com a investigação elétrica será a média da resistividade do solo abaixo dos pontos das medidas efetuadas. Essa média é denominada resistividade aparente (ρ_a), sendo sua unidade de medida no sistema internacional o ohm vezes metro ($\Omega.m$). Ela reflete apenas as propriedades médias do meio por onde a corrente passou, e é expressa pela equação 2.3 (BORGES, 2007; BRAGA, 2016):

$$\rho_a = \frac{\Delta V_{P1P2}}{I} \cdot K \quad 2.3$$

Onde, ΔV é a diferença de potencial [V]; I é a corrente elétrica [A], e K um fator geométrico que é dado pela equação 2.4, no caso do arranjo dipolo-dipolo, que será melhor discutido no item 2.1.4 deste trabalho.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1P_1}\right) - \left(\frac{1}{P_1C_2}\right) - \left(\frac{1}{C_1P_2}\right) + \left(\frac{1}{P_2C_2}\right)} \quad 2.4$$

Como este é um problema em que um campo potencial está envolvido, a assinatura da resistividade aparente de qualquer estrutura é calculada pela solução da equação de Laplace (equação 2.5) (KEAREY et al., 2002).

$$\nabla^2 f = 0 \quad 2.5$$

Onde ∇^2 denota o laplaciano e f é uma função que depende variáveis espaciais em uma dada região.

No método da ERT há várias técnicas de aquisição de dados. As mais comuns são a Tomografia Elétrica (TE), também conhecida como Caminhamento Elétrico; a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e; a Perfilagem Elétrica de Poços (PEP). Cada técnica é indicada para determinadas aplicações, como por exemplo, quando se deseja identificar variações laterais da resistividade, utiliza-se o Caminhamento Elétrico, mas quando se deseja observar a variação vertical da resistividade, pode-se utilizar a SEV, técnica onde se usam apenas 4 eletrodos (BORGES, 2007; FURMAN et al., 2003).

A ERT pode variar não apenas com materiais distintos, mas também com outras características dos materiais. No caso dos solos, há variações de resistividade com a variação da umidade, da salinidade e da temperatura (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020). A forma como essa variação ocorre está representada na imagem a seguir:

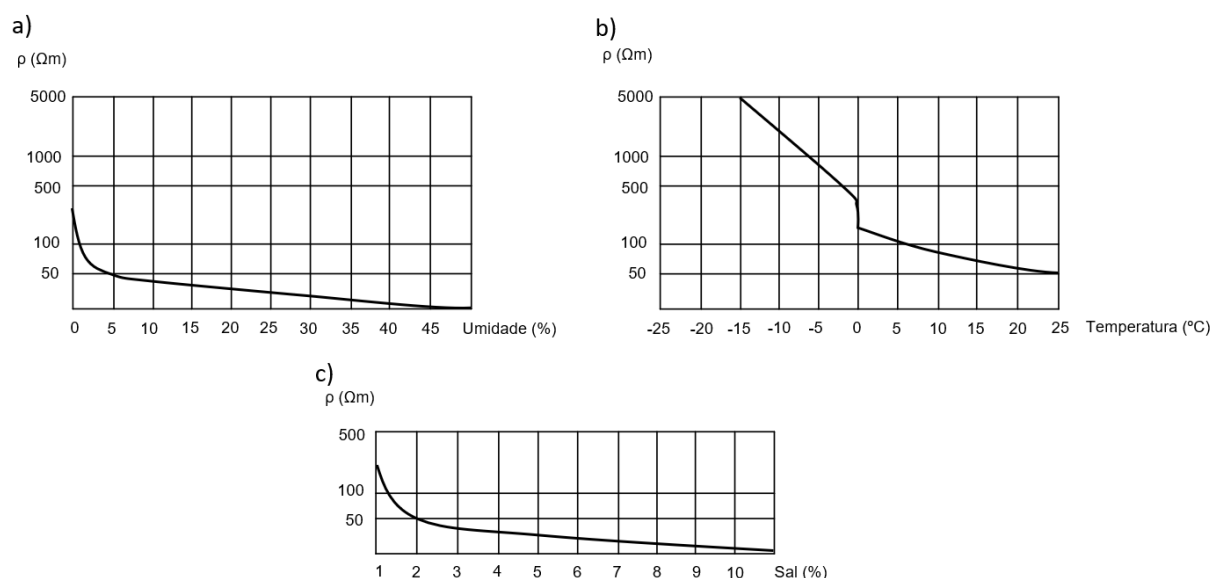


Figura 2.5 - Variação da resistividade de acordo com a valiação a) da umidade; b) da temperatura; e c) da salinidade

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020)

2.3.2. Arranjo de eletrodos

Além das várias técnicas de aquisição, os pares de eletrodos também podem ser arranjados de diferentes formas, cada uma com sensibilidades diferentes. A sensibilidade está relacionada ao arranjo e a estruturação da subsuperfície (figura 2.6). A escolha dos arranjos e das técnicas utilizadas depender do que se deseja visualizar na subsuperfície (DAHLIN; ZHOU, 2004; FURMAN et al., 2003).

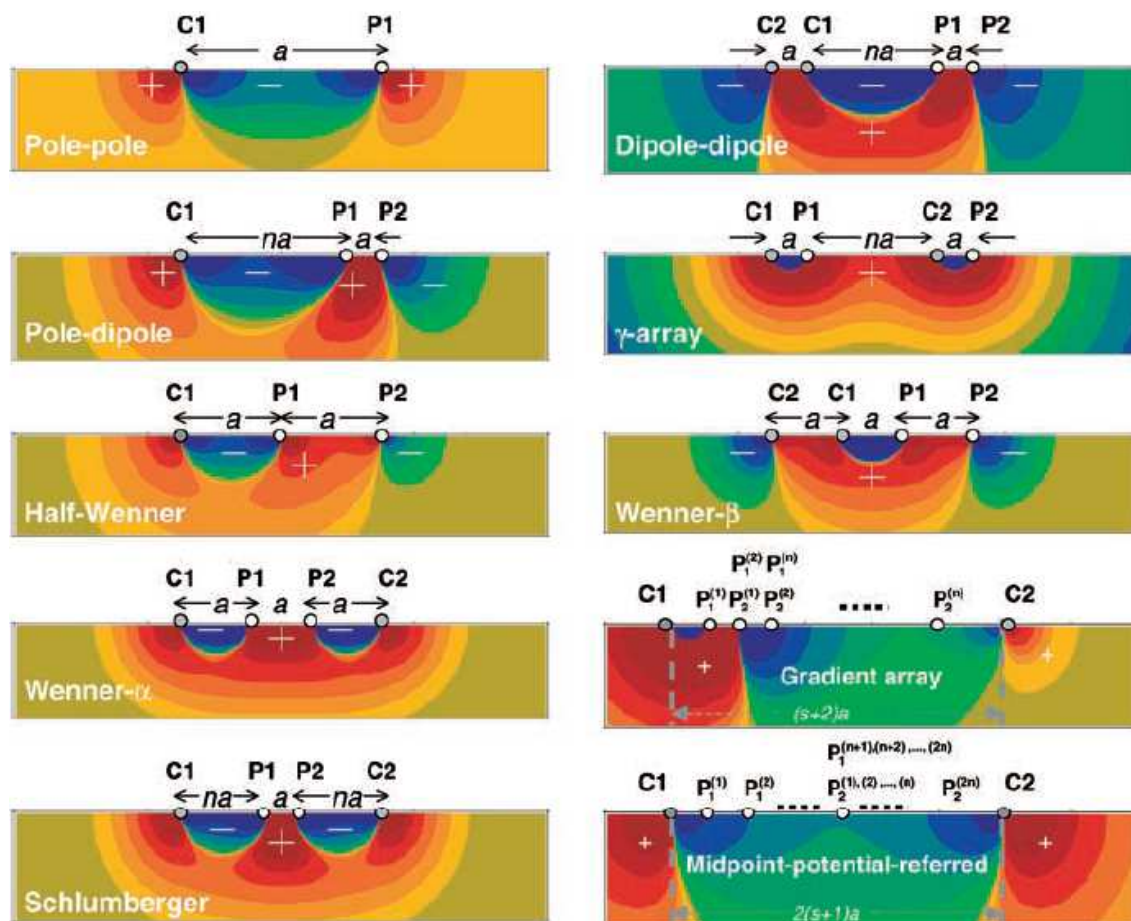


Figura 2.6 - Diagramas esquemáticos de diferentes arranjos de elétrodos e os seus padrões de sensibilidade para levantamentos de resistividade 2D. Na figura, C_1 e C_2 são os elétrodos de corrente positivo e negativo, respectivamente. P_1 e P_2 são dois elétrodos de potencial. As letras a e n são os parâmetros que controlam o espaçamento e o espaçamento máximo dos arranjos. Os padrões de sensibilidade mostrados são apenas um exemplo de cada uma das combinações indicadas, e nestes padrões, as cores quentes e o sinal positivo representam a região onde o modelo terá maior resolução, já as cores frias e o sinal negativo indicam onde a resolução será menor.

Fonte: (DAHLIN; ZHOU, 2004)

A seguir serão descritas as características dos arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo. Ambos os arranjos utilizados neste trabalho.

• Dipolo-Dipolo

O arranjo dipolo-dipolo se caracteriza pelo espaçamento “ a ” entre cada par de eletrodos é fixa, o que é alterado é o fator “ n ”, espaçamento entre os pares de eletrodos (figura 2.7). Cada um destes afastamentos corresponde a um nível de investigação em profundidade, sendo que em princípio, quanto maior for o valor de “ n ”, mais profunda é a penetração da corrente (GANDOLFO; GALLAS, 2007; MILSOM, 2003).

Este arranjo de eletrodos, de acordo com Whiteley (1973) e Coggon (1973), oferece uma boa performance no mapeamento de estruturas verticais, anomalias

simétricas e permite o reconhecimento de irregularidades condutivas de sobrecarga. Entretanto, pode ser fortemente influenciado por irregularidades da cobertura superficial, apesar de ser reduzida a vulnerabilidade ao ruído indutivo.

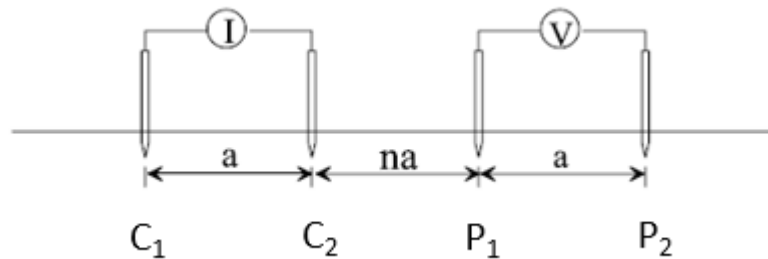


Figura 2.7 - Esquema do arranjo Dipolo-Dipolo
FONTE: (GANDOLFO; GALLAS, 2007)

• Polo-Dipolo

O arranjo polo-dipolo, também denominado tripolo, se caracteriza por 3 eletrodos móveis, e o quarto (um dos eletrodos de corrente) fixo a uma distância suficientemente grande, denominada de “infinito”. O espaçamento “a” entre os eletrodos de potencial fixo, o que é alterado é o fator “n”, espaçamento entre o par de eletrodos de potencial e o eletrodo móvel de corrente (figura 2.8). A profundidade de investigação aumenta à medida que se aumenta o valor de “n” (GANDOLFO; GALLAS, 2007; MILSOM, 2003).

Este arranjo de eletrodos, de acordo com Whiteley (1973) e Coggon (1973), oferece uma boa performance no mapeamento de anomalias simétricas e em grande profundidade de investigação. Os autores ainda ressaltam que anomalias assimétricas são consequentemente mais difíceis de interpretar do que as produzidas por matrizes simétricas. Para Gandolfo e Gallas (2007), deve-se ainda tomar um cuidado especial com o sentido da coleta de dados, pois “caminhamentos realizados em sentidos opostos fornecem distintas pseudoseções”.

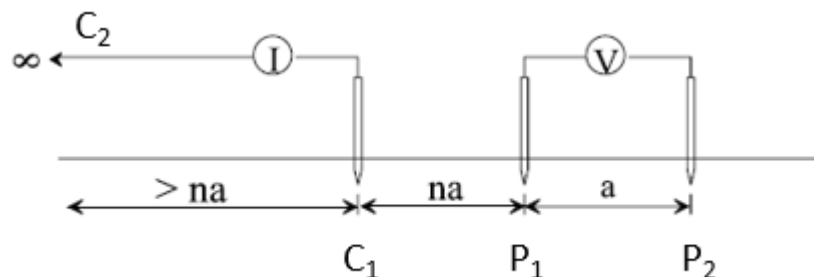


Figura 2.8 - Esquema do arranjo Polo-Dipolo
FONTE: (GANDOLFO; GALLAS, 2007)

- **Polo-Dipolo X Dipolo-Dipolo**

Comparando-se os dois arranjos tem-se que para uma mesma intensidade de corrente, o sinal recebido pelos eletrodos de potencial é maior no polo-dipolo do que no dipolo-dipolo, conseqüentemente há uma melhor razão sinal/ruído. Além disso, o eletrodo fixo pode ser instalado de maneira a proporcionar uma redução na resistência de contato solo/eletrodo (GANDOLFO; GALLAS, 2007).

Coggon (1973) observou que o arranjo polo-dipolo é similar ao dipolo-dipolo, porém possui uma menor resolução.

2.3.3. Ground Penetrating Radar – GPR

O GPR é um dos métodos geofísicos classificados como eletromagnético (EM), isto é, são baseados na propagação de campos eletromagnéticos na subsuperfície (TELFORD et al., 1990). A técnica do GPR consiste na transmissão e captura da reflexão de ondas eletromagnéticas de alta frequência, por meio de uma ou mais antenas. Um pulso eletromagnético é propagado no solo e reflete em interfaces ou objetos que apresentam contraste de propriedades eletromagnéticas. As ondas refletidas são recebidas pela antena e gravadas para criar um perfil da subsuperfície, denominados radagramas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

A profundidade de penetração das ondas depende de sua frequência das ondas transmitidas e da natureza do material pesquisado. Ressalta-se que como a permissividade da água é alta, comparada com materiais secos, o conteúdo de água e a porosidade são importantes controles da penetração do pulso eletromagnético (KEAREY et al., 2009).

Quando se trata de vazamentos de água, estes podem ser detectados inspecionando visualmente os perfis GPR gerados (ATEF et al., 2016) e, diferentemente da ERT, existem diversos estudos sobre o uso do método em detecção deste tipo de vazamento. Dentre os estudos mais recentes, cita-se o de Ocaña-Levario et al. (2018), onde os autores utilizaram filtros de variância nos resultados obtidos com o GPR para localizar vazamentos de água em tubulações enterradas, e o de De Coster et al. (2019), que propõem uma nova ferramenta que visa melhorar a detecção de vazamentos com base no GPR.

2.4. Detecção de vazamentos de água em tubulações por meio de métodos geofísicos - Estado da Arte

Estudos recentes usando geofísica para detecção de vazamentos estão sendo realizados. Um exemplo é o trabalho de De Coster et al. (2019), que propõe uma nova ferramenta que visa melhorar a detecção de vazamentos com base em GPR. No trabalho, os autores também destacam que é necessário cuidado na fase de interpretação, pois os dados de GPR são influenciados por uma série de fatores ambientais, como textura do solo e teor de água volumétrico inicial, e fatores e técnicas, como o tipo e a orientação do vazamento.

O trabalho realizado por Ocaña-Levario et al. (2018) tem como objetivo identificar e extrair características de imagens GPR como vazamentos e componentes em uma condição de laboratório controlada por uma metodologia baseada em parâmetros estatísticos de segunda ordem e, a partir das características obtidas, criar modelos de ferramentas 3D que permitam rápida visualização de componentes e vazamentos em sistemas de abastecimento de água para análise de imagens GPR e posterior interpretação.

Lai et al. (2016) estudaram padrões de perturbação de imagens GPR como uma ferramenta para detectar vazamentos de água em tubulações de água enterradas com experimentos de laboratório. Diferentes padrões de perturbação em sinais GPR devido ao vazamento de água em tubos metálicos e de PVC enterrados em uma caixa de areia foram mapeados e estudados com injeção de água e volume de vazamento controlados, bem como uma posição fixa de vazamento nos tubos.

King-Wah Lau et al. (2021) propõem uma combinação de algoritmo para estimativa de velocidade, seguida da caracterização do local do vazamento de água onde a velocidade da onda é reduzida em relação ao local sem vazamento, sem informações para a profundidade da utilidade a priori. A combinação do algoritmo de velocidade foi primeiro validada usando uma antena de alta frequência de 2 GHz no ar, onde a velocidade da onda é igual à velocidade da luz. A segunda validação consiste em dois estudos de detecção de vazamento de água em escala real pela abordagem analítica de velocidade proposta usando um GPR de 600 MHz.

Dashwood et al. (2020) apresentam a aplicação de levantamentos de ondas de superfície para estudar perturbações do solo causadas, em primeiro lugar, pela abertura de valas durante a instalação de uma tubulação de água e, em segundo lugar, pela entrada de água vazando da tubulação para a formação circundante. O método

utilizado no estudo foi o Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW).

Fabbiano et al. (2020) propõem uma metodologia para detectar vazamentos e localizá-los com precisão suficiente, que consiste em medir o estado vibracional radial de tubos oportunos na rede. A ideia surge da consideração de que a variação da energia transmitida às paredes dos tubos pelo componente radial das vibrações induzidas pela turbulência do fluido sobre elas pode estar relacionada ao próprio vazamento do fluxo.

Fatemi Aghda et al. (2018) avaliaram a capacidade do método TDR em termos do aparecimento de pontos de multifuga simultaneamente. Para tal, foram realizados vários testes laboratoriais. Os resultados mostraram que, com o aumento do número e do tamanho dos pontos de vazamento, a taxa de erro do sistema de detecção de vazamento de água baseado em TDR aumenta. O método TDR também foi estudado por (CATALDO et al., 2013, 2014b, 2017c, 2017a; D'AUCELLI et al., 2017; GIAQUINTO et al., 2016) como um método de detecção de vazamentos.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1. Classificação da Pesquisa

O delineamento metodológico desta pesquisa está apresentado na figura 3.1.

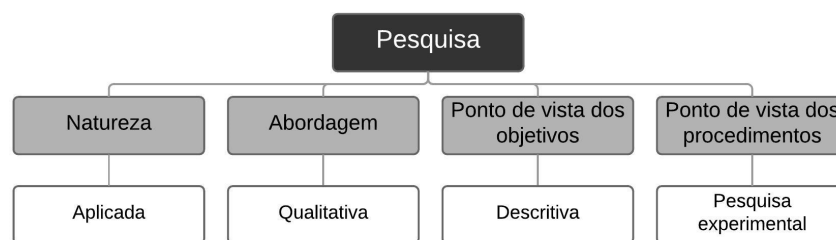


Figura 3.1 - Delineamento metodológico da pesquisa

3.2. Método dos procedimentos

A metodologia desta tese pode ser resumida nos seguintes tópicos:

- Obter informações de localização de vazamentos em uma adutora de água tratada utilizando uma adaptação do método da eletrorresistividade, onde um dos eletrodos será fixado dentro da água;
- Elaborar um experimento de bancada para simulação da detecção de vazamentos em uma adutora;
- Investigar as limitações do uso do novo método, quanto ao tamanho e profundidade do vazamento, e quanto a diferentes contrastes elétricos, para a detecção de vazamentos em adutoras de água;
- Verificar a precisão e eficiência do método proposto;
- Comparar o novo método com o tradicional (onde todos os eletrodos são dispostos na superfície do solo).

Dessa forma, pode-se dividir o trabalho em três grandes etapas:

- 1) Revisão sistemática da literatura;
- 2) Adaptação do método da eletrorresistividade para detecção de vazamentos;
- 3) Estudo experimental em para avaliar a adaptação proposta.

Para realizar as etapas citadas, o trabalho seguirá o fluxograma apresentado na figura 3.2:

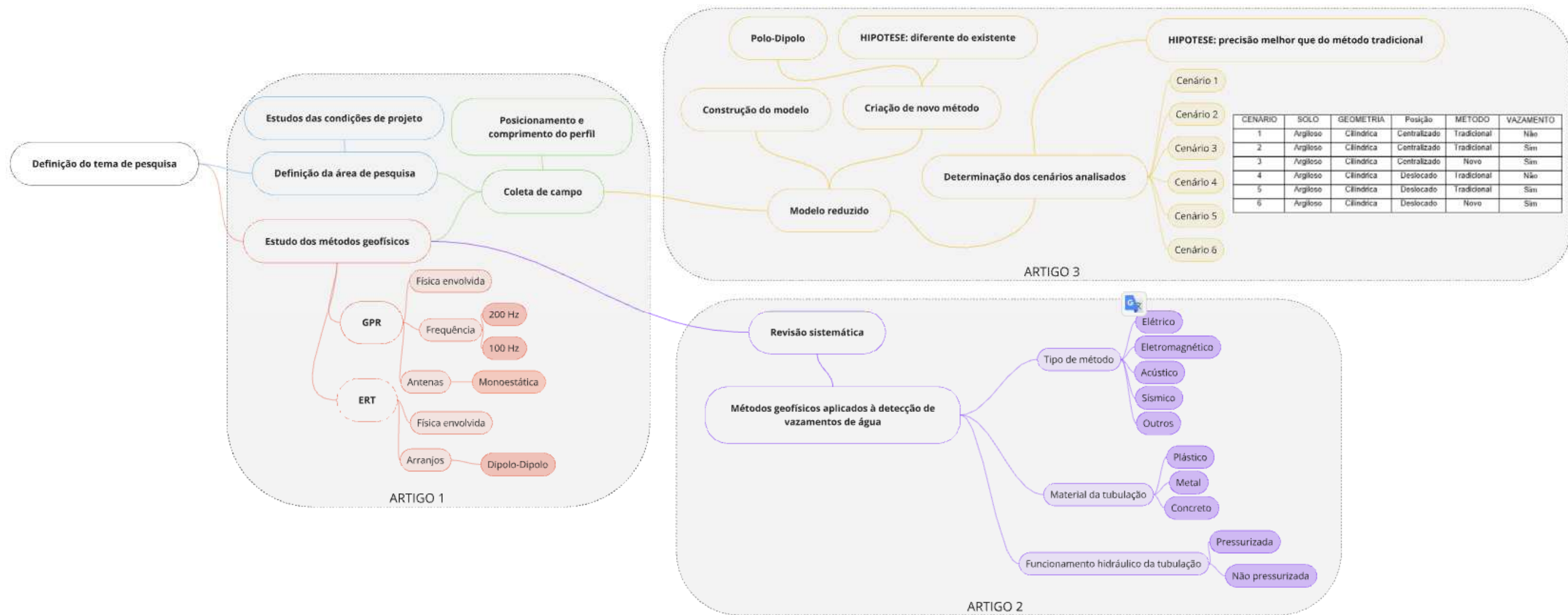


Figura 3.2 - Fluxograma das etapas do trabalho

3.2.1. Revisão Sistemática da Literatura

Para realizar a seleção do portfólio bibliográfico, base para a realização da revisão sistemática da literatura, foi utilizado o método ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist), desenvolvido por Ensslin et al. em 2010. O método é baseado na definição das delimitações amostrais construídas a partir do conhecimento do pesquisador e/ou de publicações claramente identificadas com o estado da arte do tema pesquisado (ENSSLIN et al., 2010). No presente estudo, o ProKnow-C foi utilizado para obter dados e informações relacionadas a aplicação de métodos geofísicos para detecção de vazamentos em tubulações enterradas.

Para a seleção dos artigos do portfólio bibliográfico foram realizadas: i) A definição dos eixos de pesquisa e palavras chave; ii) A escolha das bases de dados; iii) Etapas de seleção dos artigos.

i) Eixos de pesquisa e palavras-chave

Os eixos da pesquisa e as palavras-chave utilizadas são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 3.1 - Eixos de pesquisa e palavras-chave utilizados para a realização da revisão sistemática da literatura da tese

Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
Abastecimento de água	Detecção de vazamento	Métodos geofísicos
water pipe	leak detection	geophysics methods
water pipeline	leakage monitoring	geophysics prospecting

Dessa forma a combinação utilizada para as pesquisas nas bases de dados foi: "water pipe" AND leak AND (detection OR monitoring) AND geophysics AND (methods OR prospecting).

ii) Bases de dados

Para selecionar o portfólio bibliográfico foram consultadas 34 bases de dados presentes na subárea de Engenharia Civil do site Periódicos Capes, foram consideradas bases de texto completo e de referenciais com resumos.

A combinação de palavras-chave foi pesquisada em todas as bases, fornecendo um total de 587 artigos.

iii) Seleção dos artigos.

Depois de eliminados os arquivos redundantes, filtrou-se os documentos, conforme o método Proknow-c, de forma a se obter o estado da arte do tema proposto. Como resultado, foram obtidos 87 artigos, que são apresentados no apêndice A.

3.2.2. Técnica utilizada

A técnica utilizada neste trabalho será a ERT. Nela duas configurações de posicionamento do eletrodo inicial serão comparadas:

- 1) colocando todos os eletrodos na superfície do solo (método tradicional) e;
- 2) colocando um dos eletrodos, o de injeção de corrente, dentro da tubulação e os demais eletrodos na superfície do solo (Figura 3.3).

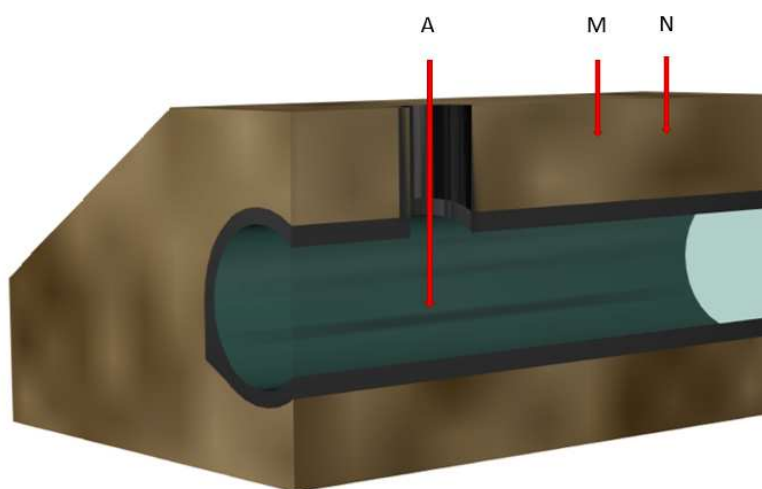


Figura 3.3 - Esquema da disposição dos eletrodos no método novo

O arranjo de eletrodos utilizado será o polo-dipolo modificado, uma vez que com este arranjo será possível posicionar o eletrodo de corrente (A) dentro da adutora no método novo.

A configuração de eletrodos em questão diverge do arranjo polo-dipolo padrão pela disposição do eletrodo de corrente, posicionado inferiormente à linha dos eletrodos de potencial e imerso na tubulação de água, resultando em uma injeção direta da corrente elétrica no corpo d'água e modificando a distribuição potencial, o que, por sua vez, altera a sensibilidade do método à resistividade das camadas subjacentes.

3.2.3. Local de estudo e Visitas em campo

O local onde será realizado o teste em campo se encontra na Via de Manutenção da Copasa (latitude 19°58' e longitude 43°50'), localizada na cidade de Nova Lima - Minas Gerais (figura 3.4). Ao lado da Via de Manutenção está a adutora

de água tratada - AAT de 2.400 mm, do Sistema Produtor do Rio das Velhas – SRV, que faz parte do Sistema Integrado de Abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. Neste local, a tubulação está parcialmente enterrada, o que dificulta localização visual dos vazamentos.

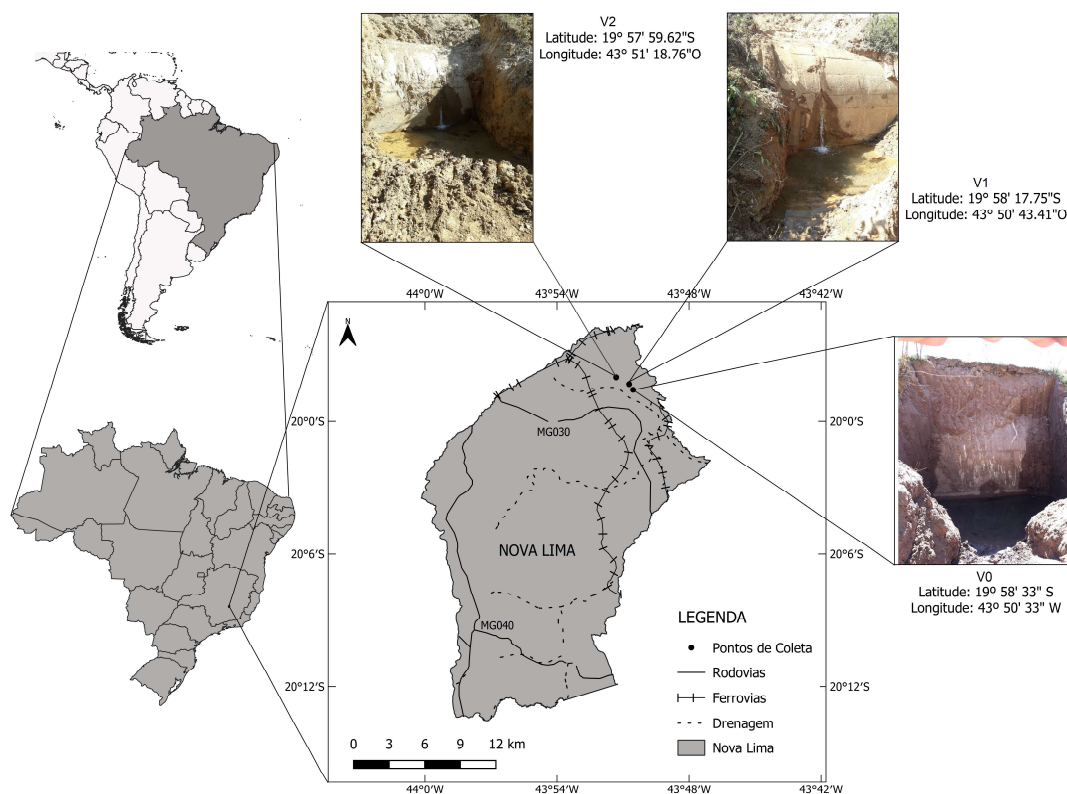


Figura 3.4 - Exemplos de vazamentos encontrados no trecho da adutora do Sistema Produtor do Rio das Velhas (Minas Gerais). V0, V1 e V2 indicam pontos de vazamentos localizados previamente pela companhia de saneamento.

3.2.4. Ensaios em Laboratório – Experimento de bancada

O experimento de bancada (figura 3.5) foi construído nos laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Trata-se de um recipiente de material plástico (104 cm de comprimento por 66 cm de largura e 60 cm de altura), onde introduziu-se solo previamente caracterizado.

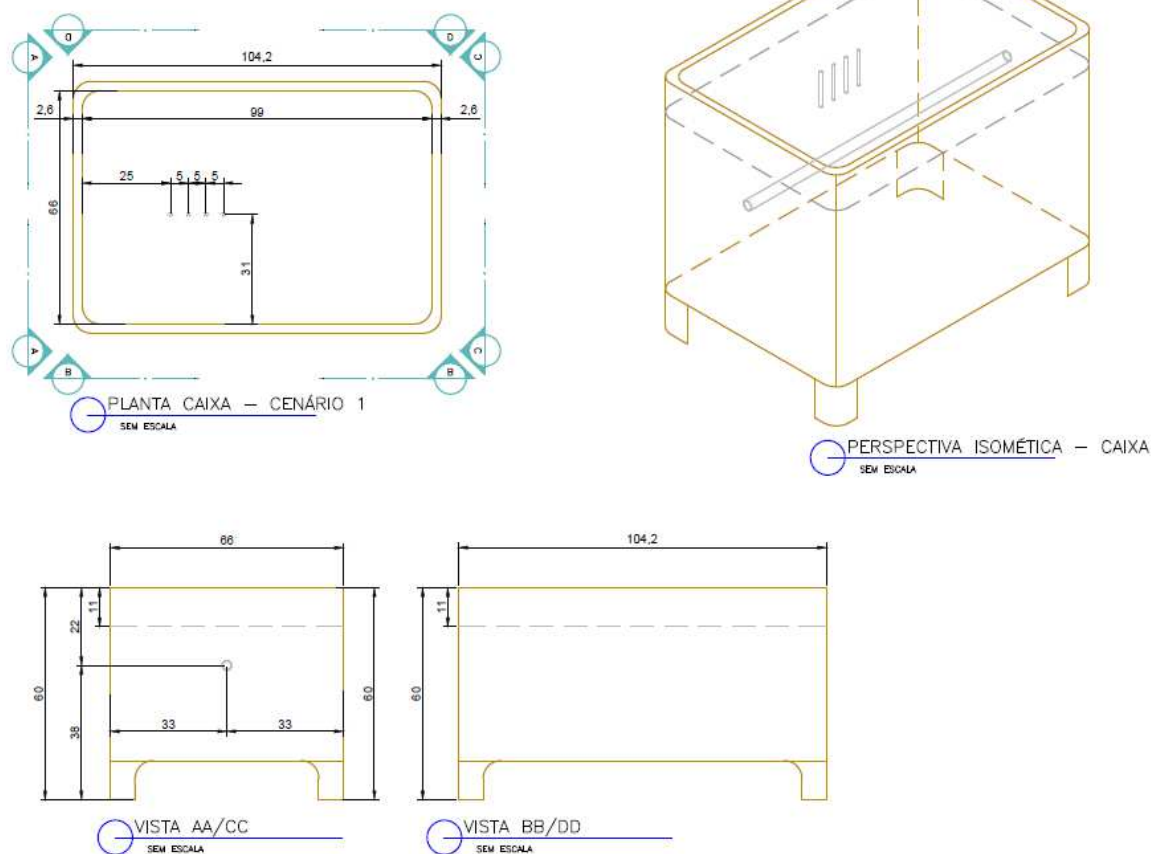


Figura 3.5 Esquema do experimento de bancada a ser construído em laboratório

O teor de umidade e a compactação do mesmo foram controladas, o primeiro por meio de um medidor de umidade do solo, marca ECOWITT modelo WH0291, e a segunda por meio do procedimento descrito a seguir.

