

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo deste documento será
disponibilizado a partir de
27/02/2026.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MATHEUS SILVA PROENÇA

**LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS DE ÁGUA EM DUTOS SUBTERRÂNEOS
UTILIZANDO TÉCNICAS GEOFÍSICAS VIBRO-ACÚSTICAS**

Ilha Solteira
2024



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS SILVA PROENÇA

**LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS DE ÁGUA EM DUTOS SUBTERRÂNEOS
UTILIZANDO TÉCNICAS GEOFÍSICAS VIBRO-ACÚSTICAS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Amarildo Tabone Paschoalini
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P964l Proença, Matheus Silva.
Localização de vazamentos de água em dutos subterrâneos utilizando técnicas geofísicas vibro-acústicas / Matheus Silva Proença. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
188 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2024

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini

Inclui bibliografia

1. Localização de vazamentos de água. 2. Métodos vibro-acústicos. 3. Geofísica.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9081
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Divisão Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto potencial desta pesquisa abrange dimensões ambientais e sanitárias. Visa-se contribuir, diretamente, com um dos desafios globais retratados pela ONU, na ODS 6 – Água potável e saneamento –, ao abordar conceitos e técnicas para redução dos índices atuais de perda de água no país, valorizando, desta forma, a gestão sustentável e a alta eficiência do uso do recurso hídrico. O modelo analítico de localização de vazamentos proposto neste trabalho, baseado em técnicas geofísicas vibro-acústicas, objetiva simplificar o processo de busca e exigir mínima interferência no sistema de distribuição. Diferentemente de diversas técnicas propostas no mercado, a solução não é invasiva nem onerosa, e não exige operadores com alta qualificação e experiência prévia. Ademais, quanto às contribuições científicas, o manuscrito pretende também embasar e direcionar futuros estudos e tomadas de decisão para inovações e aprimoramentos na área de detecção e localização de vazamentos de água em dutos subterrâneos. O trabalho desenvolve e valida uma metodologia para a simulação artificial, mecânica, de vazamentos, proporcionando, assim, maior liberdade e repetibilidade em investigações experimentais na área.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The potential impact of this research encompasses environmental and sanitary dimensions. The aim is to directly contribute to one of the global challenges portrayed by the UN, the Sustainable Development Goal 6 – Clean water and sanitation –, by addressing concepts and techniques to reduce current rates of water loss in the country, thus valuing management sustainability and high efficiency in the use of water resources. The analytical leak location model proposed in this work, based on vibroacoustic geophysical techniques, aims to simplify the search process and require minimal interference in the distribution system. Unlike several techniques suggested in commerce, the solution is neither invasive nor costly and does not require highly qualified operators or prior experience. Furthermore, regarding scientific contributions, the manuscript also intends to support and direct future studies and decision-making toward innovations and improvements in the detection and location of leak water in underground pipelines. The work develops and validates a methodology for the artificial, mechanical simulation of leaks, thus providing greater liberty and repeatability in experimental investigations in the area.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA TESE: LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS DE ÁGUA EM DUTOS SUBTERRÂNEOS
UTILIZANDO TÉCNICAS GEOFÍSICAS VIBRO-ACÚSTICAS**


AUTOR: MATHEUS SILVA PROENÇA

ORIENTADOR: AMARILDO TABONE PASCHOALINI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica,
área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. DOUGLAS DOMINGUES BUENO (Participação Presencial) 
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI (Participação Presencial) 
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ADRIANO TODOROVIC FABRO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de Brasília - UnB

Profa. Dra. MARIA MERCEDES GAMBOA MEDINA (Participação Virtual)
Departamento de Hidráulica e Saneamento / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 27 de agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo Seu amor e Seus cuidados tão presentes. Em tudo, fui conduzido, provido e capacitado. As necessidades que surgiram pelo caminho foram supridas segundo as Suas gloriosas riquezas em Cristo Jesus.

Ao meu pai (*in memoriam*), à minha mãe e à minha irmã que sonharam este projeto para mim antes mesmo que eu sonhasse. Eles me amaram sem reservas, me instruíram e me incentivaram TODOS os dias. Amo muito vocês.

À minha namorada, por toda compreensão, apoio e amor.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini, por ter acreditado na minha capacidade e investido na minha evolução nestes mais de sete anos de parceria e orientação, por sempre estar disponível e com o coração pronto para ajudar.