1. Uma camada inicial do solo foi colocada dentro do aparato experimental, espalhando-o uniformemente em toda a área. Esta camada terá aproximadamente 1/3 da caixa utilizada no experimento.

2. Utilizou-se o rolo de compactação (figura 3.6), de 2,26 kg, para aplicar força sobre o solo. O número de passadas realizadas por camada foi 20. A cada cenário realizado, o solo era retirado, seco e adensado novamente. Certificou-se de adensar o solo ao redor da tubulação para evitar espaços vazios;



Figura 3.6 - Rolo usado para compactar o solo

3. Uma fita métrica foi colocada ao lado da caixa para acompanhar o quanto o solo foi adensado;

4. Durante o adensamento do solo, este foi umedecido gradualmente, por meio de um aspersor de água, até atingir o teor de umidade adequado e constante. Foram utilizados 500 ml de água por camada. A água foi adicionada em pequenas quantidades, misturando bem o solo até que a umidade desejada fosse alcançada. Esta umidade gravimétrica está entre 18 a 20%, e o equipamento utilizado para a medição foi o medidor de umidade do solo ECOWITT WH0291;

5. Após o adensamento inicial, o teor de umidade do solo, durante o período de medições de resistividade, foi monitorado regularmente. Caso variações no teor de umidade ao longo do tempo fossem percebidas, foi realizado o ajuste da mesma adicionando água ou permitindo que o solo secasse, conforme necessário.

A tubulação foi então introduzida por meio de aberturas laterais, e as condições hidráulicas dentro da tubulação controlada por um sistema abre e fecha, como apresentado na figura 3.7.

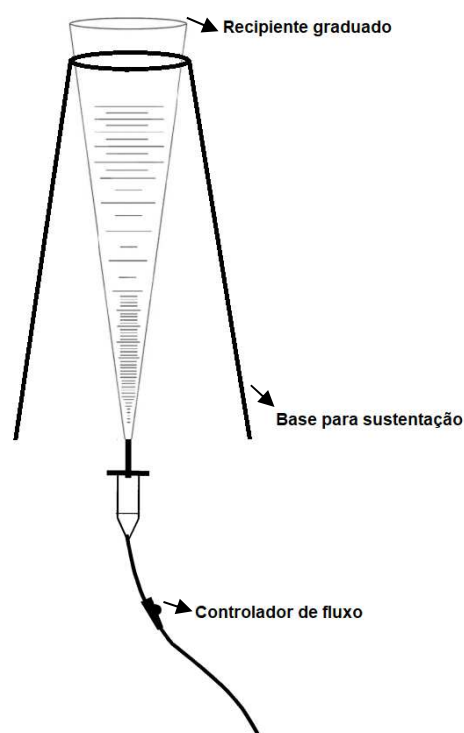


Figura 3.7 Esquema do aparato experimental para manutenção das condições hidráulicas dentro da tubulação.

Foram utilizadas duas tubulações, uma contendo um furo central e a outra íntegra, isto é, sem furo. A tubulação sem vazamento foi utilizada como controle do experimento.

Após o adensamento e estabilização do solo, foram iniciadas as medições de resistividade. Os procedimentos para coleta de dados são descritos a seguir:

1. Os eletrodos de potencial do equipamento foram posicionados à 25cm ou a 45cm a partir de uma das bordas do comprimento da caixa e a 31cm ou a 20cm de uma das bordas da largura da caixa utilizada, como representado na figura 3.5. Os arranjos utilizados serão o polo-dipolo modificado e o dipolo-dipolo. Enquanto o primeiro trata-se da nova configuração proposta, isto é, o eletrodo de corrente estará dentro da tubulação, na segunda configuração os eletrodos de corrente estarão equidistantes dos demais eletrodos 5 unidades, como representado na figura 3.5.

2. As medições foram realizadas utilizando o aparelho da marca Lippmann, modelo 4 point light 10 W, cedido ao Programa de Engenharia Civil pelo pesquisador Remke Leander van Dam, em intervalos de 15 minutos durante um período inicial.

Os cenários analisados nesta pesquisa foram (tabela 3.2):

Tabela 3.2 Cenários analisados

CENÁRIO	SOLO	GEOMETRIA	Posição	MÉTODO	VAZAMENTO
---------	------	-----------	---------	--------	-----------

1	Argiloso	Cilíndrica	Centralizado	Tradicional	Não
2	Argiloso	Cilíndrica	Centralizado	Tradicional	Sim
3	Argiloso	Cilíndrica	Centralizado	Novo	Sim
4	Argiloso	Cilíndrica	Deslocado	Tradicional	Não
5	Argiloso	Cilíndrica	Deslocado	Tradicional	Sim
6	Argiloso	Cilíndrica	Deslocado	Novo	Sim

O resumo dos parâmetros utilizados está na tabela 3.3.

Tabela 3.3 Resumo dos parâmetros utilizados

MÉTODO	Elétrico
TÉCNICA	Eletroresistividade
APARELHO	4 point light 10 W
FREQUÊNCIA	5 Hz
ARRANJO	Dipolo-dipolo e Polo-dipolo
ESPAÇAMENTO	0,05 metros

3.2.5. Análise do solo

O solo utilizado no experimento de bancada foi caracterizado. Esta análise se faz importante uma vez que solos mais úmidos apresentam menores resistividades, e em solos de textura fina, a corrente elétrica em argila não é apenas conduzida pela água livre dos poros, mas também pela água adsorvida na superfície da partícula de argila (SAMOUËLIAN et al., 2005).

A caracterização foi realizada de acordo com as seguintes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas:

- NBR 16.097: 2012. Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio.
- NBR 6.457:2016 Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
- NBR 7.181: 2016. Solo - Análise granulométrica.

Para a determinação da densidade do solo foi utilizado o método da picnometria à laser. O picnômetro utilizado foi o Multi Picnômetro Quantachrome MVP-6DC localizado no prédio 18 do campus Nova Gameleira do CEFET-MG.

Além destes ensaios, o solo foi analisado por meio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para compreender a estrutura de

moléculas individuais e a composição de misturas moleculares presentes no solo analisado.

3.2.6. Análise de dados

As análises dos dados obtidos, foram realizadas levando em conta princípios estatísticos e metrológicos, para que assim seja possível avaliar o quanto mais precisa e eficiente uma técnica é da outra. Todas as análises foram consideradas significativas quando o p-valor foi menor que 5%.

Utilizou-se para análises estatísticas o software livre R, versão 4.1.1.

4 ARTIGO 1 - Identificação de vazamentos em tubulações de concreto não pressurizadas pelo uso de métodos geofísicos

Resumo

A produção de água tratada é um serviço social e vazamentos também estão relacionados a questões de sustentabilidade dos recursos hídricos. Perdas na distribuição de água podem chegar a 40% em certas partes do Brasil e são comuns até mesmo em países europeus, onde, em média, 23% da água não chega ao consumidor final. Diferentes fatores podem causar vazamentos e existem vários métodos para detecção de vazamentos. A maioria dos estudos se concentra na estimativa da quantificação de perdas, sem se preocupar com a localização das falhas, e nos problemas de tubulações pressurizadas em pequenos diâmetros (< 1 m). Este estudo teve como objetivo determinar a utilidade do Radar de Penetração no Solo (GPR) e da Resistividade Elétrica (ERT) na detecção de vazamentos a partir de falhas de uma tubulação de concreto grande (> 1 m) e não pressurizada. Ambos os métodos foram capazes de indicar zonas de solo com características relacionadas a perdas de água, que foram previamente identificadas por análises visuais de falhas na tubulação. A precisão desses métodos depende de fatores ambientais (umidade do solo e granulometria) e do tempo de abertura do vazamento. Neste estudo, as zonas de vazamento variaram de 6 a 15 m na direção horizontal e 2,5 m na direção vertical. As tecnologias geofísicas podem ser úteis para melhorar a gestão dos recursos hídricos, especialmente em áreas com perdas significativas no sistema de abastecimento de água.

Palavras-chave: Abastecimento de água, Vazamentos, GPR, ERT.

Introdução

A produção de água tratada é um serviço social cujos custos aumentam com falhas e perdas em tubulações. Em 2006, o Banco Mundial estimou que cerca de 48 bilhões de m³ de água eram perdidos anualmente em todo o mundo (Reino et al., 2006). Em 2019, esses dados foram atualizados para um valor de 126 bilhões de m³ por ano, o equivalente a US\$ 39 bilhões por ano (LIEMBERGER; WYATT, 2019). Além disso, vazamentos ou perdas de água também estão relacionados a questões de sustentabilidade dos recursos hídricos e potenciais riscos de contaminação da população (PUUST et al., 2010).

As perdas de água nos sistemas de distribuição de água podem chegar a 40% do volume coletado em algumas regiões do Brasil (KARADIREK, 2016), e são comuns até mesmo em países europeus onde, em média, 25% da água tratada não chega ao consumidor final (Federação Europeia dos Serviços Nacionais de Água (THE EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL WATER SERVICES (EUREAU), 2021). As perdas de água ocorrem em praticamente todos os sistemas de distribuição e o volume perdido depende das características da rede de tubulações, do nível de tecnologia e do conhecimento aplicado para o controle de vazamentos (FARLEY; TROW, 2003).

Vazamentos em tubulações podem ser causados por diferentes fatores, incluindo falhas em materiais de tubulação produzidos pelo fluxo de fluido e podem ser classificados em diferentes tipos (inerentes, visíveis e não visíveis) (PUUST et al., 2010). Existem vários métodos para detectar vazamentos em tubulações (SANDBERG et al., 1989) e a precisão na determinação da localização desses vazamentos, principalmente em tubulações subterrâneas, é fundamental para os serviços de manutenção dessas estruturas (CATALDO et al., 2017a)

As características hidráulicas do fluxo de água podem influenciar as características dos vazamentos e a seleção do método para identificação de falhas depende dessas características (DUAN, 2018). Recentemente, foi realizado um trabalho extensivo para investigar esses problemas em redes de tubulações pressurizadas (por exemplo, Mutikanga et al., 2012). Comparativamente, pouca pesquisa foi feita sobre perdas de água em grandes tubulações não pressurizadas (>1 m).

Métodos geofísicos e outros métodos não invasivos podem contribuir para a avaliação de problemas de vazamento mapeando solos acima e ao redor de tubulações enterradas e avaliando diretamente a interação entre solos e tubulações. Entre os métodos não invasivos, o uso de sinais acústicos é o procedimento mais aplicado para detecção de vazamentos (COLOMBO et al., 2009; HUNAIDI; WANG, 2006). Esta abordagem é baseada na propagação de ondas mecânicas junto com o alojamento do tubo e é particularmente recomendada para detecção de vazamentos em tubos pressurizados (CATALDO et al., 2014b). Semelhante a outras técnicas, o desempenho dos métodos acústicos depende do material e do diâmetro dos tubos.

Em tubulações de baixa pressão ou não pressurizadas, medições precisas de locais de vazamento são mais desafiadoras (PUUST et al., 2010). Embora os métodos acústicos sejam menos úteis, os métodos geofísicos ainda podem ser usados para a avaliação de propriedades anômalas do solo, características de vazamentos em tubulações subterrâneas. Entre esses métodos geofísicos estão o radar de penetração no solo (GPR) e a tomografia de resistividade elétrica (ERT). A localização de vazamentos empregando GPR e ERT consiste em identificar as áreas úmidas subterrâneas criadas pela perda de água perto das anomalias das tubulações. ERT e GPR são particularmente adequados para detecção de vazamentos devido à sua sensibilidade a mudanças na condutividade elétrica e na constante dielétrica do solo circundante, respectivamente (ABOUHAMAD et al., 2016; TSO et al., 2020).

A principal limitação do GPR para detecção de vazamentos é o efeito das heterogeneidades do solo e outras anomalias, como objetos metálicos no solo, que podem resultar em conclusões errôneas (FARLEY, 2008; PUUST et al., 2010). Outra limitação é que, devido à alta atenuação do sinal em solos úmidos, a profundidade da investigação é frequentemente pequena. O desempenho do GPR pode ser expresso em termos de características interdependentes: profundidade máxima de penetração e resolução de profundidade (DAVIS; ANNAN, 1989). A frequência de operação do GPR e as propriedades do meio também são fatores importantes e podem alterar a identificação da separação de camadas em profundidade. Além disso, o sinal de largura de banda do GPR influencia a resolução (NOON et al., 1998). Por outro lado, existem muitas

vantagens do uso do GPR na detecção de vazamentos de água (LAI et al., 2016) para tubos não metálicos, o principal fator que altera a velocidade do sinal da onda de radar e a força de reflexão é a água; 2) o GPR permite imagens de áreas subterrâneas em múltiplas dimensões com alto nível de detalhes; 3) alta eficiência na coleta de dados.

O uso de ERT para falhas em dutos tem aumentado em estudos sobre investigações ambientais (LEE; OH, 2018). As limitações desta técnica incluem a presença de anomalias no subsolo que podem levar à interpretação errônea dos dados, bem como a precipitação que pode causar fortes variações na resistividade do solo (MOJICA et al., 2013). No entanto, a resistividade elétrica raramente é influenciada pelo tráfego ou ruídos acústicos, e as medições de resistividade do subsolo para detectar vazamentos em tubulações enterradas são uma alternativa interessante porque são menos dispendiosas do que métodos baseados em amostragem de solo e tomografia de poço (JORDANA et al., 2001).

Considerando os desafios restantes na detecção de perdas de água de tubulações de distribuição de água não pressurizadas, conforme identificado acima, este artigo tenta avaliar a utilidade de métodos geofísicos para detecção de vazamentos. Com base em pesquisas anteriores, focamos no uso de métodos de GPR e resistividade elétrica para o estudo de vazamentos associados a uma grande tubulação de concreto (> 1 m), cujo fluxo hidráulico é uma superfície livre (ou seja, não pressurizada). O sistema hidráulico escolhido transporta água tratada do Rio das Velhas (Brasil) e é responsável pelo abastecimento de água de cerca de 2,4 milhões de pessoas, o que compreende 40% dos habitantes da Região Metropolitana de Belo Horizonte (COPASA, 2011).

Materiais e Métodos

Área de estudo

A tubulação escolhida transporta água tratada da estação de abastecimento do Rio das Velhas. A tubulação tem cerca de 18 km de extensão e atravessa os municípios de Belo Horizonte, Nova Lima, Raposos, Santa Luzia e Sabará, onde deixa água tratada para 2,4 milhões de habitantes. Ao longo de seu percurso, a tubulação possui diferentes materiais e diâmetros, dependendo

das características hidráulicas do fluxo interno do fluido. Ela é enterrada na maior parte de seu comprimento. O concreto armado é o material mais frequentemente usado nesta tubulação e, nessas partes, a gravidade impulsiona o fluxo hidráulico. A construção deste sistema de abastecimento de água começou em 1958 e foi concluída em 1979 (COPASA, 2011).

Para este estudo, foram selecionados três vazamentos detectados anteriormente. Nos locais estudados, o solo de cobertura foi removido uma semana antes dos testes GPR e ERT para permitir a manutenção (Figura 4.1). Em todos os três locais, o diâmetro da tubulação é de 2,4 m e ainda havia água vazando visivelmente da tubulação. Somente no local V0 a empresa de abastecimento de água adotou algumas ações de manutenção antes dos levantamentos geofísicos.

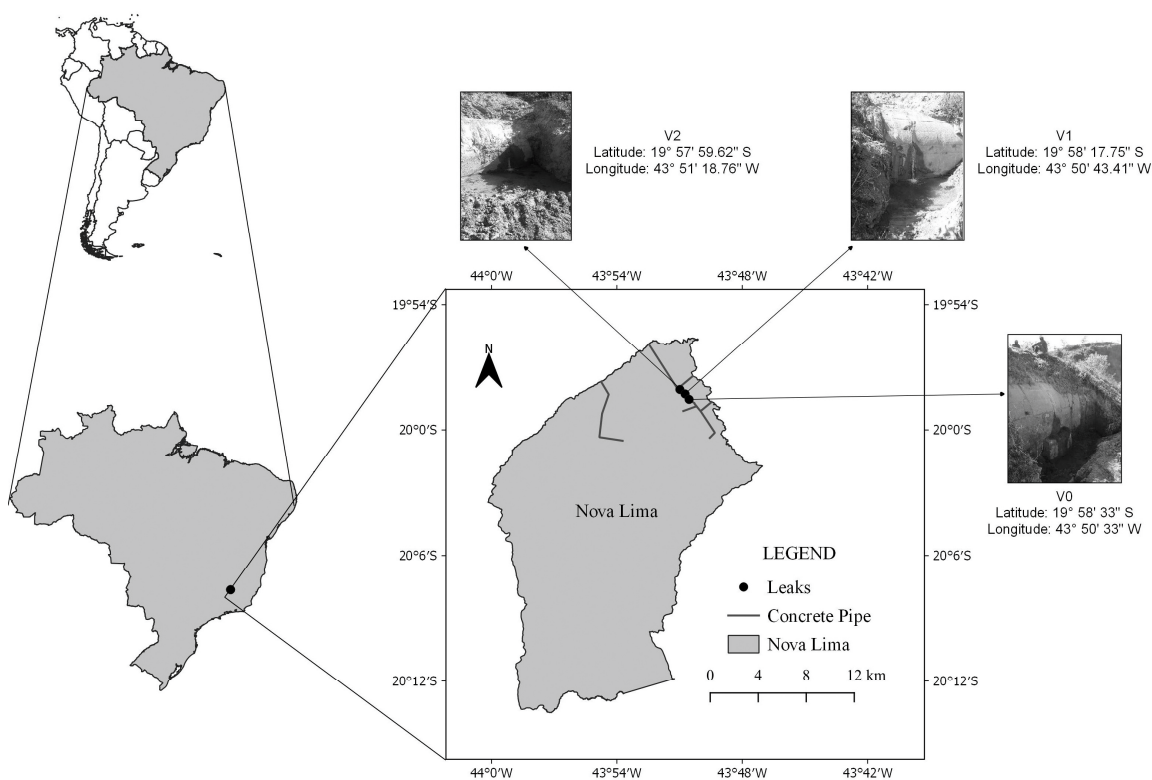


Figura 4.1 Localização do local do estudo e pontos de vazamento V0, V1 e V2.

Levantamento geofísico

Os três vazamentos foram estudados com dois métodos geofísicos diferentes (GPR e resistividade elétrica - Tabela 4.1). A definição das datas de medição evitou períodos chuvosos com solos úmidos. No entanto, o levantamento de resistividade elétrica do vazamento V2 foi realizado após um

dia com pequena quantidade de precipitação (em torno de 10 mm - Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Coletas de campo realizadas, com suas respectivas datas.

Pontos de Vazamento	Data	Precipitação no dia anterior	Resistividade elétrica	GPR
V0	Maio 11 de 2018	Não	Sim	Não
V1	Setembro 13 de 2018	Não	Sim	Sim
	Setembro 17 de 2018	Sim (10 mm)	Não	Não
V2	Setembro 13 de 2018	Não	Não	Sim
	Setembro 17 de 2018	Sim (10 mm)	Sim	Não

Os perfis geofísicos foram coletados ao longo da área de declive (perfis indicados na figura 4.2) na qual a tubulação está enterrada (figura 4.3). A presença de vegetação foi uma limitação para manter o mesmo comprimento de perfil (por ambos os métodos) em ambos os pontos de levantamento. No ponto V2, também foi possível realizar a aquisição de dados de GPR na plataforma acima da tubulação.



a



b

Figura 4.2 - Aquisição de dados geofísicos usando (a) equipamento ERT e (b) GPR em locais de vazamento V1 e V2, respectivamente. As linhas pretas correspondem aos perfis ERT e GPR.

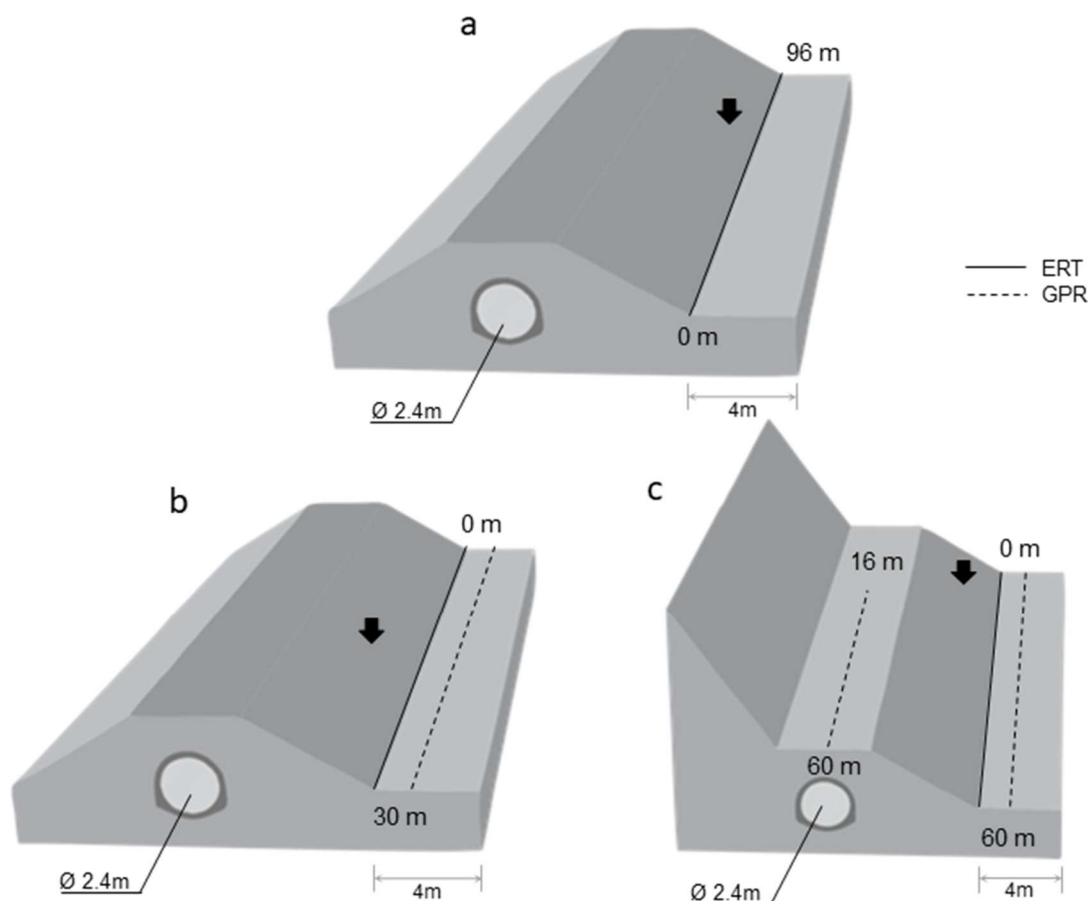


Figura 4.3 - Perfis de GPR e resistividade elétrica, (a) em V0, (b) em V1 e (c) em V2. As setas indicam o local do vazamento.

Resistividade elétrica

O eletrorresistivímetro ABEM SAS 1000 foi utilizado para coleta de dados ao longo dos perfis longitudinais. O sistema possui um canal de entrada que registra a diferença de potencial para pares de eletrodos ao longo de um cabo multi-eletrodo. O cabo era composto por dois segmentos com 32 saídas de eletrodos cada. A disposição de medição escolhida foi Dipolo-Dipolo (configurações de ERT no Material Suplementar). Esta configuração foi adotada porque possui boa sensibilidade para variações laterais (DAHLIN; ZHOU, 2004). Os parâmetros que controlam o espaçamento (a) variaram de 1 a 6 m e o espaçamento máximo das disposições (n) variou de 1 a 4 m. Os dados de campo de resistividade aparente foram modelados no software Res2dInv versão 2.16 (Geotomo Software, Malásia), determinando um modelo de resistividade bidimensional para o meio. A abordagem de lapso temporal baseada em modelos cruzados implementada neste software inverteu os valores de

resistividade aparente nos perfis V0, V1 e V2. Isso corresponde a inversões matemáticas resultantes da aplicação do método de suavização de mínimos quadrados (LOKE; BARKER, 1996). A diferença entre os valores de resistividade calculados e medidos no modelo foi dada pelo erro quadrático médio (RMSE) (Eq. (4.1)):

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\rho_c - \rho_m)^2} \quad 4.1$$

onde ρ_c é a resistividade aparente calculada, ρ_m é a resistividade medida, e n é o número de pontos pesquisados (DE MORAIS et al., 2008).

Seis iterações foram aplicadas para inverter os dados e alcançar um RMSE estável e evitar o sobre ajuste (LOKE; BARKER, 1996).

No ponto de vazamento V0, os dados foram coletados ao longo de uma linha com 96 eletrodos (um segmento de rolo) com espaçamento de um metro (comprimento do perfil de 95 m). A intensidade da corrente utilizada foi de 50 mA, o ciclo de onda 0,2 s, e no total foram realizados 15 níveis de investigação. Esta linha foi adquirida principalmente para testar os procedimentos de campo e verificar a qualidade dos dados; medidas recíprocas foram coletadas para aproximadamente 77% dos pares de potencial de eletrodo. Uma vez que o erro absoluto, apresentado nos perfis de pseudoseção (resultado de resistividade elétrica), não considera a ordem de grandeza, uma correlação de Pearson foi realizada entre as duas medidas coletadas no ponto V0. A correlação de determinação (R^2) foi calculada entre a coleta principal e recíproca pelo Res2DInv (Figura 4.4).

No ponto de vazamento V1, os dados foram coletados ao longo de uma linha com 64 eletrodos espaçados a cada meio metro (comprimento do perfil de 31,5 m). No ponto de vazamento V2, os dados foram coletados ao longo de uma linha com 64 eletrodos com espaçamento de um metro (comprimento do perfil de 63 m). Para ambos os perfis, a amplitude da corrente utilizada foi de 10 mA, o ciclo de onda foi de 0,2 s e houve um total de 15 níveis de investigação.

GPR

O equipamento utilizado para coletar os perfis GPR tinha pares de

antenas blindadas de 100 e 200 MHz, produzidas pela GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) modelo SIR 3000. As configurações de parâmetros GPR foram definidas pelo meio, comprimento de onda e condições de penetração (tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Configurações usadas para coleta de dados com GPR

Antennas		
	100MHz	200MHz
Transmit rate	25 kHz	100 kHz
Samples	256	512
Range (ns)	200	200
Rate	55	120
Scans/m	50	100
Gain	Manual, 1pt, -6dB	Manual, 1pt, -6dB
HP_IIR	20	20
LP_IIR	800	800
FIR (HP/LP)	0	0
Stacking	0	0

O Reflexw 2D versão 8.0.2 (Sandmeier geophysical research, Alemanha) e o Radan® 7 (GSSI - Geophysical Survey Systems, Inc., EUA) foram usados para processar os dados coletados. As etapas de processamento utilizadas foram: análise de espectro de frequência, filtragem dewow, correção de tempo zero, traços de janela e aplicação de uma função de ganho personalizada.

Análise do solo

As análises das características físicas do solo foram realizadas para auxiliar na interpretação dos dados geofísicos e consistiram em testes de granulometria por peneiramento, laser, medição de umidade e determinação de massa específica. Os pontos onde as amostras de solo foram coletadas correspondem aos pontos V1 e V2 (Figura 4.1). A coleta de solo foi realizada em 13 de setembro de 2018, no mesmo dia da coleta de dados GPR. No processo de preparação para a caracterização, a amostra foi secada ao ar até atingir a umidade higroscópica, em seguida, os torrões foram desmontados e a amostra foi homogeneizada.

O teste de análise granulométrica foi realizado por peneiramento (de

acordo com (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016a) e usando peneiras de grade de 25,4 mm, 19,1 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,0 mm, 1,8 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm). Para o teste de granulometria a laser, foi utilizado o granulômetro Cilas 1090 e amostras de solo, que passaram pela peneira de 0,075 mm.

O teste de umidade foi realizado de acordo com as Normas Técnicas Brasileiras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, 2016b) ao tomar três amostras de solo que passaram pela peneira de 4,8 mm (50 g cada). Após a secagem, as amostras foram pesadas e os cálculos para determinar o teor de umidade foram realizados. O resultado obtido é a média dos resultados das três amostras e permite a avaliação das diferenças de umidade entre os pontos de vazamento.

A avaliação da massa específica foi conduzida de acordo com as Normas Técnicas Brasileiras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016b). As amostras que foram previamente secas foram homogeneizadas e 50 g de solo foram pesados para cada análise realizada. A massa específica do solo (g/cm³) foi calculada (Eq. (4.2)):

$$\rho_{soil}^* = \frac{M_1 \times \frac{100}{100 + W}}{\left(M_1 \times \frac{100}{100 + W}\right) + M_3 - M_2} \times \rho_{H_2O}^* \quad 4.2$$

onde M_1 (g) é a massa do solo úmido, M_2 (g) é a massa do picnômetro + solo + água à temperatura T (°C) do teste, M_3 (g) é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência da temperatura do teste T (°C), W (%) é a umidade inicial da amostra, ρ_{H_2O} é a massa específica da água, na temperatura de teste T (°C).

Resultados

Para a interpretação dos resultados de ERT, focou-se em áreas com valores de resistividade mais baixos em profundidades correspondentes à posição do tubo. Para considerar variações locais nas condições do solo, valores mais baixos de resistividade considerados indicativos de solos úmidos (e, portanto, potencialmente vazamentos) foram selecionados para cada perfil ERT individualmente.

Para a interpretação dos dados de GPR, focou-se nas localizações com

maior atenuação de sinal e mudanças de amplitude de reflexão nos radargramas, como seria de esperar para mudanças laterais no conteúdo de água lateralmente ou verticalmente. O comportamento exato depende da profundidade onde ocorrem as mudanças no conteúdo de água, da magnitude dessas mudanças e das propriedades do material.

Os resultados de GPR e ERT não podem ser comparados diretamente. Para dados de GPR, as mudanças posteriores na atenuação do sinal podem ser mais estreitas do que as zonas de menor resistividade nos resultados de ERT. Isso se deve em parte aos efeitos de suavização como parte do processo de inversão de dados de ERT. No caso de diferenças verticais no conteúdo de água, o GPR é menos adequado devido à profundidade de investigação mais limitada em comparação com o ERT.

Análise de erro de resistividade elétrica

A correlação de Pearson (Figura 4.4) entre os resultados da coleta principal e recíproca foi muito forte ($R^2 = 0,99$; 431 pontos), excluindo os valores atípicos. A presença de valores atípicos foi de apenas 1,16% dos dados.

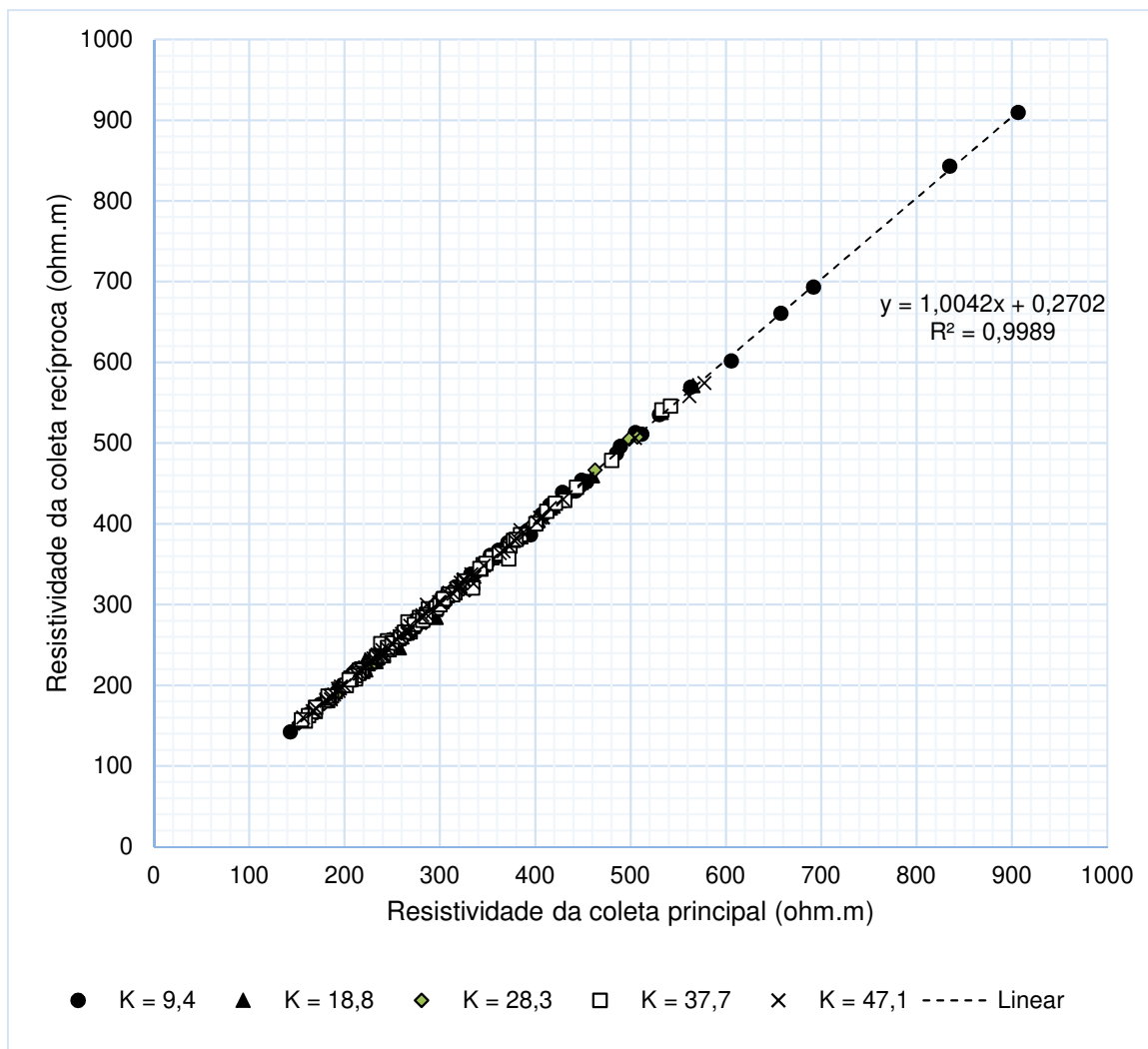


Figura 4.4 Correlação de Pearson para os dados do campo de resistividade elétrica V0, onde K é o fator geométrico.

A comparação dos perfis de ERT coletados no ponto V0 (coleta principal e recíproca) mostrou que os padrões de alternância entre resistividade aparente alta e baixa foram mantidos, além de apresentarem um erro absoluto semelhante. As áreas mais profundas do perfil de resistividade elétrica apresentaram valores mais altos em ambos os perfis. Os modelos de resistividade mostram a presença de zonas alternadas de resistividade mais alta e mais baixa, o que provavelmente está relacionado à geologia variável e à profundidade até o substrato rochoso, incluindo possíveis zonas de fratura. A não identificação de vazamentos nos perfis de resistividade elétrica pode indicar que as medidas de manutenção adotadas pela empresa de abastecimento de água foram eficazes.

A resistividade aparente das coletas principais e recíprocas obtidas no

ponto V0 foram semelhantes (Figura 4.5). Elas apresentaram resistividade aparente alta ($> 300 \Omega.m$) no meio do perfil (aproximadamente x 48 m) e nas extremidades de ambas as linhas. O RMSE foi de 5,4%.

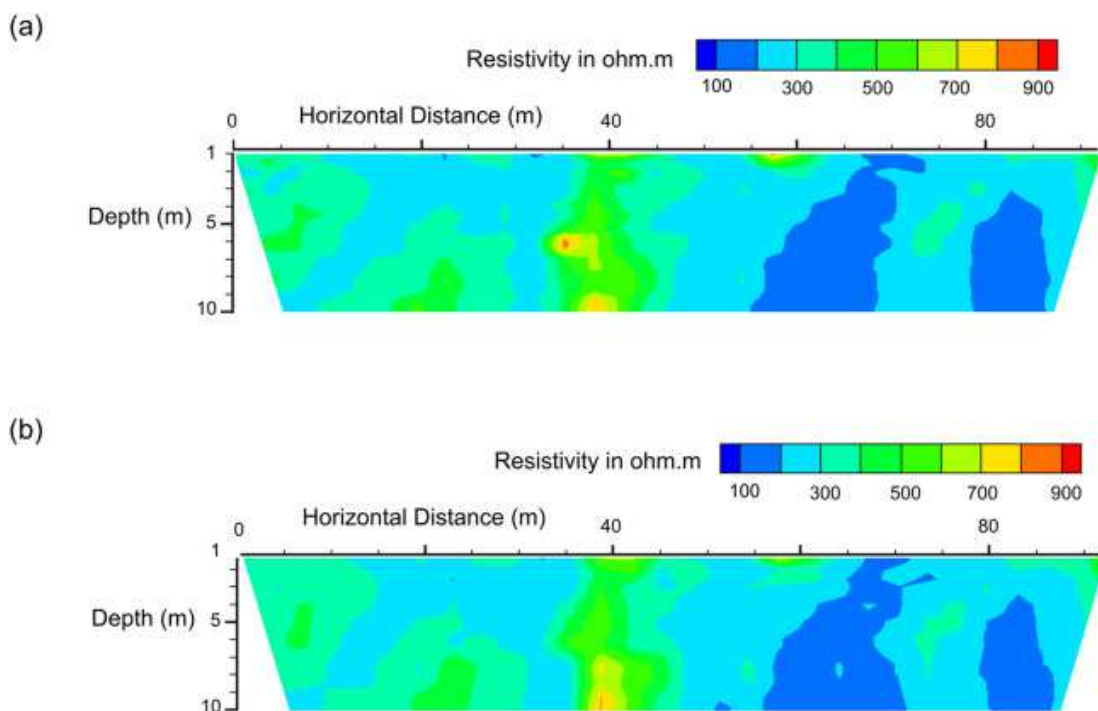


Figura 4.5 (a) Seção de pseudoprodutividade de resistividade aparente coletada em V0 para a coleção principal. (b) Seção de pseudoprodutividade de resistividade recíproca aparente coletada em V0.

Deteccção de vazamentos por geofísica

No perfil de ERT V1, a faixa de valores de resistividade foi de 1,3 – 1505 $\Omega.m$ (figura 6a). Esses valores de resistividade variaram com a profundidade, com os valores de resistividade mais baixos em locais mais rasos ($< 1,5$ m) (figura 4.6a). As áreas com os valores mais altos de resistividade estão relacionadas a zonas de rocha-mãe e, portanto, com baixa presença de água no meio. No entanto, a zona esquerda do perfil de ERT V1 apresentou apenas uma camada com baixos valores de resistividade (entre 38 e 90 $\Omega.m$), relacionada à área profunda do vazamento de água, mas não previamente localizada pela empresa de água. O RMSE para o perfil do ponto V1 foi de 6,4%.

No perfil de resistividade do ponto de vazamento V1, foram identificadas três zonas com resistividade mais baixa (aproximadamente 35 a 90 $\Omega.m$), da esquerda para a direita: a primeira tinha 4,5 m de largura; a segunda tinha 6 m; e a terceira tinha 5 m (figura 4.6a). A primeira zona alcançou a maior profundidade

(aproximadamente 2,5 m). Apenas a segunda zona estava relacionada ao vazamento previamente localizado (figura 4.6a).

No V1, o sinal de GPR teve uma amplitude relativa alta até uma profundidade de 4 m e o sinal foi atenuado na zona média do radargrama (figura 4.6b), que corresponde à segunda zona de baixa resistividade no perfil ERT V1. A largura horizontal dessa zona foi de 6,5 m. Algumas camadas foram identificadas no radargrama V1, que podem estar relacionadas à heterogeneidade composicional do subsolo, ou outra composição ou compactação de material que causou essa perturbação (figura 4.6b). As duas hipérboles no perfil GPR V1 podem indicar material com diferente compactação.

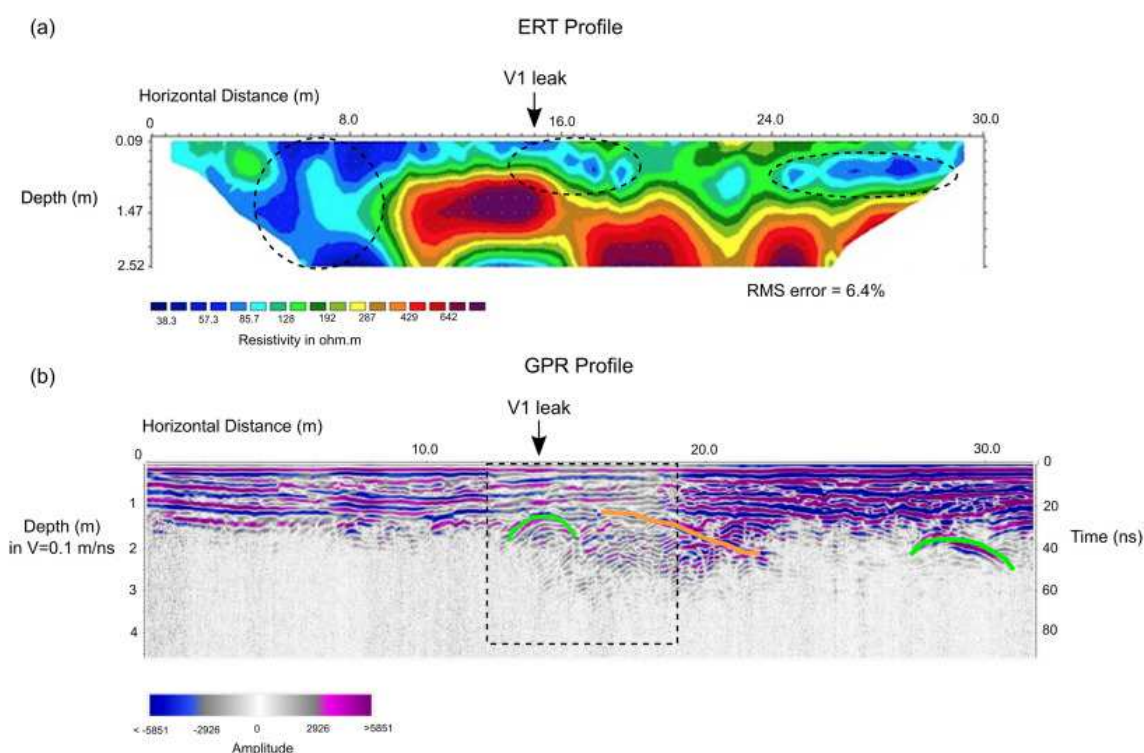


Figura 4.6 Resultados geofísicos para o ponto de vazamento V1: (a) Seção do modelo de resistividade com áreas de baixa resistividade indicadas por círculos pretos tracejados. A resistividade mais baixa foi considerada como sendo aproximadamente 35 a 90 Ω .m. O espaçamento do eletrodo unitário foi de 0,5 m; (b) Radargrama obtido com antenas de 200 MHz, com a área de atenuação de sinal aumentada marcada por um retângulo tracejado. A seta preta representa um vazamento previamente localizado por meio de inspeção visual. A linha laranja está relacionada a camadas provavelmente com diferenças na compactação do solo ou composição do material. A linha verde indicou duas hipérboles.

No perfil de ERT V2, os valores de resistividade variaram de 5 a 1714 Ω .m (figura 4.7a). A camada de valores de resistividade foi identificada na profundidade também como no perfil V1. A camada de resistividade mais alta (maior que 300 Ω .m) estava em profundidade de 1,5 m a 4 m. Os valores mais

altos de resistividade estão relacionados a zonas de leito rochoso, bem como áreas com baixa umidade. O RMSE para este perfil foi de 8,1%.

No ponto de vazamento V2, quatro zonas de resistividade mais baixa (aproximadamente 5 a 60 $\Omega.m$) foram identificadas, da esquerda para a direita: a primeira tinha 23 m de largura horizontal; a segunda tinha 9 m; a terceira tinha 4 m e a quarta tinha 1 m (figura 4.7a). Essas zonas alcançaram uma profundidade de aproximadamente 2 m. A primeira zona coincidia com o ponto de vazamento previamente identificado.

O perfil de GPR no ponto de vazamento V2 apresentava alta amplitude relativa até uma profundidade de 2 m e a atenuação da amplitude do sinal em três zonas, do comprimento para a direita: a primeira tinha 1,3 m de largura horizontal; a segunda tinha 16 m; e a terceira tinha 5 m (figura 4.7b). Uma linha quebrada no radargrama V2 pode estar relacionada à heterogeneidade composicional do subsolo, ou outros obstáculos, composição ou compactação do material que causaram essa perturbação (figura 4.7b). A quantidade de água perdida (ou tempo de abertura do vazamento) contribui para a saturação do solo e isso causou desafios para interpretar os perfis de GPR no ponto de vazamento V2.

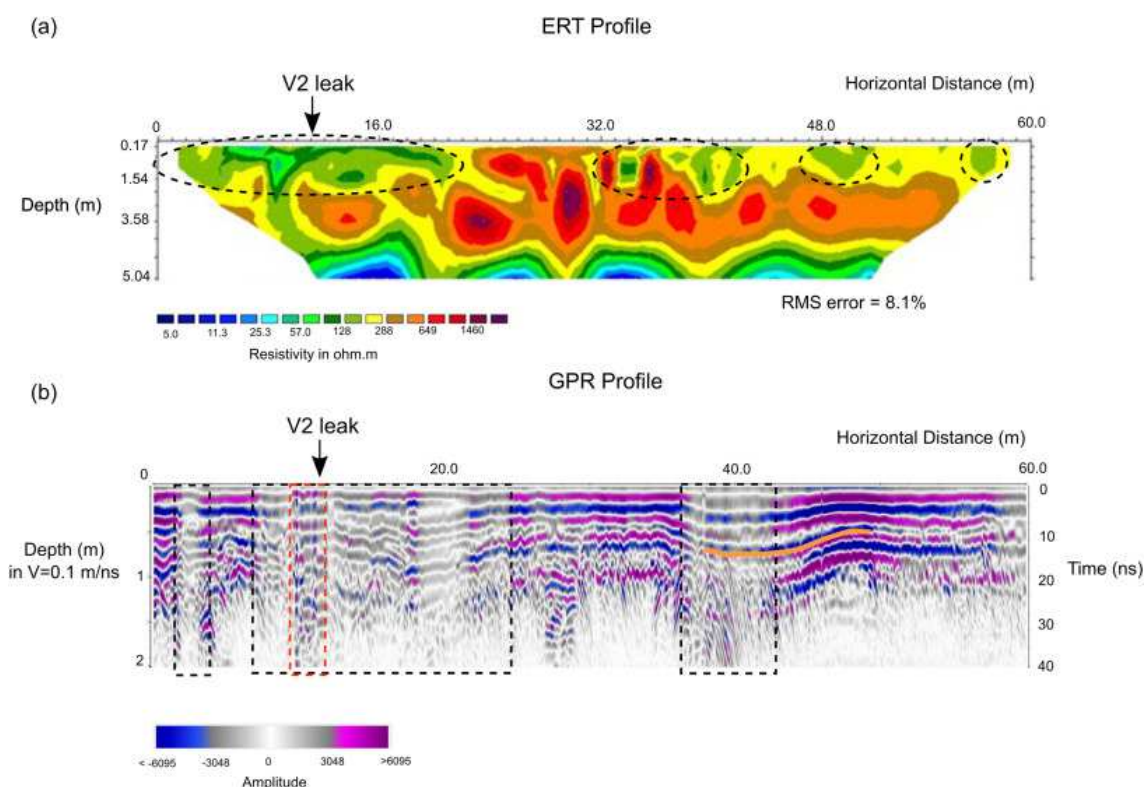


Figura 4.7 Resultados geofísicos para o ponto de vazamento V2: (a) Seção do modelo de resistividade, com áreas de baixa resistividade sendo indicadas por círculos pontilhados pretos.

A resistividade mais baixa foi considerada como sendo aproximadamente 5 a 60 $\Omega.m$. O espaçamento do eletrodo unitário foi de 1 m; (b) Radargrama obtido com antenas de 200 MHz, com retângulos tracejados pretos indicando áreas de maior atenuação do sinal. O retângulo tracejado em vermelho indica o local onde colocamos galhos para cruzar uma área de água parada. A seta preta representa o vazamento localizado anteriormente. A linha laranja está relacionada a camadas provavelmente com diferenças na compactação do solo ou na composição do material.

Análise do solo

O teor de umidade encontrado para as amostras de solo coletadas nos pontos de vazamento V1 e V2 foram semelhantes (1,9% e 2,5%, respectivamente - tabela 4.3), assim como a massa específica (no V2 foi de 2,9 g/cm³ e no V1 foi de 2,8 g/cm³). Apesar dessas semelhanças, houve diferença na análise de tamanho de partículas entre os pontos de vazamento (V1 e V2), obtida pelo método de peneiramento (figura 4.8). Um grande número de finos foi maior no solo V2 (35,5%) do que no solo V1 (17,6%).

Tabela 4.3 - Teor de umidade dos solos coletados em V1 e V2

	Amostra	Teor de umidade (%)
V1	1	1.854
	2	1.854
	3	1.895
V2	1	2.438
	2	2.501
	3	2.438

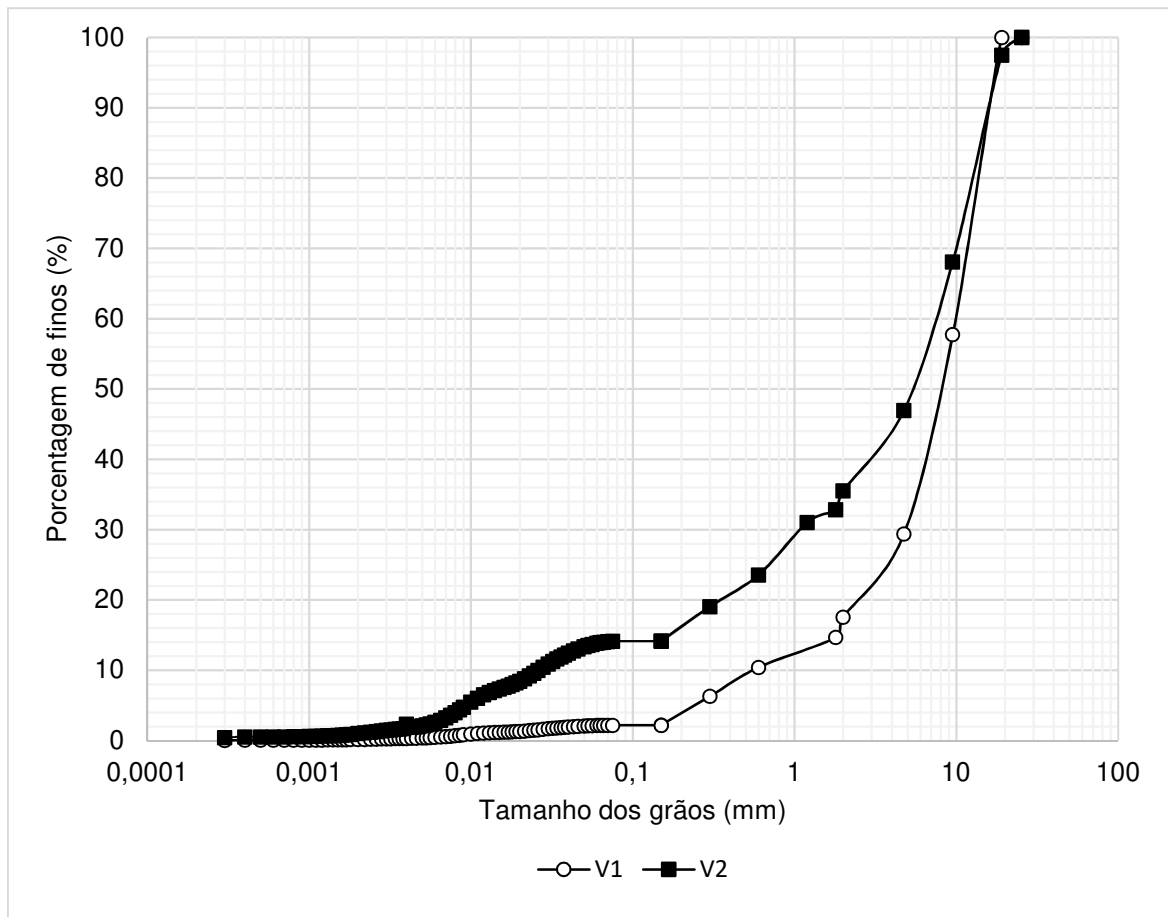


Figura 4.8 Distribuição granulométrica dos solos coletados nos pontos V1 e V2, obtida por ensaio de granulometria e granulometria a laser em analisador CILAS 1090 (condições de medição: modo seco; potência ultrassônica, 50 W; obscurecimento, 5%; difração a laser baseada nas teorias de espalhamento de Fraunhofer).

Discussão

Estudos recentes que utilizam geofísica para detecção de vazamentos têm sido realizados utilizando GPR (LAI et al., 2016; OCAÑA-LEVARIO et al., 2018), reflectometria no domínio do tempo (TDR) (FATEMI AGHDA et al., 2018) e outros métodos (DASHWOOD et al., 2020; FABBIANO et al., 2020; KING-WAH LAU et al., 2021). No entanto, sua aplicação geralmente se concentra em tubulações com pequenos diâmetros e feitas de materiais plásticos (PVC) ou metálicos. Poucos estudos tratam da detecção de vazamentos em estruturas de concreto utilizando tanto GPR quanto ERT (LEE; OH, 2018). No entanto, outros estudos têm trabalhado em compreender vazamentos em outras instalações hidráulicas, como vertedores e pequenas barragens.

Neste trabalho, os locais de vazamento de uma grande tubulação de concreto (> 1 m) e não pressurizada foram identificados tanto pela ERT quanto pela GPR. Dependendo da quantidade de água perdida (ou tempo de abertura

da falha), a saturação do solo pode ocorrer a distâncias significativas do local do vazamento, o que gera desafios para interpretar os perfis da ERT e da GPR, como foi o caso dos resultados da GPR em V2. Conclusões semelhantes são apresentadas por De Coster et al. (DE COSTER et al., 2019), que propõem uma nova ferramenta que visa melhorar a detecção de vazamentos com base na GPR. Neste trabalho, os locais de vazamento em tubulações grandes de concreto (>1 m) e não pressurizadas foram identificados tanto por ERT quanto por GPR. Dependendo da quantidade de água perdida (ou do tempo de abertura da falha), a saturação do solo pode ocorrer a distâncias significativas do local do vazamento, o que gera desafios na interpretação dos perfis de ERT e GPR, como foi o caso dos resultados de GPR em V2. Conclusões similares são encontradas em De Coster et al. (2019), que propõem uma nova ferramenta que visa melhorar a detecção de vazamentos com base em GPR. Neste trabalho, os autores também enfatizam que é necessário ter cuidado durante a fase de interpretação, pois os dados de GPR são influenciados por uma série de fatores ambientais, como textura do solo e teor volumétrico inicial de água, além de fatores e técnicas, como o tipo e orientação do vazamento.

As seções de ERT e os perfis de GPR forneceram informações complementares sobre as condições do solo em profundidade e superficiais, bem como sobre a umidade do solo. Ambos os métodos identificaram zonas de aumento da umidade do solo nos pontos V1 e V2. Os resultados de ERT e GPR foram comparáveis porque as zonas com baixa resistividade aparente (ERT) e aumento da atenuação do sinal de GPR eram principalmente coincidentes. Essas zonas também estavam próximas às áreas de vazamento previamente localizadas por inspeção visual. As pequenas diferenças observadas entre os resultados de ERT e GPR podem estar relacionadas à diferença nos dias de medição, o que pode ter causado mudanças nas características do solo, especialmente em relação à umidade.

As áreas de perdas de água indicadas pela interpretação dos perfis de GPR e ERT tinham 6 m e 15 m de largura horizontal e cerca de 2,5 m de profundidade nas zonas de vazamento V1 e V2, respectivamente. O tamanho dessas áreas é relacionado ao tempo de abertura da falha na tubulação, à taxa de fluxo através do vazamento, bem como às características do solo e às condições de drenagem. O monitoramento contínuo desses pontos de

vazamento por métodos geofísicos pode ajudar no rastreamento de mudanças contínuas na umidade e nas condições de vazamento.

As diferenças obtidas na resistividade entre os dois perfis de ERT, nas camadas superficiais do solo, podem estar relacionadas a diferentes níveis de umidade (chuva no dia anterior ao teste V2 e diferença no teste de umidade), e à composição do solo, que tem a menor granulometria em V2. No entanto, os resultados do teste de solo de laboratório explicaram pouco essas diferenças observadas nos dois pontos e concordamos que fatores como o tempo de abertura do vazamento e a saturação do solo, que não são avaliados neste estudo, podem ter mais poder de explicação da variação de resistividade nos perfis de ERT.

As áreas entre as zonas com solos encharcados no ponto V2 mostraram maior resistividade do que áreas semelhantes no ponto V1, o que pode estar relacionado à presença de material de solo superficial mais fino em V2. Em termos gerais, a interpretação dos perfis de ERT foi complicada pela presença de declives próximos aos locais de vazamento e água contida na superfície em que alguns eletrodos foram inseridos.

O número de zonas com atenuação elevada em GPR é maior do que o número de zonas com baixa resistividade em ERT, principalmente no ponto V2. Isso pode estar relacionado a vários fatores, incluindo diferentes condições do solo nos dias de coleta de dados, e o fato de que o GPR é mais sensível às condições do solo superficial do que ERT. Este último ponto também foi discutido por Bellanova et al. (2020), que concluíram que ERT fornece informações mesmo na presença de camadas muito condutivas, enquanto a propagação do GPR é limitada. Como mostrado por Algeo et al. (2016), o sinal de atenuação do GPR está relacionado tanto com a textura do solo (maior em solos ricos em argila) quanto com a umidade do solo.

Os métodos GPR e ERT podem contribuir para a redução das perdas nos sistemas de abastecimento de água, especialmente em áreas com alta taxa de perdas. O uso contínuo de tecnologias geofísicas pode ser útil para otimizar o uso dos recursos hídricos e para melhorar a gestão do sistema de abastecimento de água.

Conclusão

Este estudo avaliou a utilidade de métodos geofísicos (GPR e métodos de resistividade elétrica) para detecção de vazamentos causados por falhas em uma tubulação de concreto grande (> 1 m) e não pressurizada, cujo fluxo hidráulico é de superfície livre (ou seja, a seção transversal do tubo contém ar e água).

Os dados do GPR e da ERT foram capazes de identificar os locais de vazamento decorrentes de falhas em uma tubulação grande de concreto (> 1 m) e não pressurizada. A precisão dos resultados depende de fatores ambientais (umidade do solo e granulometria) e da duração associada a cada vazamento. Neste estudo, foram identificadas zonas de vazamento com larguras de 6 a 15 m e profundidades de até 2,5 m. As tecnologias geofísicas podem contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos, especialmente em áreas com perdas significativas nos sistemas de abastecimento de água.

Material suplementar

Tabela 4.4 - Configurações usadas para a coleta dos dados com ERT

ERT SETUP	POINTS		
	V0	V1	V2
Spacing of electrodes	1.0 m	0.5 m	1.0 m
Array	Dipole - Dipole	Dipole - Dipole	Dipole - Dipole
Datum Points	1.246	650	581
Minimum Electrode Spacing	1.00	1.00	1.00
Quantity of data levels	15	15	15
Number of Electrodes	96	64	64
First Electrode Point	-31.5	-15.75	-31.5
Last Electrode Point	63.50	15.75	31.5
Minimum Apparent Resistivity Value	49033	13.31	50.88
Maximum Apparent Resistivity Value	1304.071	15055.51	17146.97
Minimum Geometric Factor Value	18.8	9.4	18.8
Maximum Geometric Factor Value	942.5	471.2	942.5
Average Geometric Factor Value	266.5	127.5	253.2

5 ARTIGO 2 - Métodos geofísicos: Eficiência e abrangência na identificação de vazamentos

Introdução

Quando se trata de escassez hídrica, existem diversos instrumentos, mecanismos e tecnologias que vêm sendo desenvolvidos para tratar essa questão. A criação e atualização de planos básicos de controle e preservação de suprimento da água como recurso natural dentro de um cenário atual, e de médio e longo prazo, são de fundamental importância para a mitigação deste problema (PHILIPPI JR., 2003; TUCCI, 2006).

Os sistemas de abastecimento são dimensionados para o fornecimento constante de água em quantidade suficiente às demandas dos usuários e com pressão hidrostática e qualidade de água em valores mínimos estabelecidos por legislações locais. Dessa forma, a possível falha de alguns componentes (por exemplo, tubos, válvulas ou bombas) ,nos sistemas de distribuição de água é considerada no projeto em termos de quantidade, qualidade e pressão de água para seu funcionamento adequado, mesmo em caso de comprometimento de algum componente individual (MAYS, 1996). Entretanto, tem-se que essa situação não é eficiente, pois considera projetos superdimensionados em função de falhas individuais de componentes do sistema de distribuição.

As perdas totais de água correspondem à diferença entre o volume total de água produzido nas estações de tratamento de água e à soma dos volumes recebidos nas residências (e medidos por equipamentos chamados hidrômetros). Essas perdas, podem ser classificadas como reais ou aparentes. A perda aparente é toda água que não é medida, seja por ligação clandestina, erros de medição etc. Por sua vez, a perda real é uma perda física ocasionada por vazamentos ou transbordamentos existentes nas estruturas que compõem o sistema de abastecimento de água (GONÇALVES; ALVIM, 2007). Estima-se que mundialmente a perda total entre as estações de tratamento e os consumidores finais tipicamente varia entre 20 e 30% da produção (HUNAIDI et al., 2000). Em algumas partes do Brasil, as perdas de água nos sistemas de distribuição de água podem chegar a 40% do volume coletado (KARADIREK, 2016), e são comuns até em países europeus onde, em média, 25% da água tratada não chega ao consumidor final (THE EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL

WATER SERVICES (EUREAU), 2021). A perda de água ocorre em praticamente todos os sistemas de distribuição e o volume da perda depende das características da rede de dutos, do nível de tecnologia e do conhecimento aplicado para o controle de vazamentos (FARLEY; TROW, 2003).

É impossível, portanto, que as perdas reais sejam eliminadas completamente. No entanto, elas podem e devem ser administradas de forma que fiquem dentro dos limites econômicos (THORNTON et al., 2008), sendo esse um dos maiores desafios no gerenciamento de sistemas de água mundialmente. Portanto, a localização de vazamentos em tubos subterrâneos é uma das etapas cruciais para a otimização do uso de recursos hídricos, pois o vazamento geralmente é o maior componente de perda de distribuição (CATALDO et al., 2017b).

Neste trabalho, o conceito de vazamento utilizado será o de abertura ou local, por onde a água escorre ou vaza. Diversos tipos de vazamentos (inerentes, visíveis e não visíveis) podem ocorrer em tubulações, e por isso, existem também diversas formas de detectar e analisar cada tipo de vazamento (SANDBERG et al., 1989).

Os avanços nas pesquisas de detecção de vazamentos cresceram notavelmente, principalmente após os anos 2000. A partir desta data, houve o aumento da conscientização da importância da conservação e escassez dos recursos hídricos, além do surgimento de novas tecnologias que são capazes de facilitar e automatizar o processo de detecção de vazamentos. Existem, portanto, diversas formas de detecção de vazamentos em tubulações, que vão desde a utilização de traçadores, equipamentos acústicos e eletromagnéticos até o balanço de massa e volume na rede e observação da vegetação presente na região onde as tubulações estão assentadas (EL-ZAHAB; ZAYED, 2019).

Os métodos geofísicos e outros métodos não invasivos podem contribuir para o mapeamento do solo e mesmo a interação solo-tubulação em problemas de vazamentos. Entre os métodos não invasivos, a utilização de sinais acústicos é o procedimento mais aplicado para a detecção destes problemas (COLOMBO et al., 2009; HUNAIDI; WANG, 2006) e baseiam-se na propagação de ondas mecânicas. À semelhança de outras técnicas, o desempenho dos métodos acústicos depende do material e do diâmetro dos tubos. Este método é recomendado para tubulações pressurizadas, aquelas onde o tubo é

inteiramente preenchido pela água e a pressão é maior do que a atmosfera (CATALDO et al., 2014a). Quando as tubulações possuem baixa pressão ou não são pressurizadas, como é o caso das tubulações construídas em concreto, as detecções de vazamentos são mais difíceis de serem realizadas por meio de métodos acústicos e por balanço de pressão (PUUST et al., 2010).

Assim, o presente trabalho pretende analisar criticamente, por meio de uma revisão sistemática da literatura, como a aplicação de métodos geofísicos métodos não invasivos pode contribuir para o mapeamento de vazamentos em tubulações de água. Diante disso, tem-se essa pesquisa procura analisar a correlação entre tipos de materiais da tubulação, funcionamento do sistema hidráulico e técnicas de detecção de vazamentos.

Metodologia

Para realizar a seleção do portfólio bibliográfico, base para a realização da revisão sistemática da literatura, foi utilizado o método ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist), desenvolvido por Ensslin et al. em 2010. O método é baseado na definição das delimitações amostrais construídas a partir do conhecimento do pesquisador e/ou de publicações claramente identificadas com o estado da arte do tema pesquisado (ENSSLIN et al., 2010). No presente estudo, o ProKnow-C foi utilizado para obter dados e informações relacionadas a aplicação de métodos geofísicos para detecção de vazamentos em tubulações enterradas. Para a seleção dos artigos do portfólio bibliográfico foram realizadas: i) A definição dos eixos de pesquisa e palavras chave; ii) A escolha das bases de dados; iii) Etapas de seleção dos artigos.

Os eixos da pesquisa e as palavras-chave utilizadas são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 5.1 - Eixos de pesquisa e palavras-chave utilizados para a realização da revisão sistemática da literatura da tese

Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
Abastecimento de água	Detecção de vazamento	Métodos geofísicos
water pipe	leak detection	geophysics methods
water pipeline	leakage monitoring	geophysics prospecting

Dessa forma a combinação utilizada para as pesquisas nas bases de dados foi: "water pipe*" AND leak AND (detection OR monitoring) AND geophysics AND (methods OR prospecting). Para selecionar o portfólio bibliográfico foram consultadas 34 bases de dados presentes na subárea de Engenharia Civil do site Periódicos Capes, foram consideradas bases de texto completo e de referenciais com resumos.

Depois de eliminados os arquivos redundantes, filtrou-se os documentos, conforme o método Proknow-c, de forma a se obter o estado da arte do tema proposto. Essa filtragem foi realizada segundo os seguintes critérios, respectivamente: de acordo com o alinhamento do título do artigo, pelo reconhecimento científico do artigo, de acordo com o alinhamento do resumo do artigo. Dessa forma tem-se o portfólio de artigos final, onde estarão contidos apenas os artigos que estão alinhados com o tema e objetivo da pesquisa (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

Análise dos Resultados

Ao final do processo de triagem foram selecionados 87 artigos, que são apresentados na tabela (tabela 5.2). Os dados obtidos com a aplicação do método utilizado, isto é, o método ProKnow-C, foram analisados de acordo com:

- ano de publicação dos artigos;
- periódicos em que os artigos do portfólio foram publicados;
- características da tubulação analisada (material e funcionamento hidráulico);
- método de detecção utilizado;
- tipo de análise realizada e;
- relação entre as palavras-chave dos artigos.

Ao final, foi realizada uma análise F.O.F.A com os principais pontos apresentados nos artigos que trataram dos métodos geofísicos para vazamento em tubulações.