Aos meus colegas e ex-colegas do laboratório de simulações numéricas – Daniel H. S. Obata; Otávio D. Z. Boaventura; e Vinicius A. Salmazo, que, em diferentes momentos, nesta jornada, se disponibilizaram na montagem dos experimentos, compartilharam ideias e propuseram soluções às eventualidades que ali surgiram.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço a ela por todo o apoio financeiro. Agradeço, também, à Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira (FEPISA) pelos recursos disponibilizados para a construção do campo de provas e para as participações em congressos e eventos técnicos.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta estação.

Muito obrigado!

“Aquietai-vos, e sabei que eu sou Deus.” – Salmos 46:10.

RESUMO

A universalização e a gestão sustentável dos recursos hídricos, no setor de saneamento, são um tema crescente e de discussão global, visto que afetam o desenvolvimento humano, social, ambiental e econômico do país. Atualmente, os problemas de performance enfrentados pelas companhias de abastecimento se devem, principalmente, a vazamentos reais de água ao longo das redes de distribuição subterrâneas, portanto, se intensifica as ações ligadas ao controle e a redução dos índices de perdas nos sistemas. Nesta conjuntura, a presente pesquisa almeja contribuir com as técnicas de detecção/localização vibro-acústica de vazamentos, abordando, de forma robusta, os mecanismos de emissão vibro-acústica de um vazamento, as características temporais e espectrais de seu sinal, os meios e formas de propagação, assim como, os mecanismos de amortecimento dos meios. Ademais, o trabalho desenvolve procedimentos para a simulação mecânica de vazamentos, proporcionando maior liberdade e permitindo a repetibilidade de investigações experimentais na área. Por fim, esta obra propõe um modelo analítico de localização, baseado em técnicas geofísicas vibro-acústicas, que diferentemente de diversas técnicas proposta no mercado, não é invasiva e onerosa, e não exige operadores com alta qualificação e experiência. A técnica proposta se detém à análise de pares de uma malha de sensores, na superfície do solo, e, através de ferramentas estatísticas, prediz, de forma automatizada, o epicentro do vazamento. Nos ensaios realizados, em laboratório, o máximo erro absoluto obtido nas predições foi de 160 mm.

Palavras-chave: localização de vazamentos de água; métodos vibro-acústicos; geofísica.

ABSTRACT

The universalization and sustainable management of water resources in the sanitation sector are a growing topic of global discussion, as they affect the human, social, environmental, and economic development of one region. Currently, the performance problems faced by supply companies are mainly due to real water leaks along underground distribution networks, therefore, actions linked to controlling and reducing loss rates in the systems are intensifying. At this juncture, the present research aims to contribute to vibroacoustic leak detection/location techniques, addressing, in a robust way, the vibroacoustic emission mechanisms of a leak, the temporal and spectral characteristics of its signal, the means and forms of propagation, as well as the media damping mechanisms. Furthermore, the work develops procedures for the mechanical simulation of leaks, providing greater freedom and allowing the repeatability of experimental investigations in the area. Finally, this work proposes an analytical location model, based on vibroacoustic geophysical techniques, which, unlike several techniques proposed on the market, is not invasive and costly, and does not require operators with high qualifications and experience. The proposed technique focuses on the analysis of pairs of a mesh of sensors, on the surface of the soil, and, through statistical tools, predicts, in an automated way, the epicenter of the leak. In tests carried out in the laboratory, the maximum absolute error obtained in the predictions was 16 cm.

Keywords: water leaks location; vibroacoustic methods; geophysics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Ilustração dos meios de propagação e sensoriamento do sinal vibro-acústico de um vazamento subterrâneo.....	25
Figura 2	- Classificação dos vazamentos segundo a IWA.....	28
Figura 3	- Classes de vazamentos segundo a IWA.....	29
Figura 4	- Cruz de Lambert para o combate às perdas reais.....	30
Figura 5	- Perturbações geradas pelo vazamento. a) Campo de velocidades na região do vazamento (vista lateral). b) Energia cinética turbulenta.....	32
Figura 6	- Tensões normais geradas pela pressão do vazamento na parede do tubo...	33
Figura 7	- Abertura do vazamento pela distribuição do campo de tensões.....	33
Figura 8	- Distribuição de tensões normais na parede do tubo perto do vazamento...	36
Figura 9	- Ilustração das zonas de leito fluidizado e leito móvel.....	38
Figura 10	- Parâmetros influentes no sistema.....	39
Figura 11	- Composição do sinal do vazamento.....	40
Figura 12	- Representação esquemática da construção de um sinal ciclo-estacionário de 2° ordem.....	41
Figura 13	- Auto-correlação dos sinais medidos na parede do tubo atrás de um vazamento.....	41
Figura 14	- Modo circunferencial (n=0) associado ao modo axial a) (m=0). b) (m=2)	43
Figura 15	- Propagação de ondas no sistema tubo-solo. a) $c_{\text{tubo}} > c_{\text{solo}}$. b) $c_{\text{solo}} > c_{\text{tubo}}$...	45
Figura 16	- Propagação da onda transmitida e refratada.....	46
Figura 17	- Propagação da onda transmitida e refratada. a) 1:1. b) 1:1,5. c) 1:2.....	47
Figura 18	- Ilustração tridimensional do evento.....	47
Figura 19	- Ondas de corpo. a) Onda de compressão. b) Onda de cisalhamento SH. c) Onda de cisalhamento SV.....	50
Figura 20	- Influência da umidade sobre o estado dos solos argilosos.....	51
Figura 21	- Tipos de Ondas Sísmicas superficiais. a) Onda Rayleigh. b) Onda Love..	52
Figura 22	- Segregação dos trens de ondas sísmicas geradas por um terremoto.....	53
Figura 23	- Coeficientes de incidência normal, de reflexão e de transmissão, em uma interface entre materiais com diferentes impedâncias.....	54
Figura 24	- Relação entre α e a amplitude de deslocamento das ondas refletida e transmitida.....	55

Figura 25	- Relação entre α e a amplitude de tensões refletida e transmitida.....	56
Figura 26	- Lei de Snell aplicada a dois materiais com diferentes impedâncias a) $V_1 > V_2$. b) $V_2 > V_1$. c) $\theta_I = \theta_{cr}$	57
Figura 27	- Modos de conversão de ondas elásticas.....	58
Figura 28	- A refração de ondas e o Princípio de Huygens.....	59
Figura 29	- Mecanismos de amortecimento sísmico.....	60
Figura 30	- Caracterização do Modelo reológico de Kelvin-Voigt.....	62
Figura 31	- Representação esquemática do modelo reológico empregado.....	63
Figura 32	- Representação esquemática do modelo e de suas condições de contorno..	69
Figura 33	- a) Estudo de convergência de malha. b) Malha 66x44.....	70
Figura 34	- a) Atenuação do sinal para cada grau de compactação. b) Relação alométrica entre atenuação e a frequência de excitação ($N_{SPT} = 2$).....	72
Figura 35	- Atenuação do sinal do vazamento: Leis de Potência resultantes dos procedimentos de ajuste.....	73
Figura 36	- a) Superfície polinomial representativa para a atenuação do sinal. b) Erro associado às predições.....	75
Figura 37	- a) Aparatos experimentais. b) Ilustração da caixa de areia e sua instrumentação.....	76
Figura 38	- a) Caixa com areia. b) Atuador eletromecânico instrumentado.....	77
Figura 39	- a) Transformada de Fourier da entrada e saída (experimental). b) Comparação da FRF experimental e numérica.....	77
Figura 40	- a) Comparação do sinal do vazamento original e do sinal reconstruído, no domínio da frequência. b) Sinal do vazamento no domínio do tempo – $x(t)$	78
Figura 41	- Representação esquemática dos aparatos experimentais.....	80
Figura 42	- Sistema de referência: Arranjo tubo-água suspenso com vazamento real.	81
Figura 43	- Influência da variação de pressão nas características espectrais do vazamento.....	82
Figura 44	- Influência da variação da área do vazamento nas características espectrais do vazamento.....	83
Figura 45	- Valor da aceleração eficaz (A_{RMS}) em cada sensor. a) $\emptyset = 1,0$ mm. b) $\emptyset = 3,2$ mm.....	85
Figura 46	- Relação entre a aceleração eficaz (A_{RMS}) e a pressão.....	86