Tabela 5.2 - Artigo selecionados para compor a base de dados analisada

	ARTIGO	AUTORES	ANO	CITAÇÕES	REVISTA	TIPO DE TUBULAÇÃO	TÉCNICA	FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO	TIPO DE ANÁLISE
1	3D mapping of buried underworld infrastructure using dynamic Bayesian network based multi-sensory image data fusion	Ritaban Dutta, Anthony G. Cohn, Jen M. Muggleton	(2013)	37	Journal of Applied Geophysics	Plástico	Acústica e GPR	Afogado	Simulação e campo
2	A comparison of time delay estimators for the detection of leak noise signals in plastic water distribution pipes	Y Gao, MJ Brennan, PF Joseph	(2006)	215	Journal of sound and vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
3	A field implementation of linear prediction for leak-monitoring in water distribution networks	RA Cody, S Narasimhan	(2020)	18	Advanced Engineering Informatics	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
4	A laboratory-based leak noise simulator for buried water pipes	M.K. Iwanaga, M.J. Brennan, F.C.L Almeida, O. Scussella, S.O. Cezar	(2022)	3	Applied Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
5	A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes	Y. Gao, M.J. Brennan, P.F. Joseph, J.M. Muggleton, O. Hunaidi	(2004c)	258	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
6	A novel method for the remote condition assessment of buried pipelines using low-frequency axisymmetric waves	JM Muggleton e E Rustighi	(2016)	6	Journal of Physics: Conference Series	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
7	A novel sensor for measuring the acoustic pressure in buried plastic water pipes	J.M. Muggleton, M.J. Brennan, R.J. Pinnington, Y. Gao	(2006)	43	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
8	A shear wave ground surface vibration technique for the detection of buried pipes	JM Muggleton, B Papandreou	(2014)	26	Journal of Applied Geophysics	Plástico e Metal	Acústica	Afogado	Campo
9	A study of accelerometer signal decay in small pipelines	S El-Zahab, I Jazzar, T Zayed	(2022)	0	Signal, Image and Video Processing	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
10	A virtual pipe rig for testing acoustic leak detection correlators: Proof of concept	M.J. Brennan, F. Kroll de Lima, F.C.L. de Almeida, P.F. Joseph, A.T. Paschoalini	(2016)	29	Applied Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
11	Amplitude distortion of measured leak noise signals caused by instrumentation: Effects on leak detection in water pipes using the cross-correlation method	M.J. Brennan, Y. Gao, P.C. Ayala, F.C.L. Almeida, P.F. Joseph, A.T. Paschoalini	(2019)	17	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação e laboratório
12	An accelerometer-based leak detection system	Samer El-Zahab, Eslam Mohammed Abdelkader, Tarek Zayed	(2018)	112	Mechanical Systems and Signal Processing	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
13	An analytical model of ground surface vibration due to axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes	Y Gao, JM Muggleton, Y Liu, E Rustighi	(2017c)	24	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
14	An improved cross-correlation method based on wavelet transform and energy feature extraction for pipeline leak detection	S Li, X Wang, M Zhao	(2015)	5	Smart structures and systems	Metal	Acústica	Afogado	Simulação
15	Application of acoustic intelligent leak detection in an urban water supply pipe network	Zhang Xue; Lin Tao; Jiang Fuchun; Edmund Riehle; Hu Xiang; Ni Bowen; Rajendra Prasad Singh	(2020)	18	Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua	Plástico e Metal	Acústica	Afogado	Campo
16	Application of the Differential Evolutionary Algorithm to the Estimation of Pipe Embedding Parameters	P Lu, S Chen, X Sheng, Y Gao	(2022a)	1	Sensors	Metal	Acústica	Afogado	Simulação
17	Application of the differentiation process into the correlation-based leak detection in urban pipeline networks	Y Gao, Y Liu, Y Ma, X Cheng, J Yang	(2018)	66	Mechanical Systems and Signal Processing	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
18	Autocorrelation Analysis of Vibro-Acoustic Signals Measured in a Test Field for Water Leak Detection	A Martini, A Rivola, M Troncossi	(2018)	57	Applied Sciences	Plástico	Acústica	Afogado	Campo

19	Automatic Leak Detection in Buried Plastic Pipes of Water Supply Networks by Means of Vibration Measurements	A Martini, M Troncosi, A Rivola	(2015)	93	Shock and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
20	Axisymmetric fluid-dominated wave in fluid-filled plastic pipes: Loading effects of surrounding elastic medium	Y Gao, Y Liu, JM Muggleton	(2017b)	34	Applied Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
21	Axisymmetric wave propagation in buried, fluid-filled pipes : Effects of wall discontinuities	JM Muggleton, MJ Brennan	(2005)	44	Journal of Sound and Vibration	Elástico	Acústica	Afogado	Simulação
22	Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: wavenumber measurements in in vacuo and buried pipes	JM Muggleton, MJ Brennan, PW Linford	(2004)	162	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
23	Detecting leaks in buried plastic pipes using correlation technique. Part 2. On the selection of acoustic/vibration sensors	Y Gao, MJ Brennan, P Joseph	(2004a)	2	International Congress on Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
24	Detecting leaks in buried plastic pipes using correlation techniques. Part 1. A model of the correlation function of leak noise	Y Gao, MJ Brennan, P Joseph	(2004b)	8	International Congress on Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
25	Detecting Leaks in Water Distribution Pipes Using a Deep Autoencoder and Hydroacoustic Spectrograms	Cody, Roya A., Bryan A. Tolson, and Jeff Orchard	(2020b)	56	Journal of Computing in Civil Engineering	Metal	Acústica	Afogado	Simulação e laboratório
26	Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 GHz	M Bimpas, A Amditis, N Uzunoglu	(2010)	91	Journal of Applied Geophysics	Plástico e Metal	GPR	Não informado	Campo e laboratório
27	Determining the location of buried plastic water pipes from measurements of ground surface vibration	JM Muggleton, MJ Brennan, Y Gao	(2011)	61	Journal of Applied Geophysics	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
28	Development of a clustering-based model for enhancing acoustic leak detection	El-Zahab, S., Asaad, A., Mohammed Abdelkader, E., Zayed, T.	(2019)	10	Canadian Journal of Civil Engineering	Não informado	Acústica	Afogado	Campo
29	Early-stage leaking pipes GPR monitoring via microwave tomographic inversion	Crococo, L., Prisco, G., Soldovieri, F., Cassidy, N. J.	(2009)	90	Journal of Applied Geophysics	Metal	GPR	Não informado	Simulação
30	Estimating the spectrum of leak noise in buried plastic water distribution pipes using acoustic or vibration measurements remote from the leak	Scussel, O., Brennan, M. J., Almeida, F. C., Muggleton, J. M., Rustighi, E., & Joseph, P. F.	(2021)	24	Mechanical Systems and Signal Processing	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
31	Estimation of the bulk and shear moduli of soil surrounding a plastic water pipe using measurements of the predominantly fluid wave in the pipe	Scussel, O., Brennan, M. J., Muggleton, J. M., Almeida, F. C. L., & Paschoalini, A. T.	(2019)	10	Journal of Applied Geophysics	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
32	Experimental evaluation of a vibration-based leak detection technique for water pipelines	Yazdekhashti, S., Piratla, K. R., Atamturktur, S., Khan, A.	(2018)	75	Structure and Infrastructure Engineering	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
33	Experimental identification of physical parameters of fluid-filled pipes using acoustical signal processing	Pavić, G.	(2006)	18	Applied Acoustics	Metal	Acústica	Afogado	Simulação
34	Experimental investigation into techniques to predict leak shapes in water distribution systems using vibration measurements	Butterfield, J. D., Meyers, G., Meruane, V., Collins, R. P., Beck, S. B.	(2018c)	27	Journal of Hydroinformatics	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação e laboratório

35	Experimental investigation into vibro-acoustic emission signal processing techniques to quantify leak flow rate in plastic water distribution pipes	JD Butterfield, A Krynkin, RP Collins, SBM Beck	(2017)	56	Applied Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
36	Extracting acoustic leakage signals in buried pipes	S Yan, H Yuan, Y Gao, B Jin, L Deng, K Li	(2023)	0	Journal of Applied Geophysics	Metal	Acústica	Afogado	Campo
37	Gene Expression Programming Based Mathematical Modeling for Leak Detection of Water Distribution Networks	IA Tijani, T Zayed	(2022)	12	Measurement	Metal e Metalóide	Acústica	Afogado	Campo
38	GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters	Ocaña-Levario, S. J., Carreño-Alvarado, E. P., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J.	(2018)	25	Journal of Applied Geophysics	Plástico	GPR	Não informado	Laboratório
39	Ground vibration analysis of leak signals from buried liquid-filled pipes: An experimental investigation	Peng Zhang, Junguo He, Wanyi Huang, Yixing Yuan, Chenguang Wu, Jie Zhang, Yongqin Yuan, Pengkun Wang, Baoming Yang, Kun Cheng, Hao Cui, Lingduo Zhang	(2022)	2	Applied Acoustics	Plástico e Metal	Acústica	Afogado	Laboratório
40	Identification of the shear velocities of near surface soils using fundamental leaky torsional guided waves	KJ Park, YG Kim	(2013)	2	Ndt & E International	Metal	Acústica	Não informado	Laboratório
41	Improving the shape of the cross-correlation function for leak detection in a plastic water distribution pipe using acoustic signals	Y Gao, MJ Brennan, Y Liu, FCL Almeida, PF Joseph	(2017a)	68	Applied Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
42	Influence of Pipe Material on the Transmission of Vibroacoustic Leak Signals in Real Complex Water Distribution Systems: Case Study	JD Butterfield, RP Collins, SBM Beck	(2018a)	16	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	Plástico, Metal e Amianto	Acústica	Não informado	Campo
43	Influence of Shear Effects on the Characteristics of Axisymmetric Wave Propagation in a Buried Fluid-Filled Pipe	P Lu, X Sheng, Y Gao, R Wang	(2022b)	3	Chinese Journal of Mechanical Engineering	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
44	Interpretation of Acoustic Field Data for Leak Detection in Ductile Iron and Copper Water-Distribution Pipes	AH Muntakim, AS Dhar, R Dey	(2017)	18	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	Metal	Acústica	Afogado	Campo
45	Investigation of guided wave propagation and attenuation in pipe buried in sand	E Leinov, MJS Lowe, P Cawley	(2015)	172	Journal of Sound and Vibration	Metal	Acústica	Afogado	Laboratório
46	Investigation on the detection of water leaks in small-diameter polyethylene pipes using Acoustic Emission signals	A Martini, M Troncosi, A Rivola	(2016a)	0	WSEAS TRANSACTIONS on FLUID MECHANICS	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
47	Key Factors That Influence the Frequency Range of Measured Leak Noise in Buried Plastic Water Pipes: Theory and Experiment	Scussel, O., Brennan, M. J., de Almeida, F. C. L., Iwanaga, M. K., Muggleton, J. M., Joseph, P. F., & Gao, Y.	(2023)	1	Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
48	Leak Detection in Plastic Water Supply Pipes with a High Signal-to-Noise Ratio Accelerometer	Marmarokopos, K., Doukakis, D., Frantziskonis, G., & Avlonitis, M.	(2018)	33	Measurement and Control	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
49	Leak detection in water distribution pipes using singular spectrum analysis	R Cody, J Harmouche, S Narasimhan	(2018)	33	Urban Water Journal	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
50	Leak Detection in Water-Filled Small-Diameter Polyethylene Pipes by Means of Acoustic Emission Measurements	A Martini, M Troncosi, A Rivola	(2016b)	89	Applied Sciences	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório

51	Leak detection of water distribution pipeline subject to failure of socket joint based on acoustic emission and pattern recognition	S Li, Y Song, G Zhou	(2018)	110	Measurement	Metal	Acústica	Afogado	Laboratório e Simulação
52	Leak Detection Using Flow-Induced Vibrations in Pressurized Wall-Mounted Water Pipelines	MF Mysorewala, L Cheded, IM Ali	(2020)	11	IEEE Access	Plástico, Metal e Amianto	Acústica	Afogado	Simulação
53	Leak identification in non-pressurized concrete pipelines by the use of geophysical methods	TR Caetano, HA Santos, RL van Dam	(2023)	1	Journal of Applied Geophysics	Concreto	ERT; GPR	Não afogado	Campo
54	Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes	JM Muggleton, MJ Brennan	(2004)	124	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
55	Linear Prediction for Leak Detection in Water Distribution Networks	RA Cody, P Dey, S Narasimhan	(2020a)	28	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório e Simulação
56	Locating Leaks in Water Mains Using Noise Loggers	El-Abbasy, M. S., Mosleh, F., Senouci, A., Zayed, T., Al-Derham, H.	(2016)	31	Journal of Infrastructure Systems	Metal	Acústica	Afogado	Laboratório e Simulação
57	Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images	Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Perez-Garcia, R.	(2011)	82	Journal of Applied Geophysics	Plástico, Metal e Amianto	GPR	Não informado	Laboratório
58	Long-Term Monitoring for Leaks in Water Distribution Networks Using Association Rules Mining	J Harmouche, S Narasimhan	(2020)	21	IEEE Transactions on Industrial Informatics	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório e Simulação
59	Low-Cost, Tiny-Sized MEMS Hydrophone Sensor for Water Pipeline Leak Detection	Jinghui Xu, Kevin Tshun-Chuan Chai, Guoqiang Wu, Beibei Han, Eva Leong-Ching Wai, Wei Li, Jason Yeo, Edwin Nijhof, Yuandong Gu	(2019)	57	IEEE Transactions on Industrial Electronics	Plástico e Metal	Acústica	Afogado	Laboratório
60	Modeling and locating underground water pipe leak with microseismic data	J Wang, J Liu, H Liu, Z Tian, F Cheng	(2017)	14	Journal of Applied Geophysics	Metal	Acústica; Sísmica	Não informado	Simulação
61	Novel Leakage Detection and Localization Method Based on Line Spectrum Pair and Cubic Interpolation Search	Guancheng Guo, Xipeng Yu, Shuming Liu, Xiyan Xu, Ziqing Ma, Xiaoting Wang, Yujun Huang, Kate Smith	(2020)	13	Water Resources Management	Metal	Acústica	Afogado	Simulação e Campo
62	On the Acoustic Filtering of the Pipe and Sensor in a Buried Plastic Water Pipe and its Effect on Leak Detection: An Experimental Investigation	Almeida, F., Brennan, M., Joseph, P., Whitfield, S., Dray, S., & Paschoalini, A.	(2014)	86	Sensors	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
63	On the effects of reflections on time delay estimation for leak detection in buried plastic water pipes	Y Gao, MJ Brennan, PF Joseph	(2009)	71	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
64	On the effects of soil properties on leak noise propagation in plastic water distribution pipes	M.J. Brennan, M. Karimi, J.M. Muggleton, F.C.L. Almeida, F. Kroll de Lima, P.C. Ayala, D. Obata, A.T. Paschoalini, N. Kessissoglou	(2018)	40	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação e Campo
65	On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes	M.J. Brennan, M. Karimi, F.C.L Almeida, F. Kroll de Lima, P.C. Ayala, D. Obata, A.T. Paschoalini, N. Kessissoglou	(2017)	18	Procedia Engineering	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação
66	On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes	Gao, Y., Brennan, M., Joseph, P. F., Muggleton, J. M., Hunaidi, O	(2005)	227	Journal of sound and vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Campo

67	Performance comparison of reduced models for leak detection in water distribution networks	G Moser, SG Paal, IFC Smith	(2015)	39	Advanced Engineering Informatics	Metal	IA	Afogado	Simulação
68	Prediction of leak flow rate in plastic water distribution pipes using vibro-acoustic measurements	JD Butterfield, V Meruane, RP Collins, G Meyers, SBM Beck	(2018b)	27	Structural Health Monitoring	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
69	Research on Detection and Location of Fluid-Filled Pipeline Leakage Based on Acoustic Emission Technology	S Pan, Z Xu, D Li, D Lu	(2018)	41	Sensors	Metal	Acústica	Afogado	Laboratório
70	Simplified dispersion relationships for fluid-dominated axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes	Y Gao, F Sui, JM Muggleton, J Yang	(2016)	60	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Simulação e Laboratório
71	Some Recent Research Results on the use of Acoustic Methods to Detect Water Leaks in Buried Plastic water Pipes	Brennan, M. J., Joseph, P. F., Muggleton, J. M., Gao, Y.	(2008)	32	Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
72	Surface wave surveys for imaging ground property changes due to a leaking water pipe	Ben Dashwood, David Gunn, Giulio Curioni, Cornelia Inauen, Russell Swift, David Chapman, Alexander Royal, Peter Hobbs, Helen Reeves, Julien Taxil	(2020)	12	Journal of Applied Geophysics	Não informado	MASW	Não informado	Campo
73	Sustainability Analysis of a Leakage-Monitoring Technique for Water Pipeline Networks	Yazdekhosti, S., Piratla, K. R., Sorber, J., Atamturktur, S., Khan, A., Shukla, H	(2020)	26	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	Plástico, Metal e Ferro Fundido	LDI (Vibrações)	Afogado	Simulação
74	The Dynamic Behaviour of a Buried Water Pipe and its Effect on Leak Location Using Acoustic Methods	de Almeida, F., Joseph, P., Brennan, M., Whitfield, S., Dray, S	(2013)	5	Key Engineering Materials	Plástico	Acústica	Afogado	Campo
75	The effects of resonances on time delay estimation for water leak detection in plastic pipes	Almeida, F. C., Brennan, M. J., Joseph, P. F., Gao, Y., Paschoalini, A. T.	(2018)	38	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acustica	Afogado	Campo
76	Theoretical and experimental investigation into structural and fluid motions at low frequencies in water distribution pipes	Y Gao, Y Liu	(2017)	23	Mechanical Systems and Signal Processing	Plástico e Metal	Acustico	Afogado	Simulação e campo
77	Towards an improvement of GPR-based detection of pipes and leaks in water distribution networks	De Coster, A., Medina, J. P., Nottebaere, M., Alkhalifeh, K., Neyt, X., Vanderdonckt, J., & Lambot, S.	(2019)	39	Journal of Applied Geophysics	Plástico	GPR;Filtro de Antena	Afogado	Laboratório e Simulação
78	Towards an in-situ measurement of wave velocity in buried plastic water distribution pipes for the purposes of leak location	Almeida, F. C., Brennan, M. J., Joseph, P. F., Dray, S., Whitfield, S., Paschoalini, A. T.	(2015)	35	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica;Vibrações	Afogado	Laboratório e Simulação
79	Using a geophone as an actuator to estimate the velocity of leak noise propagation in buried water pipes	Almeida, F. C. L., Brennan, M. J., de Lima, F. K., Iwanaga, M. K., Scussel, O.	(2021)	4	Applied Acoustics	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
80	Vibration monitoring as a tool for leak detection in water distribution networks.	Martini, A., Troncosi, M., Rivola, A.	(2013)	20	International Conference Surveillance	Plástico	Vibrações	Afogado	Campo
81	Vibroacoustic Measurements for Detecting Water Leaks in Buried Small-Diameter Plastic Pipes	A Martini, M Troncosi, A Rivola	(2017)	55	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
82	Wavelets for the Analysis of Transient Pressure Signals for Leak Detection	M Ferrante, B Brunone, S Meniconi	(2007)	147	Journal of hydraulic engineering	Não informado	Integral de "Wavelets"	Afogado	Simulação

83	Wavenumber prediction and measurement of axisymmetric waves in buried fluid-filled pipes: Inclusion of shear coupling at a lubricated pipe/soil interface	JM Muggleton, J Yan	(2013)	64	Journal of Sound and Vibration	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
84	Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection	JM Muggleton, MJ Brennan, RJ Pinnington	(2002)	242	Journal of Sound and Vibration	Plástico e Metal	Acústica	Afogado	Simulação
85	Wavespeed Measurement in Buried Water Distribution Pipes and its Significance in Leak Location	Brennan, M., De Almeida, F., Joseph, P., Dray, S., Whitfield, S.	(2013)	2	Key Engineering Materials	Plástico	Acústica	Afogado	Laboratório
86	A review of methods for leakage management in pipe networks	R. Puust. Z. Kapelan, D.A. Savic, T. Koppel	(2010)	754	Urban Water Journal	Plástico e Metal	Acústica e GPR	Afogado	Campo
87	Paired-IRF Method for Detecting Leaks in Pipe Networks	Zeng, W., Gong, J., Simpson, A. R., Cazzolato, B. S., Zecchin, A. C., Lambert, M. F.	(2020)	22	Journal of Water Resources Planning and Management	Metal	IRF	Afogado	Laboratório

Resultados

Não foi limitado um período para filtrar os artigos. Dessa forma, na lista selecionada há trabalhos que vão de 1992 a 2023, ou seja, um período de 31 anos. Sendo que o ano com maior publicação sobre o assunto foi 2018, com 14 artigos (figura 5.1).

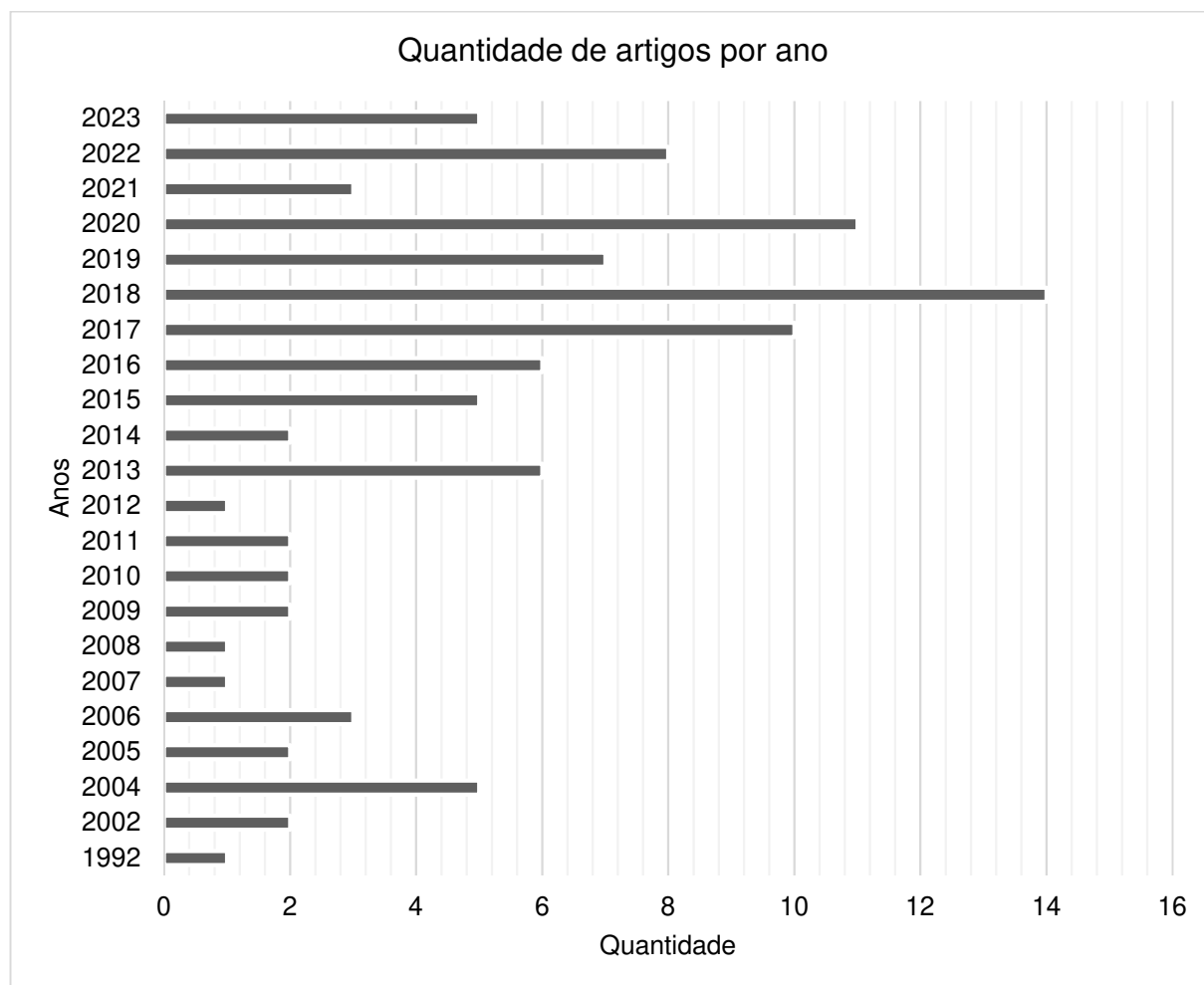


Figura 5.1 - Quantidade de artigos analisados por ano de sua publicação

A partir da análise dos 87 artigos selecionados percebeu-se que a maior parte das análises foram realizadas em tubulações plásticas (63,5%), sendo o material principal o PVC, entretanto, em alguns estudos também se utilizou o polipropileno (figura 5.2). As tubulações metálicas seguem como o segundo material mais utilizado nas tubulações, com 28,8%, os metais mais citados foram o ferro fundido, aço galvanizado e cobre. Com relação aos demais materiais utilizados, tem-se o concreto e o cimento amianto.

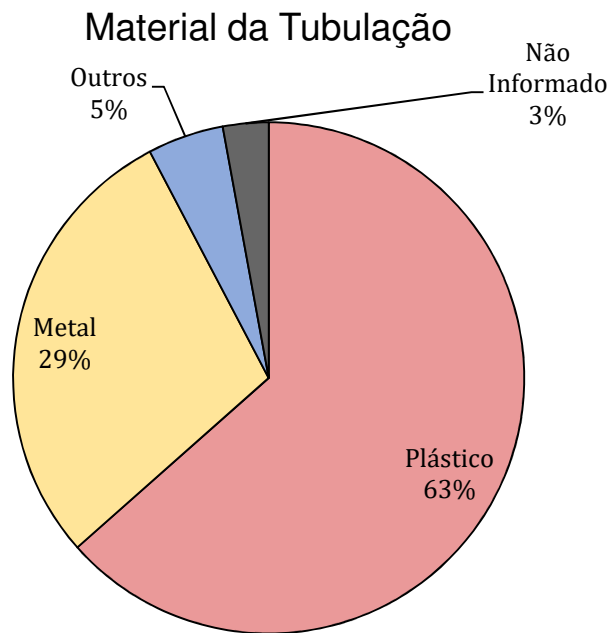


Figura 5.2 Material da tubulação analisada nos artigos.

Quando se fala de funcionamento hidráulico, 90% das tubulações analisadas foram tubulações pressurizadas, e apenas 1% funcionando com pressão atmosférica. Este valor equivale a apenas um artigo dentre os 87 analisados. A porcentagem faltante está relacionada aos artigos que não informaram o funcionamento hidráulico das tubulações analisadas (figura 5.3).

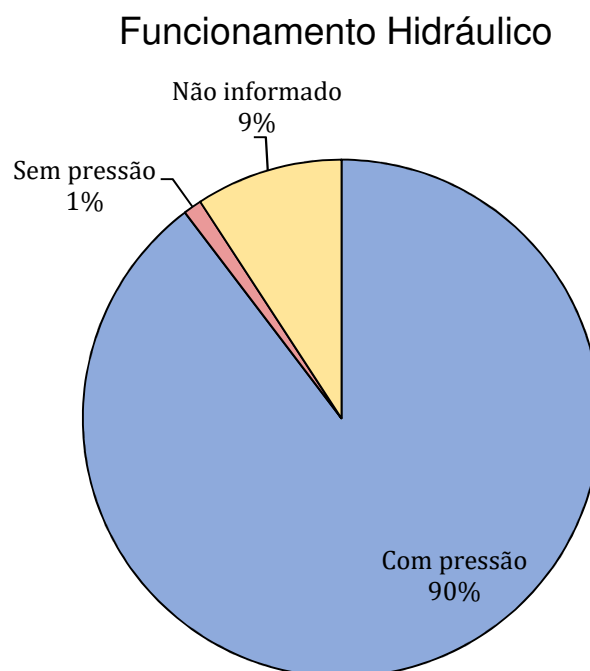


Figura 5.3 Funcionamento hidráulico da tubulação analisada nos artigos.

Percebe-se por tanto a falta de pesquisas realizadas em tubulações não pressurizadas, que apesar de em menor número, ainda existem e trazem consigo uma maior dificuldade na detecção dos vazamentos presentes, uma vez que o método acústico, método mais utilizado nas detecções não é eficiente neste caso.

O método de detecção mais estudado nos artigos analisados é a detecção por equipamentos acústicos, como por exemplo os geofones e sensores acústicos e de vibração. Outros métodos são possíveis de serem utilizados, como o GPR, em que em 7% dos artigos foi o método escolhido, o ERT, as análises de vibrações como o MASW e o LDI, e a análise por infravermelho IRF (figura 5.4). Além de técnicas geofísicas em um dos artigos houve o uso de inteligência artificial para comparar o desempenho de modelos reduzidos para detecção de vazamentos em redes de distribuição de água.

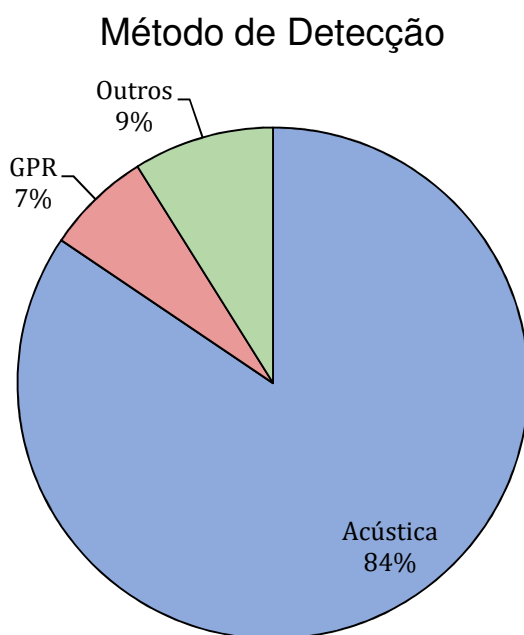


Figura 5.4 Método de detecção de vazamento utilizado nos artigos.

O tipo de abordagem também foi analisado (figura 5.5), e nota-se que os artigos estão igualmente divididos em análises de campo, de laboratório e simulação numérica. Ressalta-se que nesta análise foi considerada análise de campo quando o estudo foi realizado fora de laboratório, mesmo que em situação controlada.

Tipo de Análise

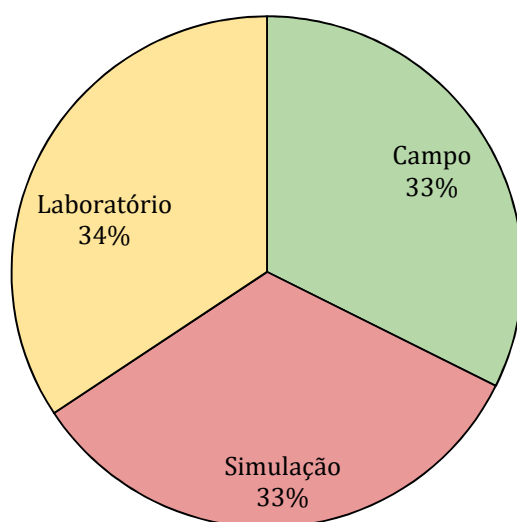


Figura 5.5 Análises realizadas nos artigos.

Os 87 artigos da base de dados selecionada foram publicados em 43 revistas, sendo a *Journal of Sound and Vibration* e a *Journal of Applied Geophysics* as revistas que mais publicaram, com 17 e 13 artigos, respectivamente (figura 5.6). A quantidade de revistas que publicam sobre o tema mostra a importância do mesmo para diversas áreas.

A relação entre as principais palavras-chave presente no banco de dados é representada na figura 5.7. Ao analisá-la, percebe-se que os resultados anteriores são corroborados, uma vez que palavras como *plastic water pipe*, *leak noise* e *acoustic signal* foram alguns dos termos evidenciados. Nesta figura o tamanho dos círculos a importância ou frequência de um determinado item, neste caso, indicam palavras-chave que aparecem com mais frequência nos títulos e resumos dos artigos. Por sua vez as cores são usadas para agrupar itens semelhantes. Nesta figura círculos da mesma cor pertencem ao mesmo clúster, ou seja, a um grupo de itens que estão fortemente relacionados entre si, representando diferentes períodos de tempo, permitindo identificar a evolução deste campo de pesquisa ao longo do tempo.

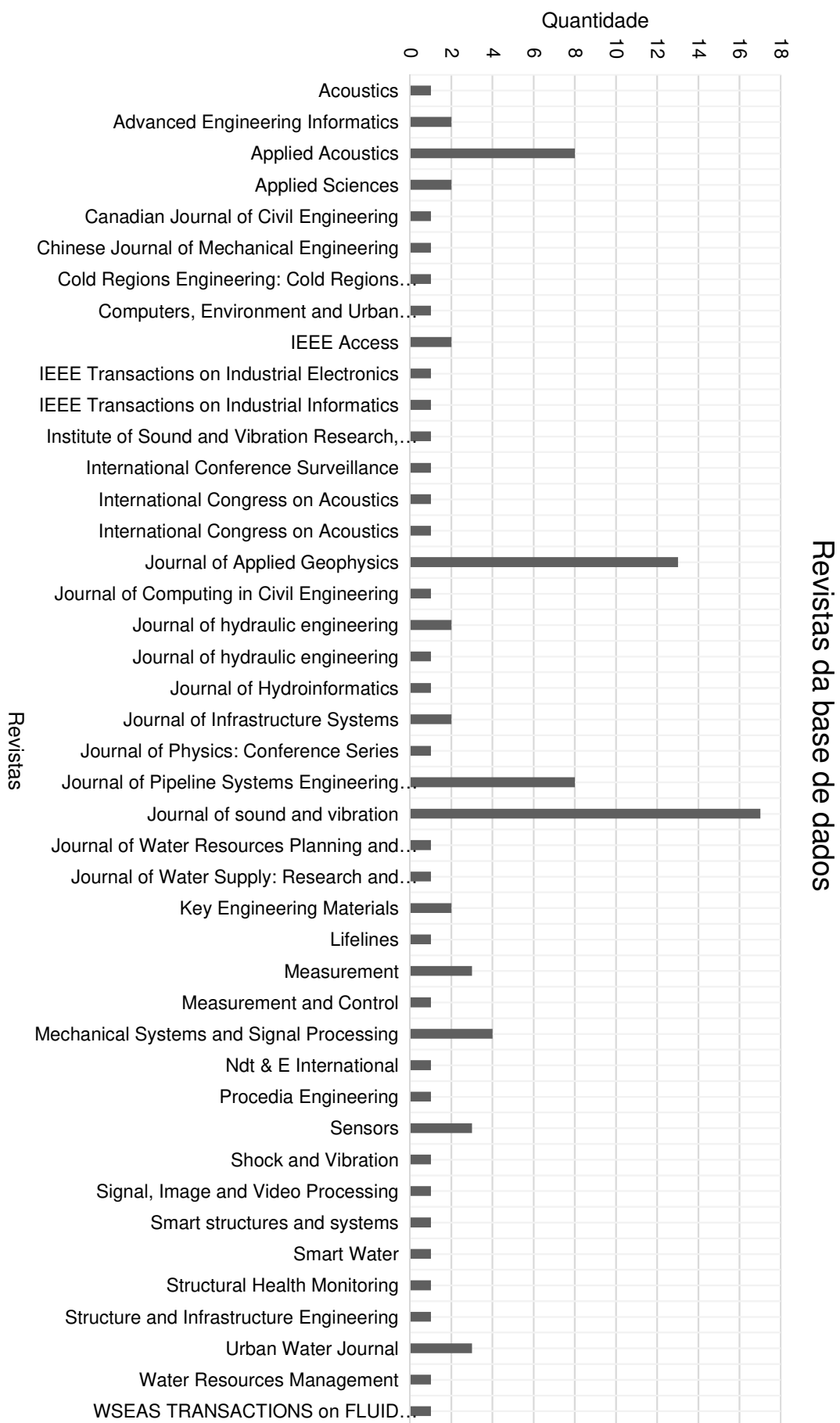


Figura 5.6 Revistas nas quais os artigos da base de dados analisada foram publicados

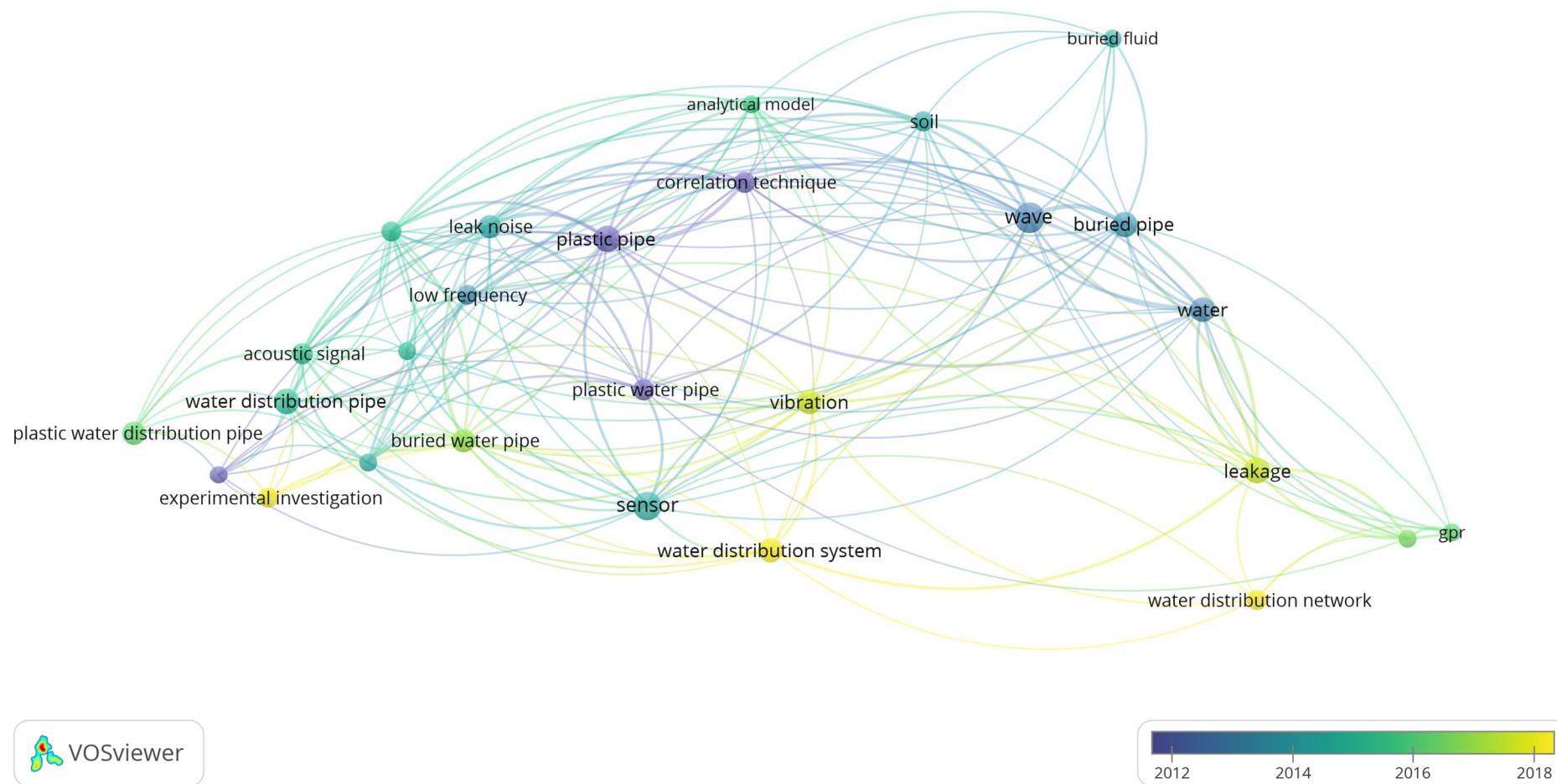


Figura 5.7 Relação entre as palavras-chave presente no banco de dados

Discussão

Outros estudos de revisão sobre detecção de vazamentos em tubulações de água já foram feitos, como é o caso dos estudos de El-Zahab e Zayed (2019) e Puust et al (2010). Ambos os artigos adotam uma abordagem metodológica de revisão de literatura, compilando e analisando pesquisas relevantes sobre o tema. A pesquisa de El-Zahab e Zayed (2019) se concentra em fornecer uma visão geral introdutória dos principais métodos de detecção de vazamentos, enquanto a de Puust et al (2010) se aprofunda na avaliação crítica das tecnologias disponíveis, considerando seus prós e contras, aplicabilidade e efetividade.

No que se refere aos métodos acústicos, ambos os estudos afirmam que o método é amplamente utilizado devido à sensibilidade e capacidade de localizar vazamentos em diversos tipos de tubulações. Há uma descrição detalhada das técnicas de correlação acústica e escuta no solo em um dos trabalhos, enquanto o outro analisa criticamente a efetividade e os desafios da aplicação de métodos acústicos em redes complexas. Entretanto, sempre que se utiliza métodos acústicos se faz necessário que exista uma pressão dentro da tubulação maior que a atmosférica, ou seja, a sensibilidade e capacidade de localizar os vazamentos está altamente ligada à pressão da tubulação.

Além dos métodos acústicos há métodos que analisam anomalias na pressão da tubulação. Esses métodos podem ser estáticos ou dinâmicos, mas não são métodos geofísicos. Além disso, Puust et al (2010) discutem sobre os desafios da modelagem hidráulica e da interpretação de dados de pressão em redes com alta variabilidade de demanda, como é o caso dos sistemas de abastecimentos de grandes centros urbanos.

A presente revisão sistemática mostra que os métodos acústicos ainda prevalência na literatura recente sobre vazamento de água. O comportamento hidráulico do tipo forçado é predominante nos artigos, o que indica que a grande aplicabilidade dos métodos acústicos. Os métodos geofísicos ainda são incipientes em estudos de vazamento em tubulações, mas sua aplicação pode aumentar na medida que o assunto de vazamento em tubulação teve um aumento no número de publicações.

A análise F.O.F.A (figura 5.8) indicou pontos importantes da aplicabilidade dos métodos geofísicos tais precisão, eficiência versatilidade e segurança. Porém, esses métodos demandam relativo custo, especialização de operadores, tempo de

aprendizagem e é dependente de condições externas como as climáticas. Como oportunidades tem-se o uso de inteligência artificial para melhoria dos monitoramentos ligados a outros avanços tecnológicos e a crescente conscientização ambiental. As ameaças estão relacionadas a competição com outros métodos, baixa disponibilidade de mão de obra qualificada para operar os métodos e as crises econômicas, ambientais e sociais que se tem vivido nos últimos anos.

Entretanto, é preponderante afirmar que os métodos geofísicos podem ser uma solução viável para a detecção de vazamentos, principalmente quando outros métodos não são eficientes, como no caso de grandes tubulações não pressurizadas. Mas além dos métodos de detecção faz-se necessário a existência de um sistema de gerenciamento de vazamentos, incluindo estratégias de priorização de reparos, programas de monitoramento e medidas de prevenção.



Figura 5.8 Análise F.O.F.A. realizada para o uso de métodos geofísicos na detecção de vazamentos em tubulações

6 ARTIGO 3 - Identificação de vazamentos em tubulações de concreto não pressurizadas pelo uso da eletrorresistividade

Introdução

A eficiência na gestão dos recursos hídricos é um desafio crucial para enfrentar as demandas crescentes das sociedades contemporâneas. A perda de água por vazamentos em sistemas de distribuição é uma questão significativa, com impactos econômicos, ambientais e operacionais substanciais. Estudos indicam que, em média, até 30% da água tratada é perdida antes de chegar aos consumidores finais devido a vazamentos em tubulações (MUTIKANGA et al., 2009, 2013)

Os avanços nas pesquisas de detecção de vazamentos cresceram notavelmente, principalmente após os anos 2000. A partir desta data, houve o aumento da conscientização da importância da conservação e escassez dos recursos hídricos, além do surgimento de novas tecnologias que são capazes de facilitar e automatizar o processo de detecção de vazamentos. Existem, portanto, diversas formas de detecção de vazamentos em tubulações, que vão desde a utilização de traçadores, equipamentos acústicos e eletromagnéticos até o balanço de massa e volume na rede e observação da vegetação presente na região onde as tubulações estão assentadas (EL-ZAHAB; ZAYED, 2019).

Os métodos geofísicos e outros métodos não invasivos, como aqueles ligados ao sensoriamento remoto e à espectrometria de reflectância, por exemplo, podem contribuir para o mapeamento do solo e mesmo a interação solo-tubulação em problemas de vazamentos. Entre os métodos não invasivos, a utilização de sinais acústicos é o procedimento mais aplicado para a detecção destes problemas (COLOMBO et al., 2009; HUNAIDI; WANG, 2006) e baseiam-se na propagação de ondas mecânicas. À semelhança de outras técnicas, o desempenho dos métodos acústicos depende do material e do diâmetro dos tubos. Este método é recomendado para tubulações pressurizadas, aquelas onde o tubo é inteiramente preenchido pela água e a pressão é maior do que a atmosfera (CATALDO et al., 2014a). Quando as tubulações possuem baixa pressão ou não são pressurizadas, como é o caso das tubulações construídas em concreto, as detecções de vazamentos são mais difíceis de serem realizadas por meio de métodos acústicos e por balanço de pressão (PUUST et al., 2010).

De acordo com a revisão realizada por El-Zahab e Zayed (2019) mais de 50%

da detecção de vazamentos de água dependem de hardware baseado em acústica ou em pressão. Ou seja, existe uma lacuna na detecção de vazamentos onde a pressão atuante é a atmosférica, quando não é possível a utilização dos métodos mais usuais (métodos acústicos e de medição de pressão).

As adutoras, canalizações que conduzem a água para as unidades que precedem a rede de distribuição, podem ser classificadas quanto a natureza da água transportada (bruta ou tratada), e quanto à energia para a movimentação da água (por gravidade, por recalque ou mistas) (TSUTIYA, 2006). Este trabalho é focado na detecção de vazamentos em adutoras de água tratada (tubulações que transportam a água da ETA até os reservatórios elevados para a posterior distribuição à população), que funcionam por gravidade, ou seja, aquelas onde a pressão atuante dentro da tubulação é a pressão atmosférica (HELLER; PÁDUA, 2010).

Para tanto, o método geofísico da eletrorresistividade (ERT) se mostrou possível de aplicação (CAETANO et al., 2023). Tal método obtém, de forma não intrusiva, informações da subsuperfície analisada a partir da injeção de corrente elétrica no solo (SAMOUËLIAN et al., 2005). As limitações desta técnica são: 1) as anomalias de presença no subsolo podem levar a uma má interpretação dos dados e 2) a necessidade de conhecimento prévio da condutividade elétrica das tubulações (CATALDO et al., 2014a). Contudo, a ERT raramente é influenciada pelo tráfego ou ruídos acústicos e as medições da subsuperfície para detectar vazamentos em tubos enterrados são uma alternativa interessante porque é menos dispendiosa do que os métodos baseados na amostragem do solo e métodos sísmicos, como a tomografia de poço (*borehole tomography*) (JORDANA et al., 2001).

A ERT consiste na injeção de corrente elétrica no solo e na medição das diferenças potenciais resultantes. Para tanto, são utilizados quatro eletrodos, dois deles utilizados para a injeção da corrente elétrica (eletrodos de corrente), e dois para medir a diferença de potencial (eletrodos de potencial) decorrente desta injeção de corrente. Essas diferenças de potencial fornecem informações sobre as propriedades da subsuperfície, que, neste trabalho, serão associadas à presença de vazamentos de água (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Existem diferentes arranjo dos eletrodos para aplicação da técnica da ERT em caracterização da subsuperfície. O arranjo dipolo-dipolo pode ser utilizado na caracterização de áreas sob efeito de vazamentos e suas principais vantagens estão relacionadas à sua simetria, além da sua boa resolução lateral (GANDOLFO; GALLAS,

2007). Ressalta que aplicação desse arranjo já ocorre em determinadas situações de perda de fluido (JORDANA et al., 2001). Entretanto, a aplicação de tal disposição carece de maior compreensão a respeito da sua precisão na localização do vazamento de água. Ressalta-se que existem vários métodos para detectar vazamentos em tubulações (SANDBERG et al., 1989), sendo a maioria centrada na quantificação da perda sem se concentrar na localização do vazamento (PUUST et al., 2010).

De maneira a tentar identificar os locais passíveis de perdas em tubulações de grande diâmetro (adutoras), o presente trabalho avaliou resultados experimentais de laboratório da aplicação de técnica de ERT em dois formatos: (1) a primeira em condições tradicionalmente utilizadas para identificar problemas na subsuperfície, ou seja, com eletrodos no solo próximo a tubulação com vazamento (tradicional) e (2) a segunda, em condições normalmente não aplicadas para este tipo de problema, com os eletrodos de corrente colocados dentro da tubulação (novo). A principal hipótese desse trabalho é que o novo arranjo do ERT poderia fornecer valores mais precisos de detecção de vazamento uma vez que tal configuração apresentou resultado superior em termos de sensibilidade do que a aplicação convencional, ou seja, a com eletrodos alinhados no solo, em membranas geossintéticas no estudo foi realizado por Binley e Daily (2003). Além disso, o método permite a coleta de dados em um curto período de tempo, não causa danos à estrutura e pode ser combinado com outras técnicas para obter informações mais completas. Uma comparação da precisão entre as duas formas de aplicação do ERT para localização de vazamentos em adutoras de grandes diâmetros e em concreto é, portanto, algo inédito internacionalmente.

Portanto, a pesquisa aqui apresentada visa contribuir significativamente para o desenvolvimento de metodologias avançadas de detecção de vazamentos, proporcionando ferramentas mais eficazes e sustentáveis para enfrentar os desafios contemporâneos na gestão de redes de distribuição de água.

Metodologia

Ensaio em Laboratório – Experimento de Bancada

O experimento de bancada (figura 6.1) foi construído nos laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Trata-se de um recipiente de

material plástico (104 cm de comprimento por 66 cm de largura e 60 cm de altura), onde introduziu-se solo previamente caracterizado.

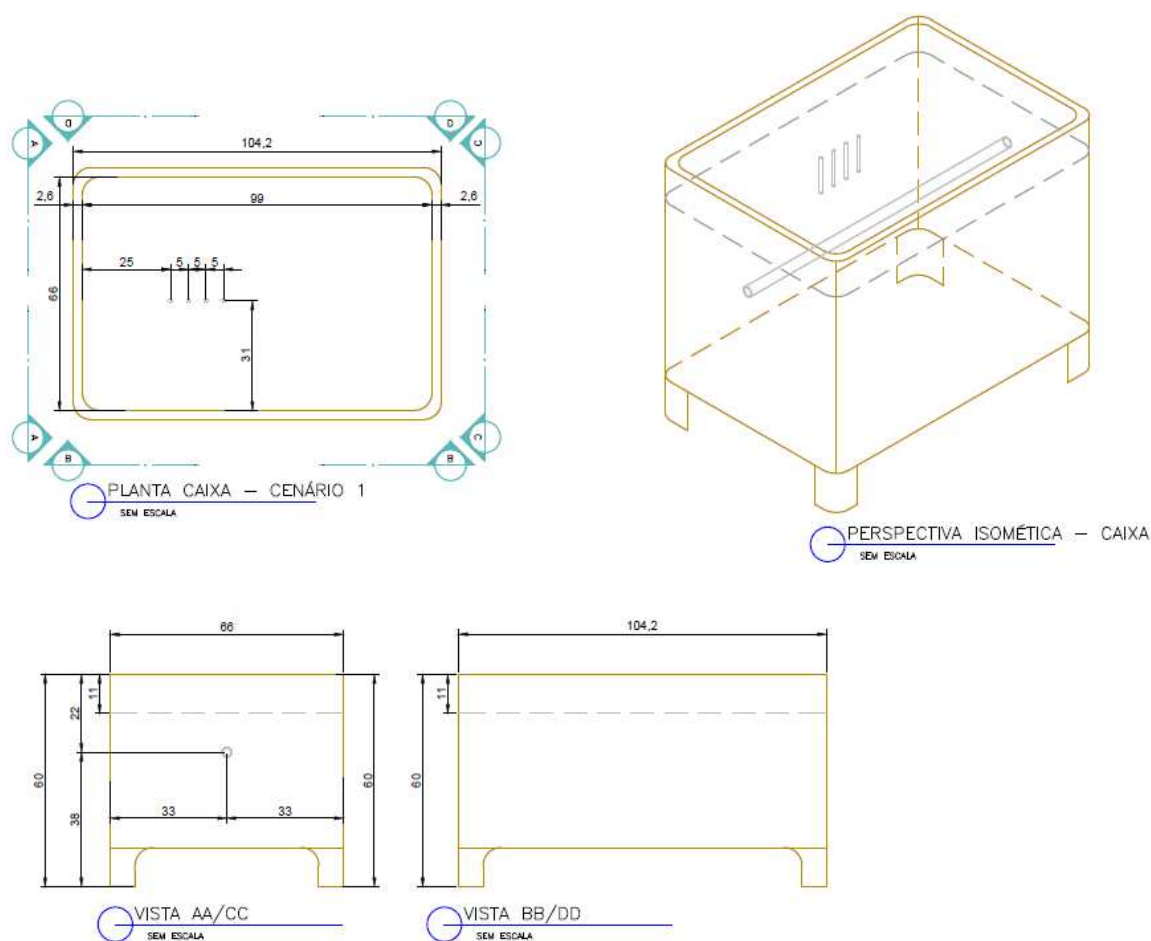


Figura 6.1 Esquema do experimento de bancada construído em laboratório

O teor de umidade e a compactação do mesmo foram controladas, o primeiro por meio de um medidor de umidade do solo, marca ECOWITT modelo WH0291, e a segunda por meio do procedimento descrito a seguir.

1. Uma camada inicial do solo foi colocada dentro do aparato experimental, espalhando-o uniformemente em toda a área. Esta camada foi de aproximadamente 1/3 da caixa utilizada no experimento.
2. Utilizou-se o rolo de compactação (figura 6.2), de 2,26 kg, para aplicar força sobre o solo. O número de passadas realizadas por camada foi 20. A cada cenário realizado, o solo era retirado, seco e adensado novamente. Certificou-se de adensar o solo ao redor da tubulação para evitar espaços vazios;



Figura 6.2 - Rolo usado para compactar o solo

3. Uma fita métrica foi colocada ao lado da caixa para acompanhar o quanto o solo foi adensado (figura 6.3);



Figura 6.3 - Primeira camada de solo colocada na caixa com detalhe para a fita métrica fixada em uma de suas paredes.

4. Durante o adensamento do solo, este foi umedecido gradualmente, por meio de um aspersor de água, até atingir o teor de umidade adequado e constante. Foram utilizados 500 ml de água por camada. A água foi adicionada em pequenas quantidades, misturando bem o solo até que a umidade desejada fosse alcançada. Esta umidade gira em torno de 18 ~ 20%, e o equipamento utilizado para a medição foi o medidor de umidade do solo ECOWITT WH0291 (figura 6.4);



Figura 6.4 - Medição da umidade do solo sendo realizada

5. Após a compactação inicial, o teor de umidade do solo, durante o período de medições de resistividade, foi monitorado regularmente. Caso variações no teor de umidade ao longo do tempo fossem percebidas, foi realizado o ajuste da mesma adicionando água ou permitindo que o solo secasse, conforme necessário.

Ressalta-se que a tubulação então introduzida por meio de aberturas laterais, e as condições hidráulicas dentro da tubulação controlada por um sistema abre e fecha, confeccionado com uma garrafa pet e um equipo, como apresentado na figura 6.5.

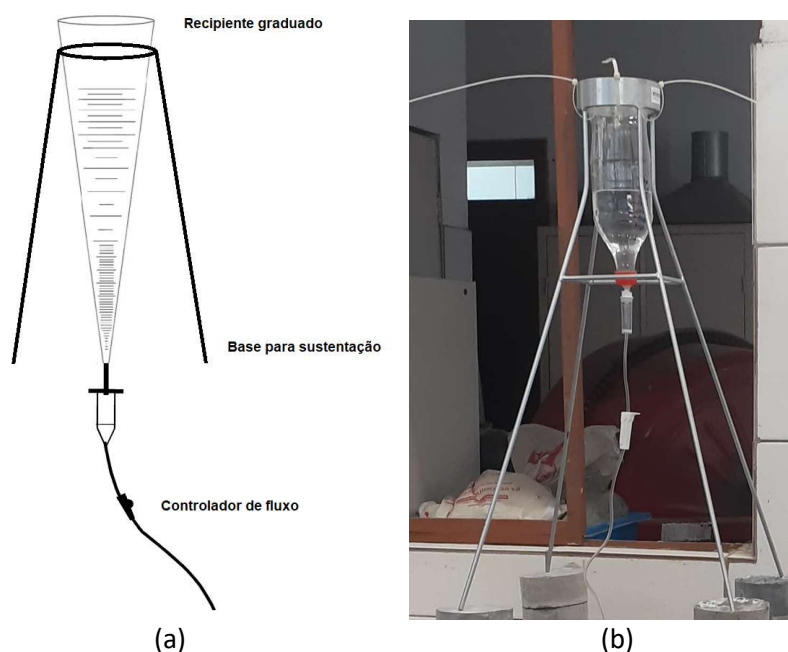


Figura 6.5 - Aparato experimental para manutenção das condições hidráulicas dentro da tubulação.
(a) Esquema de montagem; (b) Foto do aparato montado.

Foram utilizadas duas tubulações, uma contendo um furo central e a outra íntegra, isto é, sem furo. A tubulação sem vazamento foi utilizada como controle do experimento.

Após a compactação e estabilização do solo, foram iniciadas as medições de resistividade. Os procedimentos para coleta de dados são descritos a seguir:

1. Os eletrodos de potencial do equipamento foram posicionados à 25cm ou a 45cm a partir de uma das bordas do comprimento da caixa e a 31cm ou a 20cm de uma das bordas da largura da caixa utilizada, como representado na figura 3.5. Os arranjos utilizados serão o polo-dipolo modificado e o dipolo-dipolo. Enquanto o primeiro trata-se da nova configuração proposta, isto é, o eletrodo de corrente estará dentro da tubulação (cenário Novo), na segunda configuração os eletrodos de corrente estarão equidistantes dos demais eletrodos 5 unidades (cenário tradicional), como representado na figura 3.5

A configuração de eletrodos no cenário Novo diverge do arranjo polo-dipolo padrão pela disposição do eletrodo de corrente, posicionado inferiormente à linha dos eletrodos de potencial e imerso na tubulação de água, resultando em uma injeção direta da corrente elétrica no corpo d'água e modificando a distribuição potencial, o que, por sua vez, altera a sensibilidade do método à resistividade das camadas subjacentes.

2. As medições foram realizadas utilizando o aparelho da marca Lippmann, modelo 4 point light 10 W, cedido ao Programa de Engenharia Civil pelo pesquisador Remke Leander van Dam, em intervalos de 15 minutos durante um período inicial.

Foram utilizados dois posicionamentos de eletrodos, um centralizado, próximo a tubulação, e outro deslocado, localizado entre a parede da caixa e a tubulação, como descrito anteriormente.

Os cenários analisados nesta pesquisa foram (tabela 6.1):

Tabela 6.1 Cenários analisados

CENÁRIO	SOLO	GEOMETRIA DA TUBULAÇÃO	POSIÇÃO DOS ELETRODOS	MÉTODO	VAZAMENTO
1	Argiloso	Cilíndrica	Centralizado	Tradicional	Não
2	Argiloso	Cilíndrica	Centralizado	Tradicional	Sim
3	Argiloso	Cilíndrica	Centralizado	Novo	Sim
4	Argiloso	Cilíndrica	Deslocado	Tradicional	Não
5	Argiloso	Cilíndrica	Deslocado	Tradicional	Sim
6	Argiloso	Cilíndrica	Deslocado	Novo	Sim

O resumo dos parâmetros utilizados está na tabela 6.2.

Tabela 6.2 Resumo dos parâmetros utilizados

MÉTODO	Elétrico
TÉCNICA	Eletrorresistividade
APARELHO	4 point light 10 W
FREQUÊNCIA	5 Hz
ARRANJO	Dipolo-dipolo e Polo-dipolo
ESPAÇAMENTO	0,05 metros

De forma a verificar a precisão dos dois procedimentos de aplicação de ERT foram realizados testes em dois formatos:

- Medição da resistividade aparente ao longo do tempo: as medições foram realizadas tanto com o método tradicional quanto com o novo em intervalos de aproximadamente 15 minutos. Essas medições aconteceram em um único ponto, isto é, não foi realizado a coleta de pseudoseções, uma vez que inviabilizaria a análise de variação no tempo.
- Medição de pseudoseções de resistividade aparente no modelo: as medições foram realizadas de forma a cobrir todo comprimento do modelo, para tanto foram considerados os espaçamentos entre os pares de eletrodos nos valores de 5cm, 10cm, 15cm e 20cm, enquanto o espaçamento dos eletrodos de cada par foi mantido constante em 5cm.

Análise do solo

A caracterização do solo foi realizada de acordo com as seguintes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas:

- NBR 16.097: 2012. Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio.
- NBR 6.457:2016 Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
- NBR 7.181: 2016. Solo - Análise granulométrica.

Para a determinação da densidade do solo foi utilizado o método da picnometria à laser. O picnômetro utilizado foi o Multi Picnômetro Quantachrome MVP-6DC localizado no prédio 18 do campus Nova Gameleira do CEFET-MG.

Além destes ensaios, o solo foi analisado por meio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para compreender a estrutura de moléculas individuais e a composição de misturas moleculares presentes no solo analisado.

Erro

Na análise estatística, o erro típico, também conhecido como erro padrão da média (EPM), é uma medida da variabilidade da média de uma amostra de dados. Representa a quantidade média pela qual a média da amostra provavelmente difere da média real da população.

O EPM é calculado usando a seguinte fórmula:

$$\frac{\sigma}{\sqrt{N} \times X_{Avg}} \times 100$$

Onde:

O EPM é usado para estimar o intervalo de confiança para uma média populacional. O intervalo de confiança é uma faixa de valores que provavelmente contém a média real da população. A largura do intervalo de confiança é proporcional ao EPM.

Por sua vez, o desvio padrão é dado por

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=0}^{N-1} x_i \right)^2 \right]$$

Análise dos resultados

Para análise dos resultados foram produzidos gráficos de acordo com cada medição. As medições de resistividade aparente ao longo do tempo foram analisadas por meio de gráficos de resistividade aparente (eixo y) com eixo das abcissas igual o tempo de amostragem. Pseudos perfis foram produzidos no software R a partir do script (no Apêndice B) por interpolação dos dados coletados e consecutiva construção de mapas de calor. Foram também construídos no software R mapas de calor com valores de corte correspondente a mediana ou a média dos valores amostrados no respectivo cenário, de forma a identificar a mancha de humidade do solo e possível precisão de medição de cada cenário. Para o cálculo do tamanho das manchas de humidade, construídas a partir de valores de resistividade aparente inferior a média

e/ou mediana dos dados coletados, utilizou-se a ferramenta medir do software PDF Acrobat. Exemplos das medições realizadas são apresentadas na figura 6.6 a seguir:

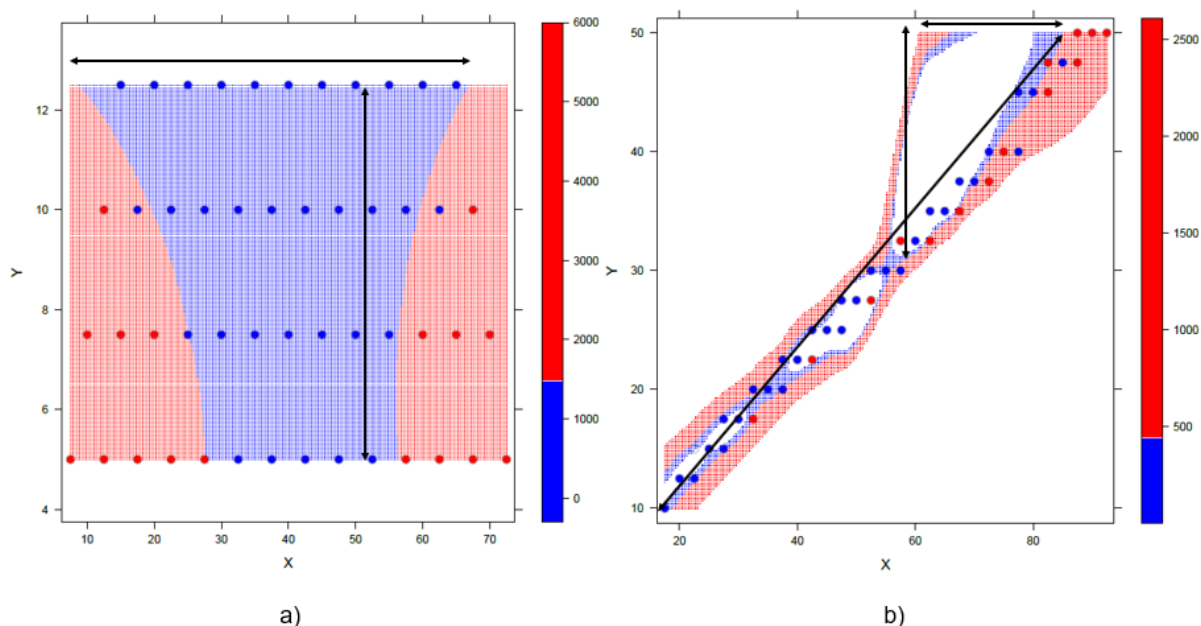


Figura 6.6 - Exemplo de como foi realizada a medição nos gráficos de média e mediana a) para as medições no método tradicional; b) para as medições no método novo. As setas pretas indicam os como foram feitas as medições dos valores das médias e medianas.

Os boxplots, também conhecidos como diagrama de caixa, são uma ferramenta estatística visual usada para representar a distribuição de um conjunto de dados. Eles fornecem uma visão clara das medidas de tendência central, dispersão e possíveis outliers em um conjunto de dados (MONTGOMERY; RUNGER, 2021). Assim, foram produzidos boxplots com os valores de média e mediana de resistividade aparente de cada cenário, considerando os métodos avaliados (tradicional e novo). A relação entre resistividade aparente e umidade do solo foi observada por regressão linear para diferentes cenários.

Por fim, para o cálculo da porcentagem de melhora considerando o método novo e o tradicional, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\text{Porcentagem de melhora} = \frac{VMT - VMN}{VMT} \times 100 \quad 6.1$$

Onde: VMT = valores medianos obtidos no método tradicional

VMN = valores medianos obtidos no método novo

Resultados

O resultado da análise granulométrica realizada é apresentado na figura 6.7:

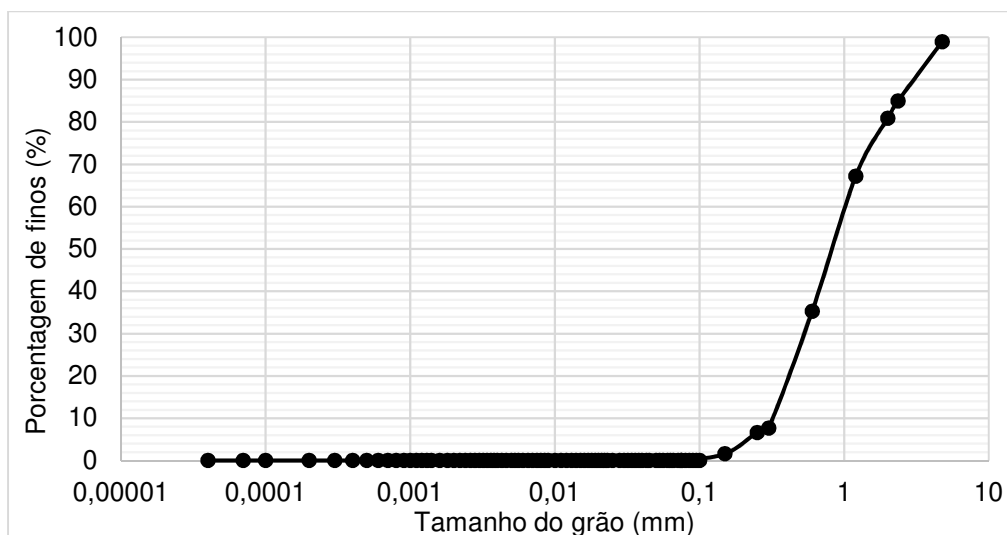


Figura 6.7 - Análise granulométrica do solo utilizado no experimento

Os resultados da picnometria mostraram que o solo utilizado possuía a densidade de $2,508 \text{ g/cm}^3$, com um coeficiente de variação de $0,2405\%$. Além disso, a relação umidade no solo composto principalmente por argila foi de $11,034\%$.