Figura 47	- Comparação da relação entre a aceleração eficaz (A_{RMS}) com a pressão e a área do vazamento ($\varnothing = 1,0$ mm).....	87
Figura 48	- Primeiro acoplamento utilizado nas simulações.....	88
Figura 49	- Aparatos experimentais utilizados na etapa de simulação do vazamento..	89
Figura 50	- Sinal de entrada inicial. a) no tempo. b) na frequência.....	89
Figura 51	- Verificação da compensação do sistema.....	90
Figura 52	- Densidade espectral do sinal do vazamento simulado ($\varnothing = 1$ mm; $P = 10$ psi).....	91
Figura 53	- Comparação dos sinais no sensor 6 de referência (caso 1).....	92
Figura 54	- Comparação de parâmetros do <i>shaker</i>	92
Figura 55	- Comparação da PSD dos sinais nos demais sensores (caso 1). a) 10 cm. b) 40 cm. c) 80 cm. d) 120 cm. e) 150 cm.....	93
Figura 56	- Comparação da fase dos sinais nos demais sensores (caso 1). a) 10 cm. b) 40 cm. c) 80 cm. d) 120 cm. e) 150 cm.....	94
Figura 57	- Densidade espectral do sinal do vazamento simulado ($\varnothing = 1$ mm; $P = 40$ psi).....	96
Figura 58	- Comparação dos sinais no sensor 6 de referência (caso 2).....	97
Figura 59	- Comparação da PSD dos sinais nos demais sensores (caso 2). a) 10 cm. b) 40 cm. c) 80 cm. d) 120 cm. e) 150 cm.....	97
Figura 60	- Comparação da fase dos sinais nos demais sensores (caso 2). a) 10 cm. b) 40 cm. c) 80 cm. d) 120 cm. e) 150 cm.....	99
Figura 61	- Segundo acoplamento utilizado nas simulações.....	100
Figura 62	- Não-linearidades acentuadas do sistema. a) 250 Hz. b) 550 Hz. c) 850 Hz.....	101
Figura 63	- Tentativas de compensação do sistema.....	102
Figura 64	- Comparação da PSD dos sinais nos demais sensores (caso 3). a) 0 cm. b) 10 cm. c) 40 cm. d) 80 cm. e) 120 cm. f) 150 cm.....	103
Figura 65	- Comparação da fase dos sinais nos demais sensores (caso 3). a) 10 cm. b) 40 cm. c) 80 cm. d) 120 cm. e) 150 cm.....	105
Figura 66	- Comparação da PSD nos sensores mudando o sensor de referência. a) 0 cm. b) 10 cm. c) 40 cm. d) 80 cm. e) 120 cm. f) 150 cm.....	106
Figura 67	- Comparação da fase nos sensores mudando o sensor de referência. a) 10 cm. b) 40 cm. c) 80 cm. d) 120 cm. e) 150 cm.....	107

Figura 68	- Comparação da PSD nos sensores mudando o acoplamento. a) 0 cm. b) 10 cm. c) 40 cm. d) 80 cm. e) 120 cm. f) 150 cm.....	109
Figura 69	- Comparação da fase nos sensores mudando o acoplamento. a) 10 cm. b) 40 cm. c) 80 cm. d) 120 cm. e) 150 cm.....	110
Figura 70	- Ilustração do campo de provas utilizado na validação dos acoplamentos..	112
Figura 71	- Ilustração da vala experimental para instalação da tubulação.....	113
Figura 72	- Cápsulas de excitação do sistema. a) Vazamento real. b) Atuador mecânico.....	114
Figura 73	- 1ª Cápsula de excitação do sistema (vazamento real). a) Furo ($\varnothing = 3$ mm) feito diretamente na tubulação. b) Cápsula aberta mostrando a válvula solenoide e o acelerômetro de monitoramento. c) Cápsula fechada já instalada no tubo. d) Ilustração da cápsula instalada com seus componentes internos.....	115
Figura 74	- 2ª Cápsula de excitação do sistema (transdutor mecânico). a) Haste roscada diretamente no tubo. b) Cápsula aberta mostrando o atuador mecânico e o acelerômetro de monitoramento. c) Cápsula fechada já instalada no tubo. d) Ilustração da cápsula instalada com seus componentes internos.....	116
Figura 75	- Vedação final das cápsulas.....	117
Figura 76	- Sensor de umidade capacitivo e amostras de solos.....	117
Figura 77	- Curva de calibração dos sensores de umidade.....	118
Figura 78	- Medidas finais do campo de prova.....	118
Figura 79	- Curvas granulométricas dos solos do campo de provas.....	119
Figura 80	- Sistema de aquisição de dados (DAQ) utilizado na segunda etapa de simulação do vazamento.....	120
Figura 81	- Execução de testes preliminares no campo experimental.....	121
Figura 82	- Disposição dos sensores na superfície do maciço. a) Pré-válvula. b) Pós-válvula.....	121
Figura 83	- Procedimento de fixação dos acelerômetros na superfície do solo.....	122
Figura 84	- Dispositivo regulador de pressão e sensor de fluxo.....	122
Figura 85	- Influência da variação de pressão nas características espectrais do vazamento enterrado (sensor logo acima da válvula).....	124

Figura 86	- Comparação dos mapas espectrais dos sinais em diferentes sensores (0 m; 0,5 m) para diferentes pressões. a) P = 12,3 psi. b) P = 21,7 psi. c) P = 33,3 psi.....	125
Figura 87	- Sinal do ruído de fundo coletado em bandas de oitava.....	126
Figura 88	- Comparação entre PSD do ruído de fundo e dos sinais do vazamento ao longo da linha do tubo (P = 28,7 psi).....	126
Figura 89	- Comparação entre PSD do ruído de fundo e dos sinais do vazamento ao longo da linha do tubo (P = 11,3 psi).....	127
Figura 90	- Aceleração eficaz (A_{RMS}) em diferentes sensores antes e após o vazamento.....	128
Figura 91	- Comparação dos mapas espectrais dos sinais em diferentes sensores antes e após o vazamento (P = 21,7 psi).....	128
Figura 92	- Densidade espectral do sinal do vazamento simulado compensado (P = 11,3 psi).....	130
Figura 93	- Densidade espectral do sinal do vazamento simulado compensado (P = 21,7 psi).....	130
Figura 94	- Densidade espectral do sinal do vazamento simulado compensado (P = 37,5 psi).....	131
Figura 95	- Comparação da PSD dos sinais nos demais sensores (P = 11,3 psi). a) 0 m. b) 0,1 m. c) 0,3 m. d) 0,5 m. e) 0,7 m. f) 0,9 m. g) 1,1 m.....	131
Figura 96	- Comparação da fase dos sinais nos demais sensores (P = 11,3 psi). a) 0,1 m. b) 0,3 m. c) 0,5 m. d) 0,7 m. e) 0,9 m. f) 1,1 m.....	133
Figura 97	- Comparação da PSD dos sinais nos demais sensores (P = 21,7 psi). a) 0 m. b) 0,1 m. c) 0,3 m. d) 0,5 m. e) 0,7 m. f) 0,9 m. g) 1,1 m.....	134
Figura 98	- Comparação da fase dos sinais nos demais sensores (P = 21,7 psi). a) 0,1 m. b) 0,3 m. c) 0,5 m. d) 0,7 m. e) 0,9 m. f) 1,1 m.....	135
Figura 99	- Comparação da PSD dos sinais nos demais sensores (P = 37,5 psi). a) 0 m. b) 0,1 m. c) 0,3 m. d) 0,5 m. e) 0,7 m. f) 0,9 m. g) 1,1 m.....	137
Figura 100	- Comparação da fase dos sinais nos demais sensores (P = 37,5 psi). a) 0,1 m. b) 0,3 m. c) 0,5 m. d) 0,7 m. e) 0,9 m. f) 1,1 m.....	138
Figura 101	- Comparação da PSD dos sinais nos demais sensores (P = 12,8 psi). a) 0 m. b) 0,1 m. c) 0,3 m. d) 0,5 m. e) 0,7 m. f) 0,9 m. g) 1,1 m.....	140