Para fins de comparação foram realizadas medições de voltagem com e sem vazamento. A figura 6.8 apresenta os resultados de acordo com o tempo das medições sem vazamento. Não foi possível realizar medições sem vazamento no método novo, uma vez que o circuito não fecha e não há como realizar a medição neste caso.

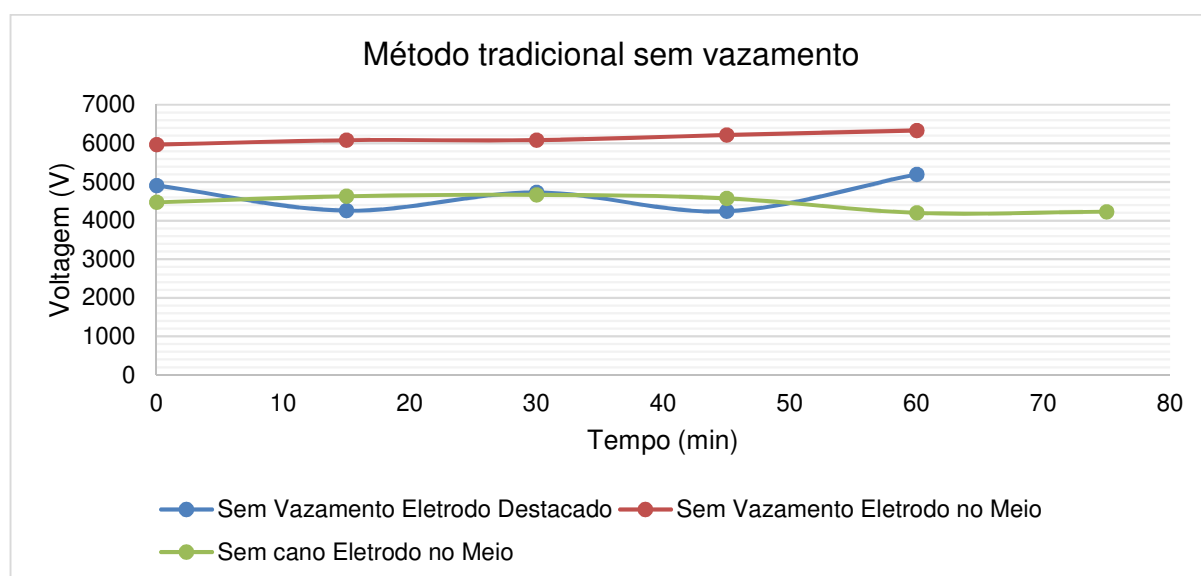


Figura 6.8 - Resultado da medição de voltagem no método tradicional sem vazamento. O erro obtido em nas medições variou de $0,2\%$ a $1,2\%$.

Na figura 6.8 percebe-se que a voltagem segue de maneira linear, com poucas variações das retas. Além disso quando comparado entre si os valores das medições com o eletrodo deslocado e no cenário sem a tubulação os valores estão próximos

entre si (entre 4500 e 5100 ohm.m), por sua vez, quando a medição foi realizada com o eletrodo centralizado os valores de resistividade aparente obtida foi mais elevada (~6000 ohm.m). Isso pode ter relação com o efeito causado pela própria tubulação de PVC que se encontrava muito próxima dos eletrodos quando este era localizado de maneira centralizada.

Os resultados das medições com vazamento são apresentados nas figuras 6.9 e 6.10.

No método tradicional (figura 6.9) é possível perceber que há um decaimento da reta de resistividade aparente a partir dos 10 minutos de medição, indicando a partir de quando o método consegue indicar a presença de vazamento na tubulação.

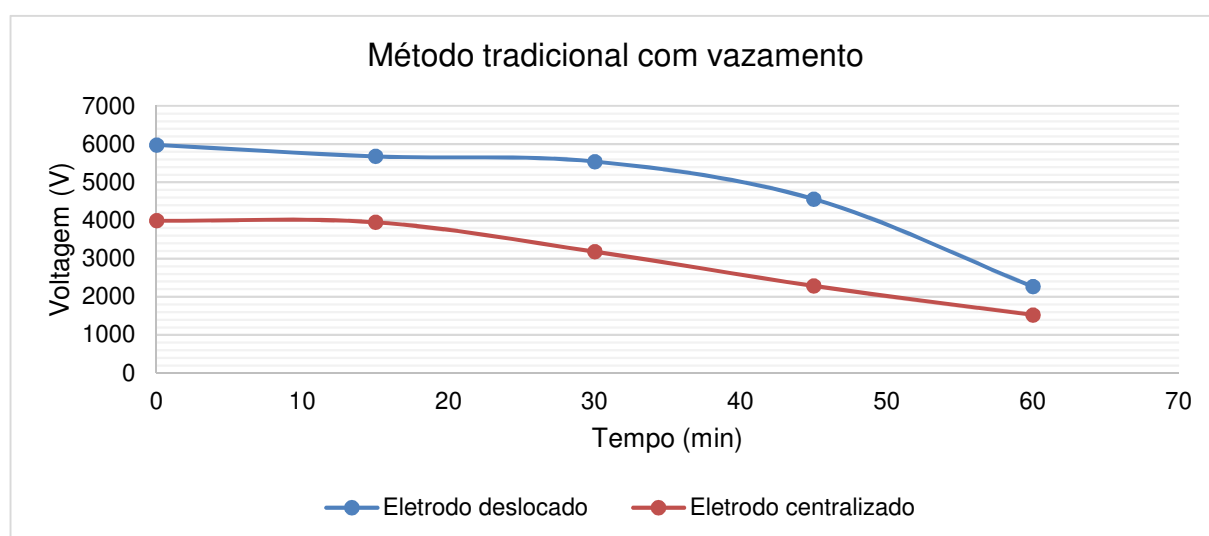


Figura 6.9 - Resultado da medição de voltagem no método tradicional com vazamento. O erro obtido em nas medições variou de 0,3% a 0,9%.

Quando se trata do novo método, a variação da voltagem é mais acentuada quando há vazamento. E, quando o eletrodo se encontrava deslocado houve uma maior amplitude dos dados. Isto pode ser explicado pelo efeito de borda causado pela parede da caixa. Os valores da voltagem para os eletrodos centralizados estão apresentados de forma individual na figura 6.10.

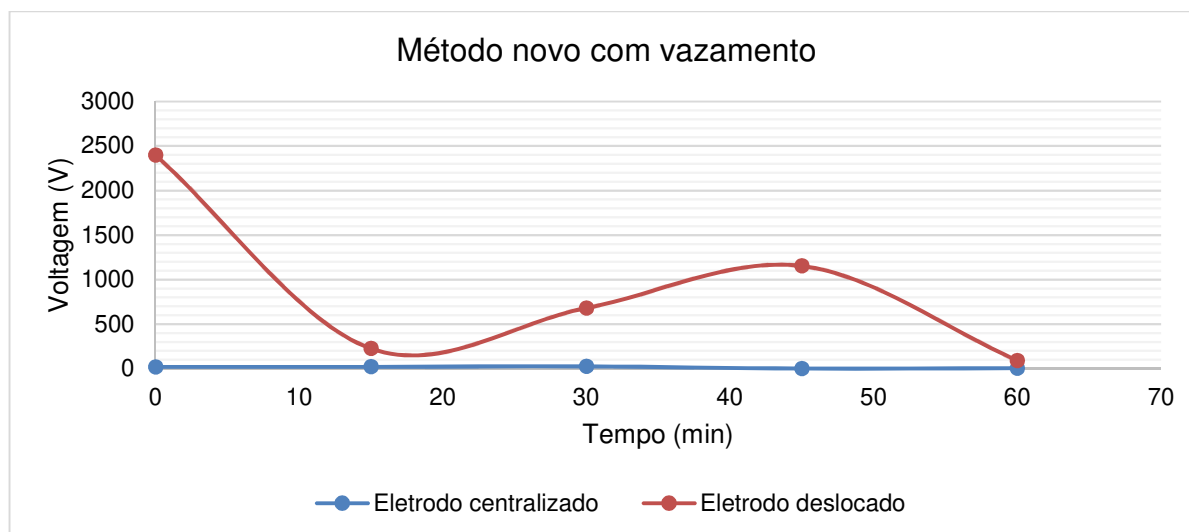


Figura 6.10 - Resultado da medição de tensão no método novo com vazamento. O erro obtido em todas as medições foi de 25,5%.

Quando analisados de forma separada, é possível perceber que a curva tanto do eletrodo deslocado, quanto do centralizado possuem semelhanças, sendo uma das diferenças justamente a amplitude dos valores.

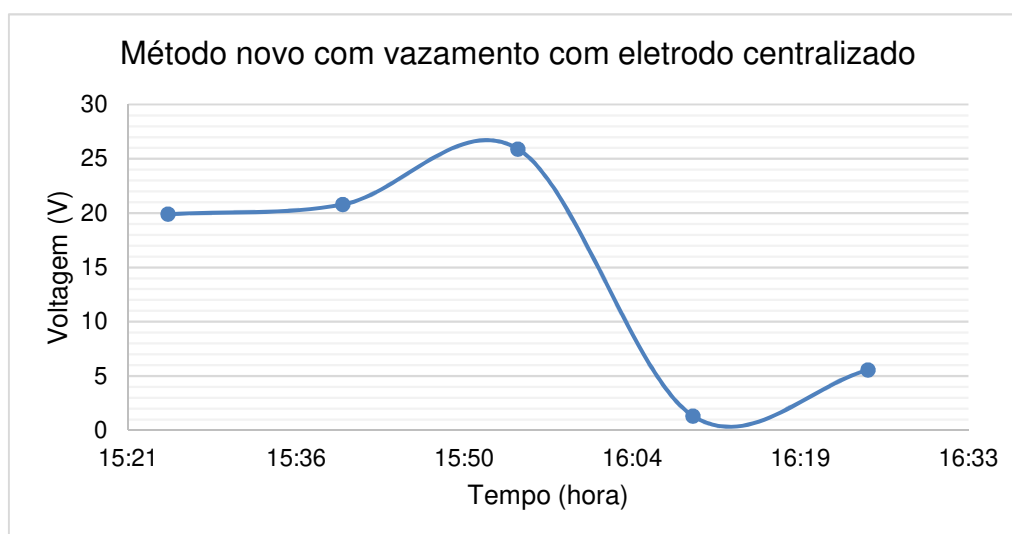


Figura 6.11 – Detalhe do resultado da medição de tensão no método novo com eletrodo centralizado e com vazamento.

As regressões lineares para cada resultado apresentado anteriormente são apresentadas a seguir (figuras 6.12, 6.13 e 6.14):

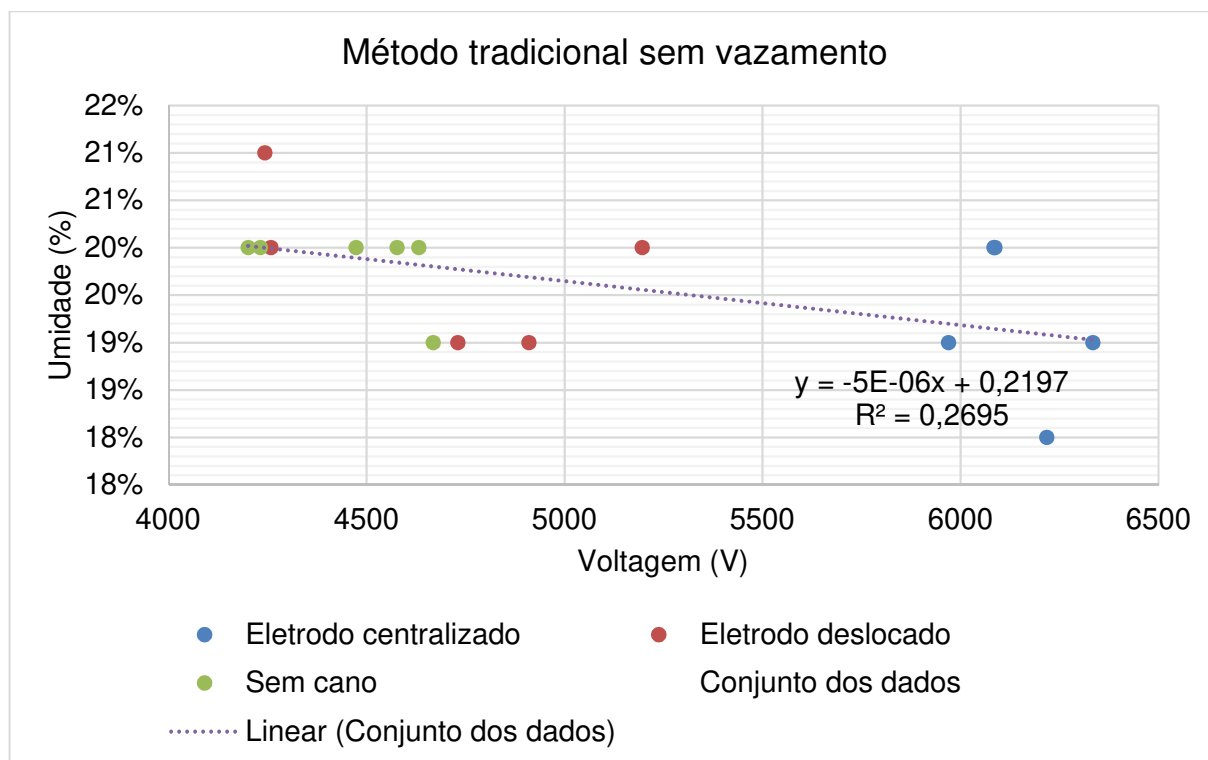


Figura 6.12 - Valores de voltagem por umidade para o método tradicional sem vazamento juntamente com a regressão linear destes valores.

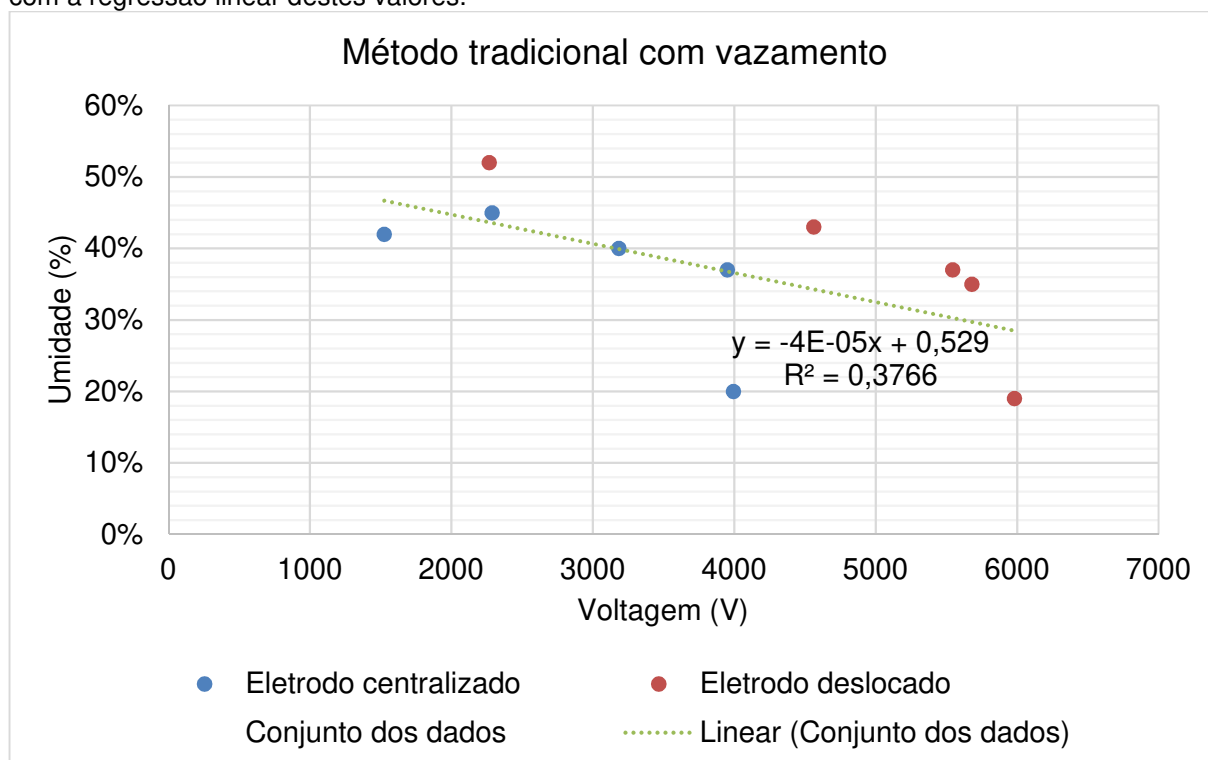


Figura 6.13 - Valores de voltagem por umidade para o método tradicional com vazamento juntamente com a regressão linear destes valores.

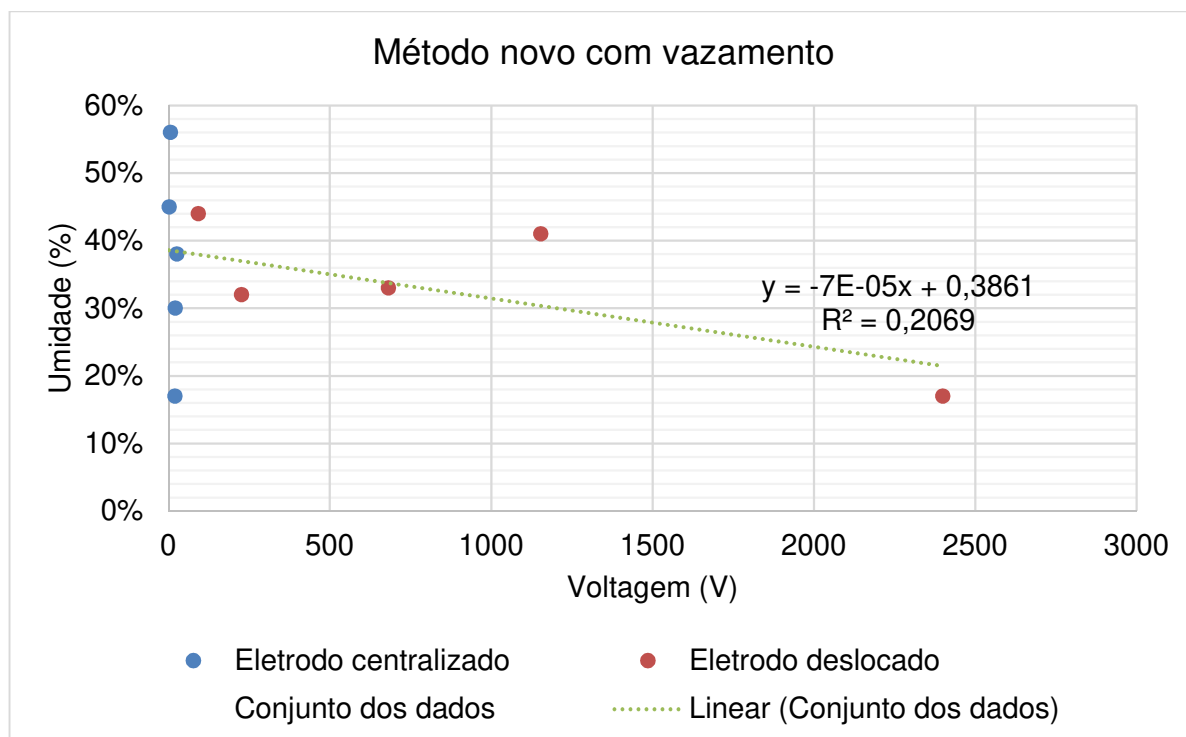


Figura 6.14 - Valores de voltagem por umidade para o método novo com vazamento juntamente com a regressão linear destes valores.

As inclinações das retas, bem como os valores do R^2 e do erro padrão das regressões lineares realizadas são resumidas na tabela 6.3:

Tabela 6.3 - Resumo dos valores obtidos nas regressões lineares realizadas

Vazamento	Método	Inclinação da reta	R-Quadrado	Erro padrão
Sim	Tradicional	-0,000041	0,38	0,089
Não	Tradicional	-0,000004	0,27	0,006
Sim	Novo	-0,000072	0,21	0,116

Além das medições com variação no tempo, também foram coletadas pseudoseções de resistividade aparente. Estas serão apresentadas a seguir.

A figura 6.15 apresenta os resultados para a coleta de dados sem vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos centralizados. Nela é possível perceber que há variação significativa dos valores obtidos apenas nas bordas do perfil apresentado em a. Isto fica evidente quando se analisa b e c. Dessa maneira, percebe-se a existência de um efeito de borda. O maior e o menor valor observado foram, respectivamente, 10410 Ωm e 1526 Ωm .

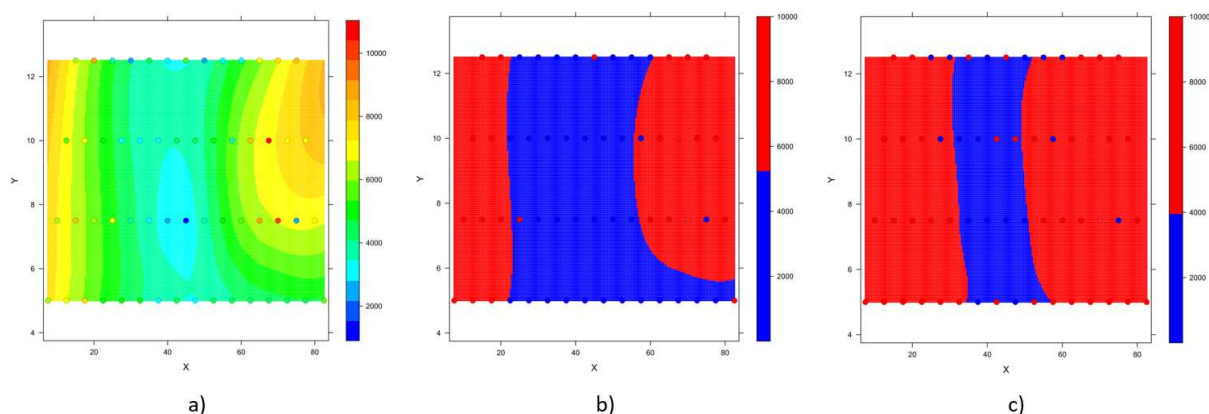


Figura 6.15 – Perfil da coleta sem vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos centralizados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em nas medições variou de 0,2% a 25,5%.

Assim como figura anterior, na figura 6.16, que apresenta os resultados para a coleta de dados sem vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos deslocados, é possível verificar a variação significativa dos valores obtidos apenas na borda direita do perfil apresentado em a. Isto fica evidente quando se analisa b e c. O que reforça a existência de um efeito de borda presente na medição realizada. Sendo que o maior e o menor valor observado foram, respectivamente, 9027 Ωm e 1952 Ωm .

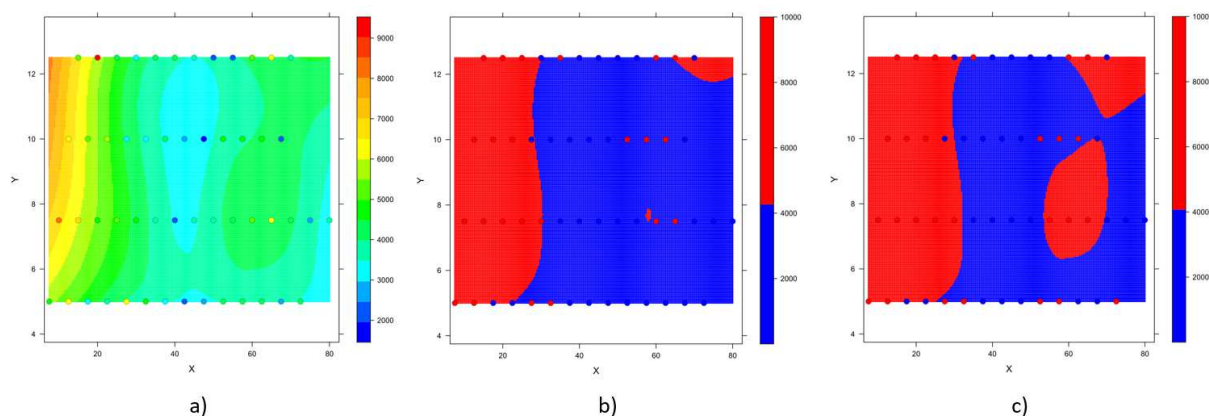


Figura 6.16 – Perfil da coleta sem vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos deslocados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em nas medições variou de 0,3% a 25,5%.

Os resultados obtidos na coleta com vazamento, utilizando o método tradicional e os eletrodos centralizados são apresentados na figura 6.17. Nela percebe-se claramente a mancha de menor resistividade que indica a presença do vazamento. Nela a parte com menor resistividade aparente chega ao final da pseudoseção. O maior e o menor valor observado foram, respectivamente, 5690 Ωm e 27 Ωm . Também

é possível notar o efeito de borda, e nas imagens b e c a diferença significativa entre a média e mediana.

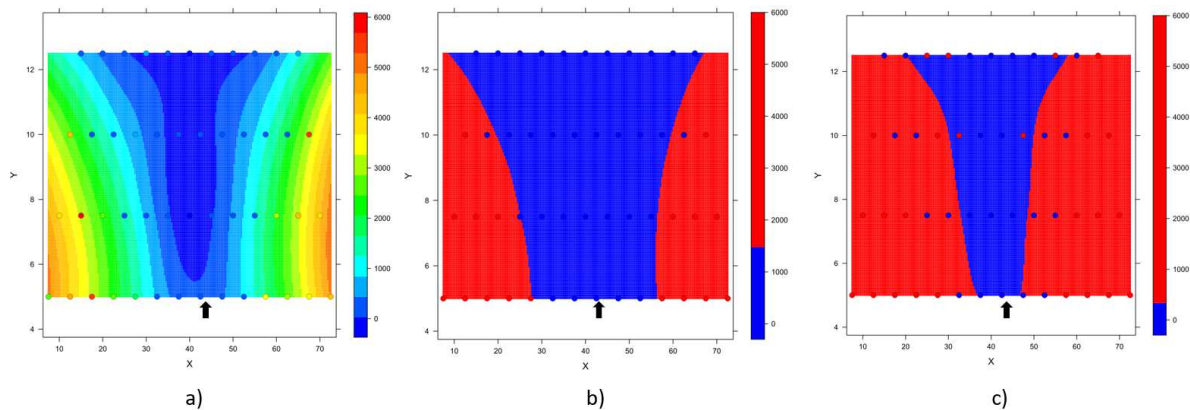


Figura 6.17 – Perfil da coleta com vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos centralizados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos. A seta preta representa o local do vazamento; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em nas medições variou de 0,2% a 25,5%.

Os resultados obtidos na coleta com vazamento, utilizando o método tradicional e os eletrodos deslocados são apresentados na figura 6.18. Nela percebe-se claramente a mancha de menor resistividade que indica a presença do vazamento. O maior e o menor valor observado foram, respectivamente, 2553 Ωm e 100 Ωm . Entretanto, diferentemente dos perfis sem vazamento, os resultados obtidos com a média e a mediana não possuem diferenças significativas.

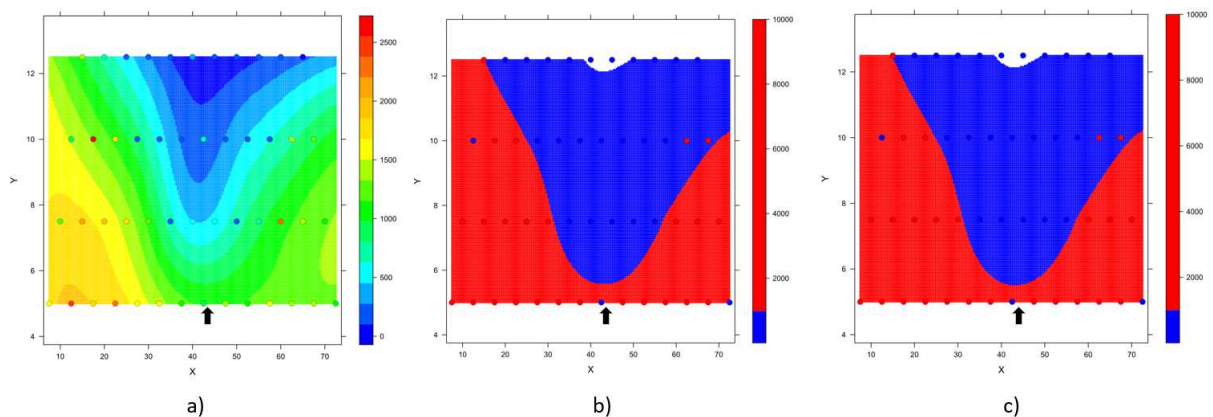


Figura 6.18 – Perfil da coleta com vazamento utilizando o método tradicional e os eletrodos deslocados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos. A seta preta representa o local do vazamento; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em nas medições variou de 0,4% a 25,5%.

Quando se analisa os resultados obtidos com o novo método (figuras 6.19 e 6.20), a primeira diferença se dá pela geometria das pseudoseções obtidas. Esta diferença existe uma vez que os eletrodos de corrente precisaram ser fixados dentro

da tubulação, havendo apenas a movimentação dos eletrodos de potencial.

Outro ponto é a parte branca presente no meio das pseudoseções, que é resultado da interpolação feita pelo software. Porém, de toda forma, percebe-se que a região é circundada por áreas de menor resistividade aparente.

Em ambas as figuras também é possível perceber o efeito de borda existente, entretanto, este aparece de maneira mais sutil do que se comparado aos dados sem vazamento. O maior e o menor valor observado foram, respectivamente, 385,5 Ωm e 0,138 Ωm , para as medições com os eletrodos centralizados e 2611 Ωm e 0,888 Ωm para os eletrodos deslocados.

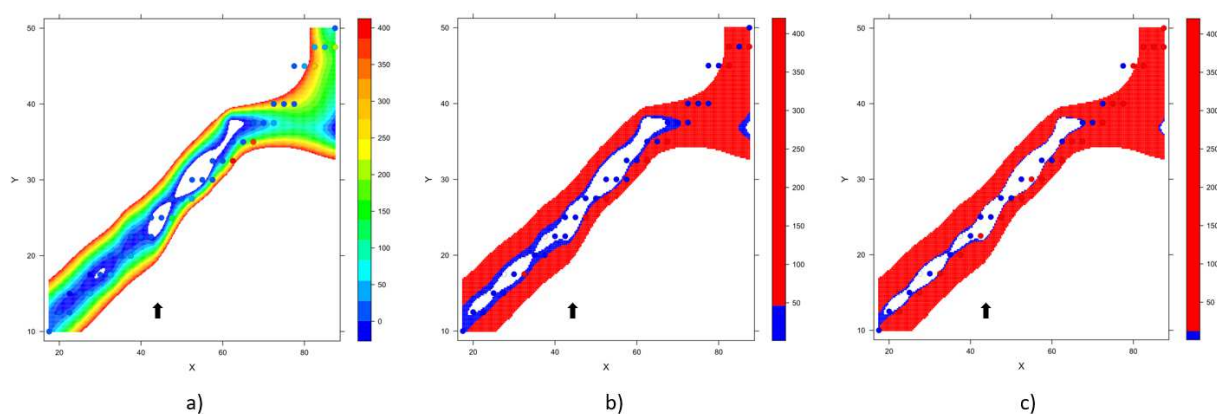


Figura 6.19 – Perfil da coleta com vazamento utilizando o método novo e os eletrodos centralizados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos. A seta preta representa o local do vazamento; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em todas as medições foi de 25,5%.

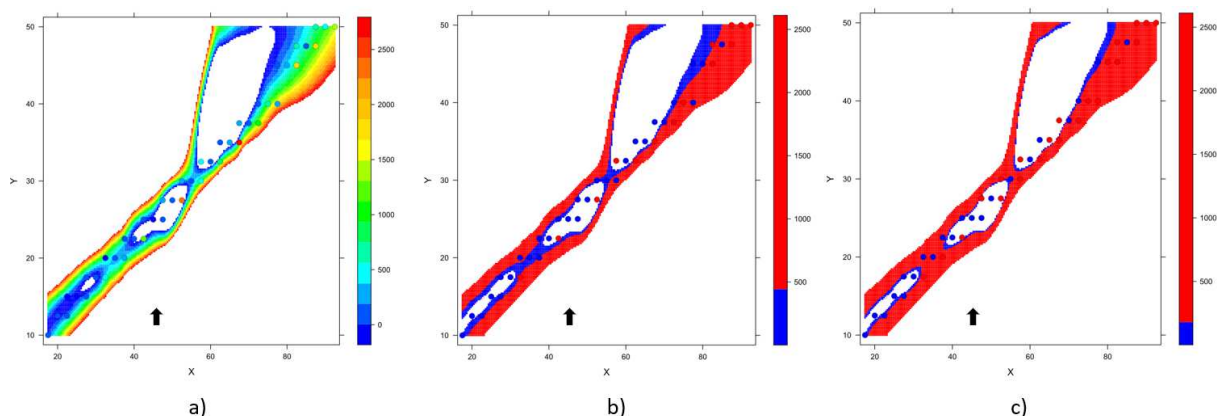


Figura 6.20 – Perfil da coleta com vazamento utilizando o método novo e os eletrodos deslocados. Onde: a) pseudoseção de resistividade aparente, b) média dos valores obtidos, e c) mediana dos valores obtidos. A seta preta representa o local do vazamento; x representa a distância e y a profundidade em centímetros. O erro obtido em todas as medições foi de 25,5%.