Figura 102	- Comparação da fase dos sinais nos demais sensores ($P = 12,8$ psi). a) 0,1 m. b) 0,3 m. c) 0,5 m. d) 0,7 m. e) 0,9 m. f) 1,1 m.....	141
Figura 103	- Representação dos caminhos sísmicos considerados no modelo.....	147
Figura 104	- Coerência entre um sinal de excitação superficial e os sinais medidos por acelerômetros circundantes.....	149
Figura 105	- Curva de dispersão da velocidade da onda Rayleigh.....	151
Figura 106	- a) Teste experimental para determinação da PDF empírica de V_R . b) Bancada experimental.....	152
Figura 107	- a) Amostras experimentais de V_R e seus parâmetros estatísticos. b) FDP empírica calculada.....	153
Figura 108	- a) Distribuição de probabilidade exponencial truncada para o coeficiente de Poisson (ν). b) Distribuição de probabilidade uniforme para a profundidade do tubo (h).....	155
Figura 109	- Representação da bancada experimental de testes.....	156
Figura 110	- Arranjo da malha de sensores. a) Arranjo 1. b) Arranjo 2. c) Arranjo 3.....	157
Figura 111	- Resumo gráfico da metodologia.....	158
Figura 112	- Teste de convergência da Simulação de Monte Carlo.....	159
Figura 113	- Resultados estatísticos assumindo isoladamente a) Caminho 1. b) Caminho 2.....	159
Figura 114	- Resultados estatísticos para os arranjos de sensores. a) A1. b) A2. c) A3..	160
Figura 115	- Diagrama de caixas da distribuição de Monte Carlo para o Arranjo 1 com diferentes intensidades do sinal de excitação.....	162
Figura 116	- Esboço inicial de um protótipo.....	163
Figura 117	- Representação da geometria do modelo.....	178
Figura 118	- Esquema de acoplamento dos blocos de simulação.....	179
Figura 119	- Modelo de malhas gerado.....	180
Figura 120	- Posicionamento e demarcação da área da vala.....	182
Figura 121	- Etapa de abertura da vala.....	182
Figura 122	- Preparação de materiais para a execução do campo de prova.....	183
Figura 123	- Preparação do dreno no interior da vala.....	183
Figura 124	- Estruturação do berço de areia no interior da vala.....	184
Figura 125	- Posicionamento do sistema no interior da vala.....	184
Figura 126	- Construção dos poços de acesso.....	185

Figura 127 - Compactação da areia e ajustes finais do sistema.....	185
Figura 128 - Etapa de reaterro e compactação.....	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Estados de compacidade e de consistência.....	67
Tabela 2	- Casos selecionados para implementação.....	72
Tabela 3	- Parâmetros de atenuação β e α encontrados para cada grau de compactação.....	73
Tabela 4	- Caracterização dos solos do campo de provas.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AESABESP	Associação dos Engenheiros da Sabesp
AESBE	Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CCF	<i>Cross Correlation Function</i>
CCLD	<i>Constant Current Line Drive</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i>
CPSD	<i>Cross Power Spectral Density</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
FFT	Fast Fourier Transform
FRF	Função de Resposta em Frequência
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GC	Grau de Compactação do solo
GMRES	<i>Generalized Minimal Residual Method</i>
IEPE	<i>Integrated Electronics Piezo-Electric</i>
IVI	Índice de Vazamentos da Infraestrutura
IWA	<i>International Water Association</i>
LC	Limite de Contração
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MC	Método de Monte Carlo
MDPE	Polietileno de Média Densidade
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PDF	<i>Probability Density Function</i>

pH	Potencial Hidrogeniônico
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
PVC	Policloreto de Vinila
<i>rms</i>	<i>root mean square</i>
RNC	Rede Neural Convolutacional
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
VIE	Vibrações Induzidas pelo Escoamento
VIV	Vibrações Induzidas por Vórtices

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Razão de impedâncias acústicas
att	Lei de potência da atenuação
c	Velocidade de propagação da onda [m/s]
C_d	Coefficiente de descarga []
C_V	Razão entre velocidades das ondas
b_z	Força de excitação da base por unidade de área [N/m ²]
δ	Deslocamento [m]
E	Módulo de elasticidade [Pa]
f	Termo fonte
g	Ação gravitacional [m/s ²]
G	Módulo de Cisalhamento [Pa]
h	Profundidade do tubo enterrado
H	Função de Transferência do sistema
K	Módulo de expansão volumétrico [Pa]
N_{SPT}	Índice de Resistência à Penetração
η	Índice de viscosidade [Pa.s]
η^*	Tempo de retardamento [s]
P	Pressão ao longo da linha de corrente [Pa]
P_{in}	Pressão interna no duto
ΔP	Gradiente de pressão
ρ	Massa específica [kg/m ³]
S_{XX}	Densidade espectral de potência da entrada
S_{YY}	Densidade espectral de potência da saída
S_{XY}	Densidade espectral de potência cruzada
t	Tempo [s]
u	Volume de água gasto em situações operacionais/emergenciais/sociais
v	Deslocamento relativo na direção Y [m]
ν	Coefficiente de Poisson
V	Velocidade do fluido na seção considerada [m/s]
V_m	Volume de água micromedido