Foram retirados os maiores valores encontrados de x e y dos gráficos de média

e mediana das pseudoseções. Esses valores são apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Valores máximos de X e Y para os gráficos de média e mediana em centímetros

Medição			Média		Mediana	
Vazamento	Método	Localização do eletrodo	x	y	x	y
Não	Tradicional	Centralizado	60,53	7,53	23,78	7,54
Não	Tradicional	Deslocado	58	7,53	55	7,54
Sim	Tradicional	Centralizado	58,47	7,46	37,89	7,5
Sim	Tradicional	Deslocado	57,17	6,86	57,82	7
Sim	Novo	Centralizado	11,31	28,54	8,09	28,34
Sim	Novo	Deslocado	24,88	40,2	21,49	40,2

Com os valores de média e mediana foi plotado um boxplot (figura 6.21) para que a variação entre esses valores pudesse ser analisada. O gráfico em questão é apresentado a seguir:

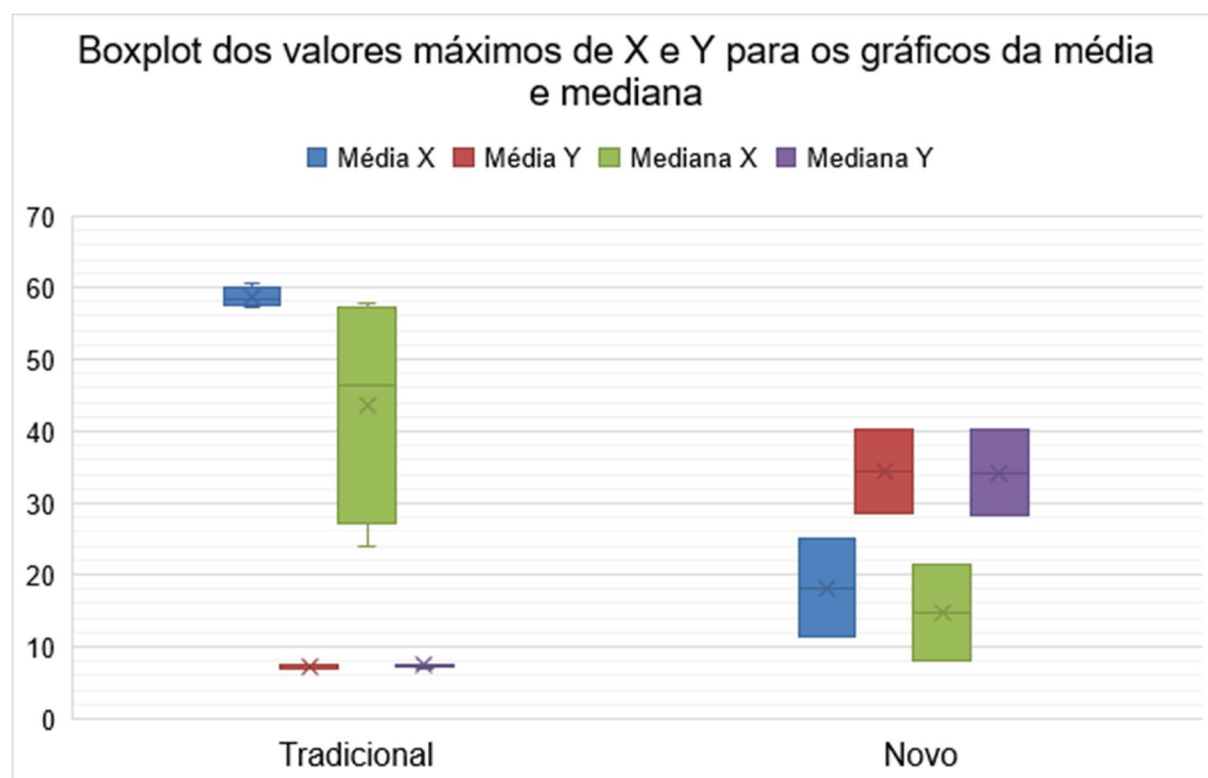


Figura 6.21 - Boxplot dos valores máximos de X e Y para os gráficos da média e mediana

Para o método tradicional, os valores de mediana em X foram os que sofreram maior variabilidade, 34,04. Por sua vez, neste mesmo método, a variação dos valores da média e mediana em Y foram as menores (0,67 e 0,54, respectivamente). Considerando o novo método, a variação dos valores foi semelhante, tanto para os valores de X quanto para os de Y em ambas as medições, média e mediana (13,57 e

11,66 para médias x e y , respectivamente; e 13,4 e 11,86 para medianas x e y , respectivamente).

Considerando os valores de X , aqueles utilizados para a definição de precisão do método, tem-se que a porcentagem de melhoria do método novo foi de aproximadamente 62,8% considerando os eletrodos centralizados e de 78,6%, refletindo em uma melhora média de, aproximadamente, 70,7%.

Discussão

Estudos como o de Dutta (2013) mostraram que é possível, por meio de geofísica, encontrar tubulações enterradas com precisão. Outros estudos, como Fallahsafari et al. (2013), afirmam que a resistividade do solo pode mudar significativamente quando a água é liberada, pois a água altera as características elétricas do solo e assim, essa característica pode ser utilizada para caracterizar propriedades do solo, como conteúdo de água, saturação, densidade e relação de vazios de ar. Há vários estudos que utilizam métodos geofísicos para detecção de vazamentos, como El-Zahab; Zayed (2019); Martini et al., (2017); Ocaña-Levario et al., (2018); Yazdekhashti et al., (2020) e Zhang et al., (2022). Mas poucos são aqueles que estudam este tema a partir do uso da ERT. Assim, este estudo buscou englobar conceitos anteriormente estudados e avaliar aplicações da técnica de ERT para detecção de vazamentos de água em tubulações enterradas.

O princípio deste método consiste na determinação da resistividade elétrica dos materiais, solos e rochas presentes na subsuperfície. Correntes elétricas, contínuas ou alternadas de baixa frequência, são injetadas no solo artificialmente através de um par de eletrodos, e as diferenças de potencial resultantes são medidas através de outro par de eletrodos. (BRAGA, 2016; KEAREY et al., 2002).

Fallahsafari et al. (2013) analisaram cinco tipos de argilas, e observaram que argilas com maior conteúdo de água apresentam menor resistividade elétrica, enquanto aquelas com maior relação de vazios de ar têm resistividade mais alta. Em seus estudos a resistividade elétrica mostrou correlações quantitativas satisfatórias com o conteúdo de água, saturação, peso unitário úmido, relação de vazios de ar e resistência à compressão das argilas. O que vai de consonância com este trabalho, uma vez que as menores resistividades também foram associadas à presença de água.

Duan (2018) aborda em seu trabalho fatores que influenciam na precisão da

detecção, como o tamanho e a localização do vazamento. Outro fator que pode ser relacionado ao aumento da precisão de localização dos vazamentos é o número de eletrodos utilizados na coleta de dados, como mostra o estudo de Lee e Oh (2018). Neste estudo estes fatores foram mantidos constantes, para que não houvesse interferência nos resultados obtidos entre os dois métodos analisados. Mas destaca-se que a utilização de um maior número de eletrodos poderia corroborar com uma maior precisão dos resultados obtidos.

Apesar de estudos confirmarem que a ERT é uma técnica confiável para a detecção de vazamentos, quando realizados em escala de laboratório, deve-se ter em conta os efeitos de borda gerados pelo experimento de bancada. Deste modo, Hung et al. (2019) investigaram numericamente os efeitos de borda no ERT 2D sob várias condições simplificadas. Fatores potenciais, incluindo contraste de resistividade, profundidade e tamanho de objetos enterrados, e espaçamento dos eletrodos foram considerados, e seus resultados revelaram que algumas características podem se projetar na tomografia 2D até certo ponto, dependendo dos fatores mencionados.

Outro ponto que deve se atentar, está na diferença entre as pseudoseções do método tradicional e do método novo. O novo método conseguiu atingir uma maior profundidade, entretanto, ressalta-se que uma das características do arranjo polo-dipolo é a sua assimetria, o que acarreta no surgimento de feições de resistividade aparente igualmente assimétricas na pseudoseção, mesmo existindo estruturas simétricas em subsuperfície (GANDOLFO, 2007).

A forma de se avaliar o desempenho da detecção também se faz importante. Tijani (2022) avaliou o desempenho dos modelos de detecção propostos em sua pesquisa avaliando usando cinco métricas estatísticas. Dentre elas o Erro quadrático médio, foi usado para medir o grau de diferença entre o estado de vazamento previsto e o estado de vazamento medido no campo e, o coeficiente de determinação (R^2) foi usado para avaliar o grau de ajuste entre os valores previstos e medidos.

Neste trabalho utilizou-se o erro padrão médio e o coeficiente de determinação. A menor inclinação de reta foi obtida com o método tradicional sem vazamento, e a maior inclinação foi obtida com o novo método com vazamento. O que é esperado, já que sem vazamento as propriedades elétricas do meio não serão alteradas da mesma maneira. Quando se avalia o R^2 o valor encontrado para o novo método é o menor dentre os três analisados (em torno de 20%).

Quando se analisa as médias e medianas dos valores de resistividade aparente

nos cenários testados percebe-se que a faixa de dúvida de um possível vazamento é variável para o tradicional, aumentando de acordo com o aumento da profundidade, e no novo método a faixa é praticamente igual para toda profundidade. Em contrapartida valores de erro são maiores no novo método, e isso pode ser explicado pelo fato de se ter mais de um meio no qual os eletrodos estão posicionados.

Desta forma, este trabalho mostrou que o método é viável para detecção de vazamentos de forma mais precisa. Ele também pode ser aplicado em escala real, o que proporcionaria uma melhora nas informações a respeito de vazamentos de água em tubulações enterradas e que não funcionem de maneira pressurizada.

7 CONCLUSÕES DA TESE

A perda de água por vazamentos em sistemas de distribuição é uma questão significativa, com impactos econômicos, ambientais e operacionais substanciais. Por este motivo, a detecção de vazamentos nesses sistemas se faz de extrema importância. De maneira a tentar identificar os locais passíveis de perdas em tubulações de grande diâmetro (adutoras), o presente trabalho analisou criticamente, por meio de uma revisão sistemática da literatura, a aplicação de métodos geofísicos na detecção de vazamentos em tubulações de água. Além de desenvolver um novo método da ERT que poderá fornecer valores mais precisos nesse tipo de detecção. A comparação da precisão entre as duas formas de aplicação do ERT para localização de vazamentos em adutoras de grandes diâmetros e em concreto é, portanto, algo inédito internacionalmente.

Essa nova aplicação consistiu em inserir o eletrodo de corrente dentro da tubulação de água, enquanto o par de eletrodos de corrente foram locados na superfície. As análises comparando as duas metodologias foram realizadas em laboratório, enquanto a utilização da ERT como ferramenta para detecção de vazamentos foi comprovada em experimentos feitos em campo. Esperou-se que a condução da corrente elétrica na água, dentro da tubulação, fornecesse um campo elétrico mais direcionado ao local do vazamento, tornando assim o método novo mais preciso que o tradicional. Isso foi comprovado, uma vez que a faixa de dúvida de um possível vazamento é variável para o método tradicional, aumentando de acordo com o aumento da profundidade, e no novo método a faixa é praticamente igual para toda profundidade. Entretanto, ressalta-se que há um maior erro nas medidas do novo método, que pode ser explicado pelo fato de se ter mais de um meio no qual os eletrodos estão posicionados.

Com este trabalho, percebe-se que existem diferentes questões relacionadas a vazamentos em diferentes partes do mundo, principalmente considerando formas funcionamento de tubulações, mas que apesar disso, independente do país, as técnicas mais aplicadas para detecção de vazamentos são acústicas e existem relações entre as técnicas de detecção de vazamentos, materiais das tubulações e funcionamento hidráulico dos sistemas. Outro ponto observado com o decorrer da pesquisa, está no fato de que a precisão dos resultados depende de fatores ambientais (umidade do solo e granulometria) e da duração associada a cada

vazamento.

Nas coletas de campo as precisões alcançadas foram comparáveis a técnicas de GPR, que já são empregadas para fins de detecção de vazamento, enquanto nas análises laboratoriais o novo método forneceu resultados mais precisos, na ordem de 70% dos valores medianos na determinação dos vazamentos.

Tendo em vista os resultados aqui obtidos e, que a eficiência na gestão dos recursos hídricos é um desafio crucial para enfrentar as demandas crescentes das sociedades contemporâneas, espera-se que este trabalho seja uma contribuição significativa para o desenvolvimento de metodologias avançadas de detecção de vazamentos, proporcionando ferramentas mais eficazes e sustentáveis para enfrentar os desafios contemporâneos na gestão de redes de distribuição de água.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das limitações encontradas na presente pesquisa, propõe-se futuros estudos para responder questões relativas ao novo método de ERT proposto:

- Analisar a influência da quantidade de eletrodos na identificação de vazamentos já que a presente pesquisa utilizou apenas 4 eletrodos no experimento laboratorial e 96 eletrodos na análise de campo;
- Analisar a influência do tamanho e localização do vazamento, seja ele em escala real ou em teste de laboratório, uma vez que tal análise não foi possível devido a limitações do tamanho do modelo laboratorial;
- Analisar a influência de diferentes tipos de solo (mais arenosos e/ou com diferentes porcentagens de argila), geometria da tubulação (seção transversal com diferentes tamanhos) e diferentes materiais de tubulação (concreto em modelo laboratorial e PVC em escala real);
- Analisar numericamente aplicação de ERT em vazamentos de forma a expandir cenários de uso considerando diferentes situações (como as indicadas no item anterior) e com diferentes condições de funcionamento hidráulico (total ou parcialmente preenchidos e com fluxo na tubulação).

9 REFERÊNCIAS

- ABOUHAMAD, M.; ZAYED, T.; MOSELHI, O. **Leak Detection in Buried Pipes Using Ground Penetrating Radar—A Comparative Study**. Pipelines 2016. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 11 jul. 2016. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784479957.039>>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional**. Brasília: ANA: Engecorps/Cobrape, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil - Informe 2015**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_2015.pdf>.
- ALFACOMP. **Funcionamento geral do abastecimento de água**. Disponível em: <<https://alfacomp.net/2019/04/18/abastecimento-de-agua/>>.
- ALGEO, J.; VAN DAM, R.; SLATER, L. Early-Time GPR: A Method to Monitor Spatial Variations in Soil Water Content during Irrigation in Clay Soils. **Vadose Zone Journal**, v. 15, p. 9, 3 nov. 2016.
- ALMEIDA, F.; BRENNAN, M.; JOSEPH, P.; WHITFIELD, S.; DRAY, S.; PASCHOALINI, A. On the acoustic filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe and its effect on leak detection: an experimental investigation. **Sensors**, v. 14, n. 3, p. 5595–5610, 2014.
- ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; DE LIMA, F. K.; IWANAGA, M. K.; SCUSSEL, O. Using a geophone as an actuator to estimate the velocity of leak noise propagation in buried water pipes. **Applied Acoustics**, v. 184, p. 108251, 2021.
- ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; DRAY, S.; WHITFIELD, S.; PASCHOALINI, A. T. Towards an in-situ measurement of wave velocity in buried plastic water distribution pipes for the purposes of leak location. **Journal of Sound and Vibration**, v. 359, p. 40–55, 2015.
- ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; GAO, Y.; PASCHOALINI, A. T. The effects of resonances on time delay estimation for water leak detection in plastic pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 420, p. 315–329, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.935: 2011. Investigações ambientais - Aplicação de métodos geofísicos**, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.097: 2012. Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio**, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.181: 2016. Solo - Análise granulométrica**, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.457:2016 Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.117-1: 2020. Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos. Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoeletrica**, 2020.
- ATEF, A.; ZAYED, T.; HAWARI, A.; KHADER, M.; MOSELHI, O. Multi-tier method using infrared photography and GPR to detect and locate water leaks. . 1 jan. 2016, p. 162–170.
- AYALA-CABRERA, D.; HERRERA, M.; IZQUIERDO, J.; PÉREZ-GARCÍA, R. Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images. **Journal of Applied Geophysics**, v. 75, n. 4, p. 679–686, dez. 2011.
- AZEVEDO, R. C. DE; ENSSLIN, L. **Metodologia da pesquisa para engenharias**. 1ª ed. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2020.
- BELLANOVA, J.; CALAMITA, G.; CATAPANO, I.; CIUCCI, A.; CORNACCHIA, C.; GENNARELLI, G.; GIOCOLI, A.; FISANGHER, F.; LUDENO, G.; MORELLI, G.; PERRONE, A.; PISCITELLI, S.; SOLDVIERI, F.; LAPENNA, V. GPR and ERT Investigations in Urban Areas: the Case-Study of Matera (Southern Italy). **Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 1879**, v. 12, n. 11, p. 1879, 10 jun. 2020.
- BIMPAS, M.; AMDITIS, A.; UZUNOGLU, N. Detection of water leaks in supply pipes using continuous

wave sensor operating at 2.45 GHz. **Journal of Applied Geophysics**, v. 70, n. 3, p. 226–236, 2010.

BINLEY, A.; DAILY, W. The Performance of Electrical Methods for Assessing the Integrity of Geomembrane Liners in Landfill Caps and Waste Storage Ponds. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 8, n. 4, p. 227–237, 27 dez. 2003.

BORGES, W. R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: Estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP**. São Paulo: Tese de doutorado, 2007.

BRAGA, A. C. DE O. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BRASIL. Decreto Nº 5.440, de 4 de maio de 2005. . 2005.

BRASIL. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2016**. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das Cidades, 2018.

BRASIL. **Agência Nacional das Águas**. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>>.

BRASIL. **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**. Brasília: [s.n.].

BRENNAN, M.; DE ALMEIDA, F.; JOSEPH, P.; DRAY, S.; WHITFIELD, S. Wavespeed measurement in buried water distribution pipes and its significance in leak location. **Key Engineering Materials**, v. 569, p. 1202–1209, 2013.

BRENNAN, M. J.; GAO, Y.; AYALA, P. C.; ALMEIDA, F. C. L.; JOSEPH, P. F.; PASCHOALINI, A. T. Amplitude distortion of measured leak noise signals caused by instrumentation: Effects on leak detection in water pipes using the cross-correlation method. **Journal of Sound and Vibration**, v. 461, p. 114905, 24 nov. 2019.

BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; GAO, Y. Some recent research results on the use of acoustic methods to detect water leaks in buried plastic water pipes. **Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton**, p. 1–7, 2008.

BRENNAN, M. J.; KARIMI, M.; ALMEIDA, F. C. L.; DE LIMA, F. K.; AYALA, P. C.; OBATA, D.; PASCHOALINI, A. T.; KESSISSOGLOU, N. On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes. **Procedia engineering**, v. 199, p. 1350–1355, 2017.

BRENNAN, M. J.; KARIMI, M.; MUGGLETON, J. M.; ALMEIDA, F. C. L.; DE LIMA, F. K.; AYALA, P. C.; OBATA, D.; PASCHOALINI, A. T.; KESSISSOGLOU, N. On the effects of soil properties on leak noise propagation in plastic water distribution pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 427, p. 120–133, 2018.

BRENNAN, M. J.; KROLL DE LIMA, F.; DE ALMEIDA, F. C. L.; JOSEPH, P. F.; PASCHOALINI, A. T. A virtual pipe rig for testing acoustic leak detection correlators: Proof of concept. **Applied Acoustics**, v. 102, p. 137–145, 15 jan. 2016.

BUTTERFIELD, J. D.; COLLINS, R. P.; BECK, S. B. M. Influence of pipe material on the transmission of vibroacoustic leak signals in real complex water distribution systems: case study. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 9, n. 3, p. 5018003, 2018a.

BUTTERFIELD, J. D.; KRYNKIN, A.; COLLINS, R. P.; BECK, S. B. M. Experimental investigation into vibro-acoustic emission signal processing techniques to quantify leak flow rate in plastic water distribution pipes. **Applied Acoustics**, v. 119, p. 146–155, 2017.

BUTTERFIELD, J. D.; MERUANE, V.; COLLINS, R. P.; MEYERS, G.; BECK, S. B. M. Prediction of leak flow rate in plastic water distribution pipes using vibro-acoustic measurements. **Structural Health Monitoring**, v. 17, n. 4, p. 959–970, 2018b.

BUTTERFIELD, J. D.; MEYERS, G.; MERUANE, V.; COLLINS, R. P.; BECK, S. B. M. Experimental investigation into techniques to predict leak shapes in water distribution systems using vibration measurements. **Journal of Hydroinformatics**, v. 20, n. 4, p. 815–828, 2018c.

CAETANO, T. R.; SANTOS, H. A.; VAN DAM, R. L. Leak identification in non-pressurized concrete pipelines by the use of geophysical methods. **Journal of Applied Geophysics**, v. 208, p. 104883, 1 jan. 2023.

CATALDO, A.; BENEDETTO, E. DE; CANNAZZA, G.; MASCIULLO, A.; GIAQUINTO, N.; D'AUCCELLI, G. M.; COSTANTINO, N.; LEO, A. DE; MIRAGLIA, M. Recent advances in the TDR-based leak detection system for pipeline inspection. **Measurement**, v. 98, p. 347–354, 1 fev. 2017a.

CATALDO, A.; CANNAZZA, G.; DE BENEDETTO, E.; MIRAGLIA, M.; ANCORA, D.; GIAQUINTO, N. An electromagnetic-based method for pinpointing leaks in buried pipes: A practical validation BT - New techniques and tools for improving efficiency in leakage detection and management. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 13, n. 4, p. 966–976, 2013.

CATALDO, A.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G.; GIAQUINTO, N.; SAVINO, M.; ADAMO, F. Leak detection through microwave reflectometry: From laboratory to practical implementation. **Measurement**, v. 47, p. 963–970, 1 jan. 2014a.

CATALDO, A.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G.; HUEBNER, C.; TREBBELS, D. Performance comparison of TDR-based systems for permanent and diffused detection of water content and leaks. **Measurement Science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 014015, 1 jan. 2017b.

CATALDO, A.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G.; LEUCCI, G.; DE GIORGI, L.; DEMITRI, C.; BENEDETTO, E. DE; CANNAZZA, G.; LEUCCI, G.; GIORGI, L. DE; DEMITRI, C. Enhancement of leak detection in pipelines through time-domain reflectometry/ground penetrating radar measurements. **IET Science, Measurement and Technology**, v. 11, n. 6, p. 1–7, 2017c.

CATALDO, A.; PERSICO, R.; LEUCCI, G.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G.; MATERA, L.; DE GIORGI, L. Time domain reflectometry, ground penetrating radar and electrical resistivity tomography: A comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes. **NDT & E International**, v. 62, p. 14–28, mar. 2014b.

CODY, R. A.; DEY, P.; NARASIMHAN, S. Linear Prediction for Leak Detection in Water Distribution Networks. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 11, n. 1, fev. 2020a.

CODY, R. A.; NARASIMHAN, S. A field implementation of linear prediction for leak-monitoring in water distribution networks. **Advanced Engineering Informatics**, v. 45, p. 101103, 1 ago. 2020.

CODY, R. A.; TOLSON, B. A.; ORCHARD, J. Detecting leaks in water distribution pipes using a deep autoencoder and hydroacoustic spectrograms. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 34, n. 2, p. 4020001, 2020b.

CODY, R.; HARMOUCHE, J.; NARASIMHAN, S. Leak detection in water distribution pipes using singular spectrum analysis. **Urban Water Journal**, v. 15, n. 7, p. 636–644, 2018.

COGGON, J. H. A comparison of ip electrode arrays. **GEOPHYSICS**, v. 38, n. 4, p. 737–761, ago. 1973.

COLOMBO, A. F.; LEE, P.; KARNEY, B. W. A selective literature review of transient-based leak detection methods. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 2, n. 4, p. 212–227, 1 abr. 2009.

COPASA. **Programa de redução de perdas de água no sistema de distribuição**. Belo Horizonte: Copasa, 2003.

COPASA. **Dimensão Ambiental**. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/media2/RelAnual2011/Copasa/ambiental.html>>. Acesso em: 2 ago. 2021.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CROCCO, L.; PRISCO, G.; SOLDOVIERI, F.; CASSIDY, N. J. Early-stage leaking pipes GPR monitoring via microwave tomographic inversion. **Journal of Applied Geophysics**, v. 67, n. 4, p. 270–277, abr. 2009.

D'AUCCELLI, G. M.; GIAQUINTO, N.; PIUZZI, E.; CATALDO, A.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G. **Transmission line simulator for TDR-based measurements BT - 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC 2017, May 22, 2017 - May 25, 2017**. : I2MTC 2017 - 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings. Politecnico di Bari, Department of Electrical and Information Engineering, Bari; 70125, Italy Dept. of Information Engineering Electronics and Telecommunications (DIET), Sapienza University of Rome, Rome, Italy University of Salento, Department of Engineering: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017 Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/I2MTC.2017.7969865>>

DAHLIN, T.; ZHOU, B. A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays.

Geophysical Prospecting, v. 52, p. 379–398, 1 set. 2004.

DASHWOOD, B.; GUNN, D.; CURIONI, G.; INAUEN, C.; SWIFT, R.; CHAPMAN, D.; ROYAL, A.; HOBBS, P.; REEVES, H.; TAXIL, J. Surface wave surveys for imaging ground property changes due to a leaking water pipe. **Journal of Applied Geophysics**, v. 174, p. 103923, 1 mar. 2020.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. GROUND-PENETRATING RADAR FOR HIGH-RESOLUTION MAPPING OF SOIL AND ROCK STRATIGRAPHY. **Geophysical Prospecting**, v. 37, n. 5, p. 531–551, 1989.

DE ALMEIDA, F.; JOSEPH, P.; BRENNAN, M.; WHITFIELD, S.; DRAY, S. The dynamic behaviour of a buried water pipe and its effect on leak location using acoustic methods. **Key Engineering Materials**, v. 569, p. 1194–1201, 2013.

DE COSTER, A.; PÉREZ MEDINA, J. L.; NOTTEBAERE, M.; ALKHALIFEH, K.; NEYT, X.; VANDERDONCKT, J.; LAMBOT, S. Towards an improvement of GPR-based detection of pipes and leaks in water distribution networks. **Journal of Applied Geophysics**, v. 162, p. 138–151, 1 mar. 2019.

DE MORAIS, F.; DE ALMEIDA PRADO BACELLAR, L.; ARANHA, P. R. A. Study of flow in vadose zone from electrical resistivity surveys. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 2, p. 115–122, abr. 2008.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). **Guidelines for water loss reduction: A focus on pressure management**. Eschborn: [s.n.].

DUAN, H.-F. F. Accuracy and Sensitivity Evaluation of TFR Method for Leak Detection in Multiple-Pipeline Water Supply Systems. **Water Resources Management**, v. 32, n. 6, p. 2147–2164, 1 abr. 2018.

DUTTA, R.; COHN, A. G.; MUGGLETON, J. M. 3D mapping of buried underworld infrastructure using dynamic Bayesian network based multi-sensory image data fusion. **Journal of Applied Geophysics**, v. 92, p. 8–19, 2013.

EL-ABBASY, M. S.; MOSLEH, F.; SENOUCI, A.; ZAYED, T.; AL-DERHAM, H. Locating leaks in water mains using noise loggers. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 22, n. 3, p. 04016012, 1 set. 2016.

EL-ZAHAB, S.; ASAAD, A.; MOHAMMED ABDELKADER, E.; ZAYED, T. Development of a clustering-based model for enhancing acoustic leak detection. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 46, n. 6, p. 278–286, 2019.

EL-ZAHAB, S.; JAZZAR, I.; ZAYED, T. A study of accelerometer signal decay in small pipelines. **Signal, Image and Video Processing**, v. 16, n. 3, p. 835–840, 2022.

EL-ZAHAB, S.; MOHAMMED ABDELKADER, E.; ZAYED, T. An accelerometer-based leak detection system. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 108, p. 276–291, 2018.

EL-ZAHAB, S.; ZAYED, T. Leak detection in water distribution networks: an introductory overview. **Smart Water**, v. 4, n. 1, dez. 2019.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; LACERDA, R. T. DE O.; TASCA, J. E. ProKnow-C, knowledge development process-constructivist. **Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brasil**, v. 10, n. 4, p. 2015, 2010.

FABBIANO, L.; VACCA, G.; DINARDO, G. Smart water grid: A smart methodology to detect leaks in water distribution networks. **Measurement**, v. 151, p. 107260, 1 fev. 2020.

FALLAHSAFARI, M.; HAFIZI, M. K.; GHALANDARZADEH, A. **The relationship between clay geotechnical data and clay electrical resistivity**. 2013Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:160004572>>

FARLEY, M. **Finding “difficult” leaks**International Water Association Specialist Group – Efficient Operation and Management, 2008.

FARLEY, M.; TROW, S. **Losses in Water Distribution Networks**. 1st ed. London: IWA Publishing, 2003.

FATEMI AGHDA, S. M.; GANJALIPOUR, K.; NABIOLLAHI, K. Assessing the accuracy of TDR-based water leak detection system. **Results in Physics**, v. 8, p. 939–948, 1 mar. 2018.

FERRANTE, M.; BRUNONE, B.; MENICONI, S. Wavelets for the Analysis of Transient Pressure Signals for Leak Detection. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 133, n. 11, p. 1274–1282, nov. 2007.

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

FURMAN, A.; FERRE, T. P. A.; WARRICK, A. W. A Sensitivity Analysis of Electrical Resistivity Tomography Array Types Using Analytical Element Modeling. **Vadose Zone Journal**, v. 2, n. 3, p. 416–423, 1 ago. 2003.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. São Paulo: Tese de doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo., 2007.

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, n. 3, p. 227–235, 2007.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. **Detecting leaks in buried plastic pipes using correlation techniques. Part 2: On the selection of acoustic/vibration sensors**. Proc., 18th Int. Congress on Acoustics. Southampton, Hampshire: Univ. of Southampton. **Anais...**2004a

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F. **Detecting leaks in buried plastic pipes using correlation techniques: Part 1. A model of the correlation function of leak noise**. International Congress on Acoustics. **Anais...**2004b

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F. A comparison of time delay estimators for the detection of leak noise signals in plastic water distribution pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 292, n. 3–5, p. 552–570, 9 maio 2006.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F. On the effects of reflections on time delay estimation for leak detection in buried plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 325, n. 3, p. 649–663, 2009.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; HUNAIDI, O. A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 277, n. 1–2, p. 133–148, 6 out. 2004c.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; HUNAIDI, O. On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 283, n. 3–5, p. 927–941, maio 2005.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; LIU, Y.; ALMEIDA, F. C. L.; JOSEPH, P. F. Improving the shape of the cross-correlation function for leak detection in a plastic water distribution pipe using acoustic signals. **Applied Acoustics**, v. 127, p. 24–33, 2017a.

GAO, Y.; LIU, Y. Theoretical and experimental investigation into structural and fluid motions at low frequencies in water distribution pipes. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 90, p. 126–140, 2017.

GAO, Y.; LIU, Y.; MA, Y.; CHENG, X.; YANG, J. Application of the differentiation process into the correlation-based leak detection in urban pipeline networks. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 112, p. 251–264, 1 nov. 2018.

GAO, Y.; LIU, Y.; MUGGLETON, J. M. Axisymmetric fluid-dominated wave in fluid-filled plastic pipes: Loading effects of surrounding elastic medium. **Applied Acoustics**, v. 116, p. 43–49, 15 jan. 2017b.

GAO, Y.; MUGGLETON, J. M.; LIU, Y.; RUSTIGHI, E. An analytical model of ground surface vibration due to axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 395, p. 142–159, 12 maio 2017c.

GAO, Y.; SUI, F.; MUGGLETON, J. M.; YANG, J. Simplified dispersion relationships for fluid-dominated axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 375, p. 386–402, 2016.

GIAQUINTO, N.; CATALDO, A.; D'AUCCELLI, G. M.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G. Water Detection Using Bi-Wires as Sensing Elements: Comparison Between Capacimetry-Based and Time-of-Flight-Based Techniques. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 11, p. 4309–4317, 2016.

GONÇALVES, E.; ALVIM, P. R. A. Pesquisa e combate a vazamentos não visíveis. In: GOMES, A. S. (Ed.). **Guias práticos: Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água**. Brasília: SNSA - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2007. p. 89.

GUO, G.; YU, X.; LIU, S.; XU, X.; MA, Z.; WANG, X.; HUANG, Y.; SMITH, K. Novel leakage detection and localization method based on line spectrum pair and cubic interpolation search. **Water Resources Management**, v. 34, p. 3895–3911, 2020.

HARMOUCHE, J.; NARASIMHAN, S. Long-Term Monitoring for Leaks in Water Distribution Networks Using Association Rules Mining. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 16, n. 1, p. 258–266, 2020.

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

HUNAIDI, O.; CHU, W.; WANG, A.; GUAN, W. Detecting leaks in plastic pipes. **American Water Works Association. Journal**, v. 92, n. 2, p. 82–94, fev. 2000.

HUNAIDI, O.; WANG, A. A new system for locating leaks in urban water distribution pipes. **Management of Environmental Quality**, v. 17, n. 4, p. 450–466, 2006.

HUNG, Y.-C.; LIN, C.-P.; LEE, C.-T.; WENG, K.-W. 3D and Boundary Effects on 2D Electrical Resistivity Tomography. **Applied Sciences**, v. 9, n. 15, p. 2963, 24 jul. 2019.

IWANAGA, M. K.; BRENNAN, M. J.; ALMEIDA, F. C. L.; SCUSSEL, O.; CEZAR, S. O. A laboratory-based leak noise simulator for buried water pipes. **Applied Acoustics**, v. 185, p. 108346, 1 jan. 2022.

JORDANA, J.; GASULLA, M.; PALLÀS-ARENY, R. Electrical resistance tomography to detect leaks from buried pipes. **Measurement Science and Technology**, v. 12, n. 8, p. 1061–1068, 1 ago. 2001.

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.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Third ed. [s.l.] Blackwell Science Ltd, 2002.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KING-WAH LAU, P.; WEI-YAT CHEUNG, B.; WAI-LOK LAI, W.; FUNG-CHU SHAM, J. Characterizing pipe leakage with a combination of GPR wave velocity algorithms. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 109, p. 103740, 1 mar. 2021.

KIRSCH, R.; YARAMANCI, U. Geoelectrical methods. In: KIRSCH, R. (Ed.). **Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology**. 2nd. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 556.

LAI, W. W. L.; CHANG, R. K. W.; SHAM, J. F. C.; PANG, K. Perturbation mapping of water leak in buried water pipes via laboratory validation experiments with high-frequency ground penetrating radar (GPR). **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 52, p. 157–167, 1 fev. 2016.

LEE, B.; OH, S. Modified electrical survey for effective leakage detection at concrete hydraulic facilities. **Journal of Applied Geophysics**, v. 149, p. 114–130, 1 fev. 2018.

LEINOV, E.; LOWE, M. J. S.; CAWLEY, P. Investigation of guided wave propagation and attenuation in pipe buried in sand. **Journal of Sound and Vibration**, v. 347, p. 96–114, 7 jul. 2015.

LI, S.; SONG, Y.; ZHOU, G. Leak detection of water distribution pipeline subject to failure of socket joint based on acoustic emission and pattern recognition. **Measurement**, v. 115, p. 39–44, 2018.

LI, S.; WANG, X.; ZHAO, M. An improved cross-correlation method based on wavelet transform and energy feature extraction for pipeline leak detection. **Smart structures and systems**, v. 16, n. 1, p. 213–222, 2015.

LIEMBERGER, R.; WYATT, A. Quantifying the global non-revenue water problem. **Water Supply**, v. 19, n. 3, p. 831–837, 1 maio 2019.

LOKE, M. H. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies**, 2000. Disponível em: <<http://www.heritagegeophysics.com/images/lokenote.pdf>>

LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1. **Geophysical Prospecting**, v. 44, n. 1, p. 131–152, 1 jan. 1996.

LU, P.; CHEN, S.; SHENG, X.; GAO, Y. **Application of the Differential Evolutionary Algorithm to the Estimation of Pipe Embedding Parameters***Sensors*, 2022a.

LU, P.; SHENG, X.; GAO, Y.; WANG, R. Influence of shear effects on the characteristics of axisymmetric wave propagation in a buried fluid-filled pipe. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 35, n. 1, p. 74, 2022b.

MANZI, D. **Deteção e localização de rompimentos em redes de distribuição de água a partir de análise dos sinais de pressão em regime transitório**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2017.

MARMAROKOPOS, K.; DOUKAKIS, D.; FRANTZISKONIS, G.; AVLONITIS, M. Leak detection in plastic water supply pipes with a high signal-to-noise ratio accelerometer. **Measurement and Control**, v. 51, n. 1–2, p. 27–37, 2018.

MARTINI, A.; RIVOLA, A.; TRONCOSSI, M. Autocorrelation Analysis of Vibro-Acoustic Signals Measured in a Test Field for Water Leak Detection. **Applied Sciences**, v. 8, n. 12, dez. 2018.

MARTINI, A.; TRONCOSSI, M.; RIVOLA, A. **Vibration monitoring as a tool for leak detection in water distribution networks**. International Conference Surveillance. **Anais...**2013

MARTINI, A.; TRONCOSSI, M.; RIVOLA, A. Automatic Leak Detection in Buried Plastic Pipes of Water Supply Networks by Means of Vibration Measurements. **Shock and Vibration**, 2015.

MARTINI, A.; TRONCOSSI, M.; RIVOLA, A. Investigation on the detection of water leaks in small-diameter polyethylene pipes using Acoustic Emission signals. **WSEAS TRANSACTIONS ON FLUID MECHANICS**, v. 11, p. 106–111, 2016a.

MARTINI, A.; TRONCOSSI, M.; RIVOLA, A. Leak detection in water-filled small-diameter polyethylene pipes by means of acoustic emission measurements. **Applied Sciences**, v. 7, n. 1, p. 2, 2016b.

MARTINI, A.; TRONCOSSI, M.; RIVOLA, A. Vibroacoustic Measurements for Detecting Water Leaks in Buried Small-Diameter Plastic Pipes. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 8, n. 4, p. 04017022, nov. 2017.

MAYS, L. W. Water Distribution. In: **Water Resources Handbook**. Tempe, Arizona: McGraw-Hill, 1996. p. 1–44.

MILSOM, J. **Field geophysics**. 3rd. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

MOJICA, A.; DÍAZ, I.; HO, C. A.; OGDEN, F.; PINZÓN, R.; FÁBREGA, J.; VEGA, D.; HENDRICKX, J. Study of Seasonal Rainfall Infiltration via Time-Lapse Surface Electrical Resistivity Tomography: Case Study of Gamboa Area, Panama Canal Watershed. **Air, Soil and Water Research**, v. 6, p. ASWR.S12306, 1 jan. 2013.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. [s.l.] LTC, 2021.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. DE. Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água. **Pesquisa Operacional**, v. 30, n. 1, p. 15–32, abr. 2010.

MOSER, G.; PAAL, S. G.; SMITH, I. F. C. Performance comparison of reduced models for leak detection in water distribution networks. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, n. 3, p. 714–726, 2015.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J. Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 278, n. 3, p. 527–537, 6 dez. 2004.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J. Axisymmetric wave propagation in buried, fluid-filled pipes: effects of wall discontinuities. **Journal of Sound and Vibration**, v. 281, n. 3–5, p. 849–867, 22 mar. 2005.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; GAO, Y. Determining the location of buried plastic water pipes from measurements of ground surface vibration. **Journal of Applied Geophysics**, v. 75, n. 1, p. 54–61, set. 2011.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; LINFORD, P. W. Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: wavenumber measurements in in vacuo and buried pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 270, n. 1–2, p. 171–190, 6 fev. 2004.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; PINNINGTON, R. J. Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection. **Journal of Sound and Vibration**, v. 249, n. 5, p. 939–954, 2002.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; PINNINGTON, R. J.; GAO, Y. A novel sensor for measuring the acoustic pressure in buried plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 295, n. 3–5, p. 1085–1098, 22 ago. 2006.

MUGGLETON, J. M.; PAPANDREOU, B. A shear wave ground surface vibration technique for the detection of buried pipes. **Journal of Applied Geophysics**, v. 106, n. Supplement C, p. 164–172, 2014.

MUGGLETON, J. M.; RUSTIGHI, E. **A novel method for the remote condition assessment of buried pipelines using low-frequency axisymmetric waves BT - 13th International Conference on Motion and Vibration Control, MOVIC 2016 and the 12th International Conference on Recent Advances in Struc.** : Journal of Physics: Conference Series. Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, Highfield, Southampton, United Kingdom: Institute of Physics Publishing, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/744/1/012056>>

MUGGLETON, J. M.; YAN, J. Wavenumber prediction and measurement of axisymmetric waves in buried fluid-filled pipes: Inclusion of shear coupling at a lubricated pipe/soil interface. **Journal of Sound and Vibration**, v. 332, n. 5, p. 1216–1230, 2013.

MUNTAKIM, A. H.; DHAR, A. S.; DEY, R. Interpretation of acoustic field data for leak detection in ductile iron and copper water-distribution pipes. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 8, n. 3, p. 5017001, 2017.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Methods and Tools for Managing Losses in Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 2, p. 166–174, 3 abr. 2012.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Methods and Tools for Managing Losses in Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 2, p. 166–174, mar. 2013.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S.; VAIRAVAMOORTHY, K. Water loss management in developing countries: Challenges and prospec. **Journal AWWA**, v. 101, n. 12, p. 57–68, dez. 2009.

MYSOREWALA, M. F.; CHEDED, L.; ALI, I. M. Leak detection using flow-induced vibrations in pressurized wall-mounted water pipelines. **IEEE Access**, v. 8, p. 188673–188687, 2020.

NOON, D. A.; STICKLEY, G. F.; LONGSTAFF, D. A frequency-independent characterisation of GPR penetration and resolution performance. **Journal of Applied Geophysics**, v. 40, n. 1–3, p. 127–137, 1 out. 1998.

OCAÑA-LEVARIÓ, S. J.; CARREÑO-ALVARADO, E. P.; AYALA-CABRERA, D.; IZQUIERDO, J. GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters. **Journal of Applied Geophysics**, v. 152, p. 236–247, 1 maio 2018.

PAN, S.; XU, Z.; LI, D.; LU, D. Research on detection and location of fluid-filled pipeline leakage based on acoustic emission technology. **Sensors**, v. 18, n. 11, p. 3628, 2018.

PARK, K. J.; KIM, Y. G. Identification of the shear velocities of near surface soils using fundamental leaky torsional guided waves. **NDT and E International**, v. 55, p. 90–95, 2013.

PAVIĆ, G. Experimental identification of physical parameters of fluid-filled pipes using acoustical signal processing. **Applied Acoustics**, v. 67, n. 9, p. 864–881, 2006.

PHILIPPI JR., A. Reúso de água: uma tendência que se firma. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. DOS (Eds.). **Reúso de Água**. 1ª ed. Barueri: Manole, 2003. p. 550.

PUUST, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A.; KOPPEL, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. **Urban Water Journal**, v. 7, n. 1, p. 25–45, fev. 2010.

RAMIREZ, A.; DAILY, W.; BINLEY, A.; LABRECQUE, D.; ROELANT, D. Detection of Leaks in Underground Storage Tanks Using Electrical Resistance Methods. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 1, n. 3, p. 189–203, dez. 1996.

REPUBLIC OF SOUTH AFRICA. **National water and sanitation master plan: Call to action - Ready for the future and ahead of the curve**. Pretoria: [s.n.].

- SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2005.
- SANDBERG, C.; HOLMES, J.; MCCOY, K.; KOPPITSCH, H. The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 25, n. 5, p. 906–909, 1989.
- 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
- SCUSSEL, O.; BRENNAN, M. J.; MUGGLETON, J. M.; ALMEIDA, F. C. L. L.; PASCHOALINI, A. T. Estimation of the bulk and shear moduli of soil surrounding a plastic water pipe using measurements of the predominantly fluid wave in the pipe. **Journal of Applied Geophysics**, v. 164, p. 237–246, 1 maio 2019.
- SEVIL, J.; GUTIÉRREZ, F.; ZARROCA, M.; DESIR, G.; CARBONEL, D.; GUERRERO, J.; LINARES, R.; ROQUÉ, C.; FABREGAT, I. Sinkhole investigation in an urban area by trenching in combination with GPR, ERT and high-precision leveling. Mantled evaporite karst of Zaragoza city, NE Spain. **Engineering Geology**, v. 231, p. 9–20, 14 dez. 2017.
- TARDELLI FILHO, J. Controle e redução de perdas. In: **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. p. 643.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Electromagnetic Methods. In: **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. p. 343–521.
- THE EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL WATER SERVICES (EUREAU). **Europe's water in figures**, 2021. Disponível em: <<https://www.eureau.org/resources/publications/eureau-publications/5824-europe-s-water-in-figures-2021/file>>
- THORNTON, J.; STURM, R.; KUNKEL, G. **Water Loss Control**. 2. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2008.
- TIJANI, I. A.; ZAYED, T. Gene expression programming based mathematical modeling for leak detection of water distribution networks. **Measurement**, v. 188, p. 110611, 2022.
- TSO, C.-H. M.; JOHNSON, T. C.; SONG, X.; CHEN, X.; KURAS, O.; WILKINSON, P.; UHLEMANN, S.; CHAMBERS, J.; BINLEY, A. Integrated hydrogeophysical modelling and data assimilation for geoelectrical leak detection. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 234, p. 103679, 2020.
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. In: REBOUÇAS, A. DA C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Eds.). **Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, uso e conservação**. 3ª ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006. p. 399–432.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- WANG, J.; LIU, J.; LIU, H.; TIAN, Z.; CHENG, F. Modeling and locating underground water pipe leak with microseismic data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 136, p. 1–8, 1 jan. 2017.
- WHITELEY, R. J. Electrode Arrays in Resistivity and I.P. Prospecting: A Review. **Exploration Geophysics**, v. 4, n. 1, p. 1–29, 6 mar. 1973.
- XU, J.; CHAI, K. T.-C.; WU, G.; HAN, B.; WAI, E. L.-C.; LI, W.; YEO, J.; NIJHOF, E.; GU, Y. Low-Cost, Tiny-Sized MEMS Hydrophone Sensor for Water Pipeline Leak Detection. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 66, n. 8, p. 6374–6382, 2019.
- XUE, Z.; TAO, L.; FUCHUN, J.; RIEHLE, E.; XIANG, H.; BOWEN, N.; SINGH, R. P. Application of acoustic intelligent leak detection in an urban water supply pipe network. **Journal of Water Supply**:

Research and Technology-Aqua, v. 69, n. 5, p. 512–520, 19 jun. 2020.

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, p. 104918, 2023.

YAZDEKHASTI, S.; PIRATLA, K. R.; ATAMTURKTUR, S.; KHAN, A. Experimental evaluation of a vibration-based leak detection technique for water pipelines. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 14, n. 1, p. 46–55, 2 jan. 2018.

YAZDEKHASTI, S.; PIRATLA, K. R.; SORBER, J.; ATAMTURKTUR, S.; KHAN, A.; SHUKLA, H. Sustainability Analysis of a Leakage-Monitoring Technique for Water Pipeline Networks. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 11, n. 1, 1 fev. 2020.

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, n. 5, p. 4020021, 2020.

ZHANG, P.; HE, J.; HUANG, W.; YUAN, Y.; WU, C.; ZHANG, J.; YUAN, Y.; WANG, P.; YANG, B.; CHENG, K. Ground vibration analysis of leak signals from buried liquid-filled pipes: An experimental investigation. **Applied Acoustics**, v. 200, p. 109054, 2022.

ZHOU, Y. F.; THAM, L. G.; YAN, R. W. M.; XU, L. The mechanism of soil failures along cracks subjected to water infiltration. **Computers and Geotechnics**, v. 55, p. 330–341, 1 jan. 2014.

APÊNDICE A

ARTIGO	AUTORES	ANO	CITAÇÕES	REVISTA
3D mapping of buried underworld infrastructure using dynamic Bayesian network based multi-sensory image data fusion	Ritaban Dutta, Anthony G. Cohn, Jen M. Muggleton	2013	37	Journal of Applied Geophysics
A comparison of time delay estimators for the detection of leak noise signals in plastic water distribution pipes	Y Gao, MJ Brennan, PF Joseph	2006	215	Journal of sound and vibration
A field implementation of linear prediction for leak-monitoring in water distribution networks	RA Cody, S Narasimhan	2020	18	Advanced Engineering Informatics
A laboratory-based leak noise simulator for buried water pipes	M.K. Iwanaga, M.J. Brennan, F.C.L Almeida, O. Scussel a, S.O. Cezar	2022	3	Applied Acoustics
A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes	Y. Gao, M.J. Brennan, P.F. Joseph, J.M. Muggleton, O. Hunaidi	2004		Journal of Sound and Vibration
A novel method for the remote condition assessment of buried pipelines using low-frequency axisymmetric waves	JM Muggleton e E Rustighi	2016	6	Journal of Physics: Conference Series
A novel sensor for measuring the acoustic pressure in buried plastic water pipes	J.M. Muggleton, M.J. Brennan, R.J. Pinnington, Y. Gao	2006	43	Journal of Sound and Vibration
A shear wave ground surface vibration technique for the detection of buried pipes	JM Muggleton, B Papandreou	2014	26	Journal of Applied Geophysics
A study of accelerometer signal decay in small pipelines	S El-Zahab, I Jazzar, T Zayed	2022		Signal, Image and Video Processing
A virtual pipe rig for testing acoustic leak detection correlators: Proof of concept	M.J. Brennan, F. Kroll de Lima, F.C.L. de Almeida, P.F. Joseph, A.T. Paschoalini	2016	29	Applied Acoustics
Amplitude distortion of measured leak noise signals caused by instrumentation: Effects on leak detection in water pipes using the cross-correlation method	M.J. Brennan, Y. Gao, P.C. Ayala, F.C.L. Almeida, P.F. Joseph, A.T. Paschoalini	2019	17	Journal of Sound and Vibration
An accelerometer-based leak detection system	Samer El-Zahab, Eslam Mohammed Abdelkader, Tarek Zayed	2018	112	Mechanical Systems and Signal Processing
An analytical model of ground surface vibration due to axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes	Y Gao, JM Muggleton, Y Liu, E Rustighi	2017	24	Journal of Sound and Vibration
An improved cross-correlation method based on wavelet transform and energy feature extraction for pipeline leak detection	S Li, X Wang, M Zhao	2015	5	Smart structures and systems
Application of acoustic intelligent leak detection in an urban water supply pipe network	Zhang Xue; Lin Tao; Jiang Fuchun; Edmund Riehle; Hu Xiang; Ni Bowen; Rajendra Prasad Singh	2020	18	Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua

Application of the Differential Evolutionary Algorithm to the Estimation of Pipe Embedding Parameters	P Lu, S Chen, X Sheng, Y Gao	2022	1	Sensors
Application of the differentiation process into the correlation-based leak detection in urban pipeline networks	Y Gao, Y Liu, Y Ma, X Cheng, J Yang	2018	66	Mechanical Systems and Signal Processing
Autocorrelation Analysis of Vibro-Acoustic Signals Measured in a Test Field for Water Leak Detection	A Martini, A Rivola, M Troncossi	2018	57	Applied Sciences
Automatic Leak Detection in Buried Plastic Pipes of Water Supply Networks by Means of Vibration Measurements	A Martini, M Troncossi, A Rivola	2015	93	Shock and Vibration
Axisymmetric fluid-dominated wave in fluid-filled plastic pipes: Loading effects of surrounding elastic medium	Y Gao, Y Liu, JM Muggleton	2017	34	Applied Acoustics
Axisymmetric wave propagation in buried, fluid-filled pipes : Effects of wall discontinuities	JM Muggleton, MJ Brennan	2005	44	Journal of Sound and Vibration
Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: wavenumber measurements in in vacuo and buried pipes	JM Muggleton, MJ Brennan, PW Linfood	2004	162	Journal of Sound and Vibration
Detecting leaks in buried plastic pipes using correlation technique. Part 2. On the selection of acoustic/vibration sensors	Y Gao, MJ Brennan, P Joseph	2004	2	International Congress on Acoustics
Detecting leaks in buried plastic pipes using correlation techniques. Part 1. A model of the correlation function of leak noise	Y Gao, MJ Brennan, P Joseph	2004	8	International Congress on Acoustics
Detecting Leaks in Water Distribution Pipes Using a Deep Autoencoder and Hydroacoustic Spectrograms	Cody, Roya A., Bryan A. Tolson, and Jeff Orchard	2020	56	Journal of Computing in Civil Engineering
Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 GHz	M Bimpas, A Amditis, N Uzunoglu	2010	91	Journal of Applied Geophysics
Determining the location of buried plastic water pipes from measurements of ground surface vibration	JM Muggleton, MJ Brennan, Y Gao	2011	61	Journal of Applied Geophysics
Development of a clustering-based model for enhancing acoustic leak detection	El-Zahab, S., Asaad, A., Mohammed Abdelkader, E., Zayed, T.	2019	10	Canadian Journal of Civil Engineering
Early-stage leaking pipes GPR monitoring via microwave tomographic inversion	Crocco, L., Prisco, G., Soldovieri, F., Cassidy, N. J.	2009	90	Journal of Applied Geophysics
Estimating the spectrum of leak noise in buried plastic water distribution pipes using acoustic or vibration measurements remote from the leak	Scussel, O., Brennan, M. J., Almeida, F. C., Muggleton, J. M., Rustighi, E., & Joseph, P. F.	2021	24	Mechanical Systems and Signal Processing
Estimation of the bulk and shear moduli of soil surrounding a plastic water pipe using measurements of the predominantly fluid wave in the pipe	Scussel, O., Brennan, M. J., Muggleton, J. M., Almeida, F. C. L., & Paschoalini, A. T.	2019	10	Journal of Applied Geophysics
Evaluation of buried secondary containment liners	Anderson, S. L., Lai, A., Tart, Jr, R. B.	2002	1	Cold Regions Engineering: Cold Regions Impacts on Transportation and Infrastructure.

Experiment Study on Small Leak Detection and Diagnosis for Propulsion System Pipelines of Sounding Rocket	Wang, S., Dong, L., Wang, J., Wang, H., Ji, C., & Hong, J	2020	2	IEEE Access
Experimental evaluation of a vibration-based leak detection technique for water pipelines	Yazdekhesti, S., Piratla, K. R., Atamturktur, S., Khan, A.	2018	75	Structure and Infrastructure Engineering
Experimental identification of physical parameters of fluid-filled pipes using acoustical signal processing	Pavić, G.	2006	18	Applied Acoustics
Experimental investigation into techniques to predict leak shapes in water distribution systems using vibration measurements	Butterfield, J. D., Meyers, G., Meruane, V., Collins, R. P., Beck, S. B.	2018	27	Journal of Hydroinformatics
Experimental investigation into vibro-acoustic emission signal processing techniques to quantify leak flow rate in plastic water distribution pipes	JD Butterfield, A Krynkin, RP Collins, SBM Beck	2017	56	Applied Acoustics
Extracting acoustic leakage signals in buried pipes	S Yan, H Yuan, Y Gao, B Jin, L Deng, K Li	2023		Journal of Applied Geophysics
Gene Expression Programming Based Mathematical Modeling for Leak Detection of Water Distribution Networks	IA Tijani, T Zayed	2022	12	Measurement
GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters	Ocaña-Levario, S. J., Carreño-Alvarado, E. P., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J.	2018	25	Journal of Applied Geophysics
Ground vibration analysis of leak signals from buried liquid-filled pipes: An experimental investigation	Peng Zhang, Junguo He, Wanyi Huang, Yixing Yuan, Chenguang Wu, Jie Zhang, Yongqin Yuan, Pengkun Wang, Baoming Yang, Kun Cheng, Hao Cui, Lingduo Zhang	2022	2	Applied Acoustics
Identification of the shear velocities of near surface soils using fundamental leaky torsional guided waves	KJ Park, YG Kim	2013	2	Ndt & E International
Identifying Pipeline Leak Positions Potentially Connected to Soil Deformations through SAR Data Analysis	Mazzarotto, G., Tessari, G., Pizzaia, P., Salandin, P.	2023		Journal of Infrastructure Systems
Improving the shape of the cross-correlation function for leak detection in a plastic water distribution pipe using acoustic signals	Y Gao, MJ Brennan, Y Liu, FCL Almeida, PF Joseph	2017	68	Applied Acoustics
Influence of Pipe Material on the Transmission of Vibroacoustic Leak Signals in Real Complex Water Distribution Systems: Case Study	JD Butterfield, RP Collins, SBM Beck	2018	16	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
Influence of Shear Effects on the Characteristics of Axisymmetric Wave Propagation in a Buried Fluid-Filled Pipe	P Lu, X Sheng, Y Gao, R Wang	2022	3	Chinese Journal of Mechanical Engineering
Interpretation of Acoustic Field Data for Leak Detection in Ductile Iron and Copper Water-Distribution Pipes	AH Muntakim, AS Dhar, R Dey	2017	18	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
Investigation of guided wave propagation and attenuation in pipe buried	E Leinov, MJS Lowe, P Cawley	2015	172	Journal of Sound and Vibration

in sand				
Investigation on the detection of water leaks in small-diameter polyethylene pipes using Acoustic Emission signals	A MARTINI, M TRONCOSSI, A RIVOLA	2016		WSEAS TRANSACTIONS on FLUID MECHANICS
Key Factors That Influence the Frequency Range of Measured Leak Noise in Buried Plastic Water Pipes: Theory and Experiment	Scussel, O., Brennan, M. J., de Almeida, F. C. L., Iwanaga, M. K., Muggleton, J. M., Joseph, P. F., & Gao, Y.	2023		Acoustics
Leak Detection in Plastic Water Supply Pipes with a High Signal-to-Noise Ratio Accelerometer	Marmarokopos, K., Doukakis, D., Frantziskonis, G., & Avlonitis, M.	2018	33	Measurement and Control
Leak detection in water distribution networks: an introductory overview	S El-Zahab, T Zayed	2019	113	Smart Water
Leak detection in water distribution pipes using singular spectrum analysis	R Cody, J Harmouche, S Narasimhan	2018	33	Urban Water Journal
Leak Detection in Water-Filled Small-Diameter Polyethylene Pipes by Means of Acoustic Emission Measurements	A Martini, M Troncosi, A Rivola	2016	89	Applied Sciences
Leak Detection Methods in Water Distribution Networks: A Comparative Survey on Artificial Intelligence Applications	M Kammoun, A Kammoun, M Abid	2022	5	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
Leak detection of gas pipelines using acoustic signals based on wavelet transform and Support Vector Machine	R Xiao, Q Hu, J Li	2019	121	Measurement
Leak detection of water distribution pipeline subject to failure of socket joint based on acoustic emission and pattern recognition	S Li, Y Song, G Zhou	2018	110	Measurement
Leak Detection Using Flow-Induced Vibrations in Pressurized Wall-Mounted Water Pipelines	MF Mysorewala, L Cheded, IM Ali	2020	11	IEEE Access
Leak identification in non-pressurized concrete pipelines by the use of geophysical methods	TR Caetano, HA Santos, RL van Dam	2023		Journal of Applied Geophysics
Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes	JM Muggleton, MJ Brennan	2004	124	Journal of Sound and Vibration
Leaks in Pipe Networks	RS Pudar, JA Liggett	1992	448	Journal of hydraulic engineering
Linear Prediction for Leak Detection in Water Distribution Networks	RA Cody, P Dey, S Narasimhan	2020	28	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
Locating Leaks in Water Mains Using Noise Loggers	El-Abbasy, M. S., Mosleh, F., Senouci, A., Zayed, T., Al-Derham, H.	2016	31	Journal of Infrastructure Systems
Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images	Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Perez-Garcia, R.	2011	82	Journal of Applied Geophysics
Long-Term Monitoring for Leaks in Water Distribution Networks Using Association Rules Mining	J Harmouche, S Narasimhan	2019	21	IEEE Transactions on Industrial Informatics
Low-Cost, Tiny-Sized MEMS Hydrophone Sensor for Water Pipeline	Jinghui Xu, Kevin Tshun-Chuan	2018	57	IEEE Transactions on Industrial

Leak Detection	Chai, Guoqiang Wu, Beibei Han, Eva Leong-Ching Wai, Wei Li, Jason Yeo, Edwin Nijhof, Yuandong Gu			Electronics
Modeling and locating underground water pipe leak with microseismic data	J Wang, J Liu, H Liu, Z Tian, F Cheng	2017	14	Journal of Applied Geophysics
Novel Leakage Detection and Localization Method Based on Line Spectrum Pair and Cubic Interpolation Search	Guancheng Guo, Xipeng Yu, Shuming Liu, Xiyang Xu, Ziqing Ma, Xiaoting Wang, Yujun Huang, Kate Smith	2020	13	Water Resources Management
On the Acoustic Filtering of the Pipe and Sensor in a Buried Plastic Water Pipe and its Effect on Leak Detection: An Experimental Investigation	Almeida, F., Brennan, M., Joseph, P., Whitfield, S., Dray, S., & Paschoalini, A.	2014	86	Sensors
On the effects of reflections on time delay estimation for leak detection in buried plastic water pipes	Y Gao, MJ Brennan, PF Joseph	2009	71	Journal of Sound and Vibration
On the effects of soil properties on leak noise propagation in plastic water distribution pipes	M.J. Brennan, M. Karimi, J.M. Muggleton, F.C.L. Almeida, F. Kroll de Lima, P.C. Ayala, D. Obata, A.T. Paschoalini, N. Kessissoglou	2018	40	Journal of Sound and Vibration
On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes	M.J. Brennan, M. Karimi, F.C.L Almeida, F. Kroll de Lima, P.C. Ayala, D. Obata, A.T. Paschoalini, N. Kessissoglou	2017	18	Procedia Engineering
On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes	Gao, Y., Brennan, M., Joseph, P. F., Muggleton, J. M., Hunaidi, O	2005	227	Journal of sound and vibration
Optimization of drinking water distribution networks: Computer-based methods and constructal design	P Bieupoude, Y Azoumah, P Neveu	2012	36	Computers, Environment and Urban Systems
Performance comparison of reduced models for leak detection in water distribution networks	G Moser, SG Paal, IFC Smith	2015	39	Advanced Engineering Informatics
Prediction of leak flow rate in plastic water distribution pipes using vibro-acoustic measurements	JD Butterfield, V Meruane, RP Collins, G Meyers, SBM Beck	2018	27	Structural Health Monitoring
Research on Detection and Location of Fluid-Filled Pipeline Leakage Based on Acoustic Emission Technology	S Pan, Z Xu, D Li, D Lu	2018	41	Sensors
Review of Water Leak Detection and Localization Methods through Hydrophone Technology	Bakhtawar, Beenish, and Tarek Zayed	2021	15	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
Signal Processing of Infrasound Leakage in Urban Pipelines Based on Spectral Analysis	Y Hao, Q Yao, Y Zhu, Z Xing, J Jiang, N Xu, J Yang	2023		Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
Simplified dispersion relationships for fluid-dominated axisymmetric	Y Gao, F Sui, JM Muggleton, J	2016	60	Journal of Sound and Vibration

wave motion in buried fluid-filled pipes	Yang			
Some Recent Research Results on the use of Acoustic Methods to Detect Water Leaks in Buried Plastic water Pipes	Brennan, M. J., Joseph, P. F., Muggleton, J. M., Gao, Y.	2008	32	Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton
Surface wave surveys for imaging ground property changes due to a leaking water pipe	Ben Dashwood, David Gunn, Giulio Curioni, Cornelia Inauen, Russell Swift, David Chapman, Alexander Royal, Peter Hobbs, Helen Reeves, Julien Taxil	2020	12	Journal of Applied Geophysics
Sustainability Analysis of a Leakage-Monitoring Technique for Water Pipeline Networks	Yazdekhesti, S., Piratla, K. R., Sorber, J., Atamturktur, S., Khan, A., Shukla, H	2020	26	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
The Dynamic Behaviour of a Buried Water Pipe and its Effect on Leak Location Using Acoustic Methods	de Almeida, F., Joseph, P., Brennan, M., Whitfield, S., Dray, S	2013	5	Key Engineering Materials
The effects of resonances on time delay estimation for water leak detection in plastic pipes	Almeida, F. C., Brennan, M. J., Joseph, P. F., Gao, Y., Paschoalini, A. T.	2018	38	Journal of Sound and Vibration
Theoretical and experimental investigation into structural and fluid motions at low frequencies in water distribution pipes	Y Gao, Y Liu	2017	23	Mechanical Systems and Signal Processing
Towards an improvement of GPR-based detection of pipes and leaks in water distribution networks	De Coster, A., Medina, J. P., Nottebaere, M., Alkhalifeh, K., Neyt, X., Vanderdonckt, J., & Lambot, S.	2019	39	Journal of Applied Geophysics
Towards an in-situ measurement of wave velocity in buried plastic water distribution pipes for the purposes of leak location	Almeida, F. C., Brennan, M. J., Joseph, P. F., Dray, S., Whitfield, S., Paschoalini, A. T.	2015	35	Journal of Sound and Vibration
Use of Geoelectrical Techniques to Detect Hydrocarbon Plume in Leaking Pipelines	M Ebrahimi, H Rostami, A Osouli, R Saindon	2022	2	Lifelines
Using a geophone as an actuator to estimate the velocity of leak noise propagation in buried water pipes	Almeida, F. C. L., Brennan, M. J., de Lima, F. K., Iwanaga, M. K., Scussel, O.	2021	4	Applied Acoustics
Vibration monitoring as a tool for leak detection in water distribution networks.	Martini, A., Troncossi, M., Rivola, A.	2013	20	International Conference Surveillance
Vibroacoustic Measurements for Detecting Water Leaks in Buried Small-Diameter Plastic Pipes	A Martini, M Troncossi, A Rivola	2017	55	Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
Wavelets for the Analysis of Transient Pressure Signals for Leak Detection	M Ferrante, B Brunone, S Meniconi	2007	147	Journal of hydraulic engineering
Wavenumber prediction and measurement of axisymmetric waves in buried fluid-filled pipes: Inclusion of shear coupling at a lubricated	JM Muggleton, J Yan	2013	64	Journal of Sound and Vibration

pipe/soil interface				
Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection	JM Muggleton, MJ Brennan, RJ Pinnington	2002	242	Journal of Sound and Vibration
Wavespeed Measurement in Buried Water Distribution Pipes and its Significance in Leak Location	Brennan, M., De Almeida, F., Joseph, P., Dray, S., Whitfield, S.	2013	2	Key Engineering Materials
A review of methods for leakage management in pipe networks	R. Puust. Z. Kapelan, D.A. Savic, T. Koppel	2010	754	Urban Water Journal
A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems	Y Wu, S Liu	2017	154	Urban Water Journal
Paired-IRF Method for Detecting Leaks in Pipe Networks	Zeng, W., Gong, J., Simpson, A. R., Cazzolato, B. S., Zecchin, A. C., Lambert, M. F.	2020	22	Journal of Water Resources Planning and Management

APÊNDICE B

1. Importação tabela (conferir formato no excel)

Mudar o diretório para chamar as tabelas:

- Ir na aba Misc
- Change Working Directory
- Escolher a pasta aonde está os arquivos

Digitar no prompt (para chamar a tabela):

```
Tabela <- read.csv(file="Dados_geo.csv", header=TRUE, sep=";")
```

Digitar no prompt (para verificar se abriu ok):

- Tabela

2. Definição de fatores

```
X <- factor(Tabela$X)
levels(X)
Y <- factor(Tabela$Y)
levels(Y)
```

```
Res = as.numeric (Tabela$Res)
```

3. Criação dos mapas de calor

```
library(lattice)
library(latticeExtra)
```

Rosa - Azul

```
levelplot(Res~X * Y, Tabela, panel = panel.levelplot.points, cex = 1.2) + layer_(panel.2dsmoother(...,
n=200))
```

Cores vivas

```
col.l<-colorRampPalette(c('blue', 'cyan', 'green', 'yellow', 'orange', 'red'))
```

```
levelplot(Res~X * Y, Tabela, col.regions=col.l, panel = panel.levelplot.points, cex = 1.2) +
layer_(panel.2dsmoother(..., n=200))
```

Valores a parte de Mediana ou Media

```
levelplot(Res~X * Y, Tabela, col.regions=col.l, at=c(4265.94, 10000,1), panel = panel.levelplot.points,
,cex = 1.2) + layer_(panel.2dsmoother(..., n=200))
contourplot(Res~X * Y, Tabela)
```