V_{pr}	Volume de água produzido
V_P	Velocidade de propagação da onda de corpo compressional
V_R	Velocidade de propagação da onda superficial Rayleigh
V_S	<i>Velocidade de propagação da onda cisalhante</i>
w	Deslocamento relativo na direção Z [m]
W	Umidade [%]
ω	Frequência de excitação [Hz]
Y	Coefficiente de Poisson
λ	Comprimento de onda
z	Altura em relação a um referencial [m]
\emptyset	Diâmetro do furo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	OBJETIVOS.....	26
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
3.1	INTRODUÇÃO.....	27
3.2	DEFINIÇÕES DE PERDAS REAIS.....	27
3.3	MECANISMOS DE EMISSÃO VIBRO-ACÚSTICA DE UM VAZAMENTO.....	30
3.4	CARACTERÍSTICAS DO SINAL DO VAZAMENTO.....	39
3.5	PROPAGAÇÃO DO SINAL DO VAZAMENTO.....	42
3.5.1	Ondas Sísmicas.....	48
3.5.1.1	Ondas de Corpo.....	49
3.5.1.2	Ondas Superficiais.....	52
3.5.2	Refletividade e transmissividade.....	53
3.6	MECANISMOS DE AMORTECIMENTO DOS SOLOS.....	60
4	INFLUÊNCIA DO GRAU DE COMPACTAÇÃO NA ATENUAÇÃO INTRÍNSECA VISCOSA.....	66
4.1	INTRODUÇÃO.....	66
4.2	LEVANTAMENTO DAS LEIS DE POTÊNCIA DA ATENUAÇÃO E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	66
5	PROCEDIMENTOS PARA REPRODUÇÃO DO VAZAMENTO.....	80
5.1	INTRODUÇÃO.....	80
5.2	DADOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA.....	80
5.3	TESTE DE ACOPLAMENTOS COM O TUBO SUSPENSO.....	87
5.4	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA COM O TUBO ENTERRADO.....	112
6	MÉTODOS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTO.	144
6.1	INTRODUÇÃO.....	144
6.2	TÉCNICAS ATUAIS PARA A LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS.....	144
6.3	TÉCNICA GEOFÍSICA VIBRO-ACÚSTICA.....	146
6.3.1	Metodologia.....	146
6.3.1.1	Modelo analítico.....	146
6.3.1.2	Caracterização das incertezas dos parâmetros.....	150

6.3.1.3	Procedimentos experimentais.....	155
6.3.2	Resultados e Discussões.....	158
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	164
	REFERÊNCIAS.....	167
	APÊNDICE A – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM SISTEMA TUBO-ÁGUA.....	178
	APÊNDICE B – EVIDÊNCIAS FOTOGRÁFICAS DA MONTAGEM E INSTALAÇÃO DO CAMPO DE PROVAS.....	182
	PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	188

1 INTRODUÇÃO

Intensifica, nos últimos anos, uma preocupação mundial não só com a universalização dos recursos hídricos, mas também com o seu controle e gerenciamento sustentável. O apelo feito pela Organização das Nações Unidas (ONU), por meio das metas de desenvolvimento do milênio (ODS), espelha tamanha apreensão. É fato que a água é um elemento primordial não só para o desenvolvimento humano, mas, também, para o avanço social, ambiental e econômico, de qualquer país.

Lamentavelmente, no Brasil, os índices de perdas ainda são alarmantes. De acordo com o último levantamento realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o país perde, em média, mais de um terço (37,8%) de sua água tratada (Brasil, 2022). O Instituto Trata-Brasil (2023), baseado nos dados do SNIS-2021, estima que, dentre todo este volume de água não faturado, subtraindo o volume de serviços, as perdas reais – vazamentos no sistema – representam cerca de 60%, isto é, mais 3,8 bilhões de m³, por ano.

A performance técnica no gerenciamento de perdas de uma rede de distribuição de água pode ser classificada utilizando-se o Índice de Vazamentos da Infraestrutura (IVI), que, basicamente, compara as perdas reais anuais correntes com as perdas anuais inevitáveis – um indicador de referência. Empregando, então, este índice, o Banco Mundial desenvolveu um sistema de classificação com 5 categorias de desempenho: A1, A2, B, C e D. Enquanto a categoria A1 (IVI < 2) representa um cenário com possibilidade, apenas, de reduções marginais e que exigem um estudo criterioso de viabilidade econômica, no outro extremo, a categoria D (IVI > 16) representa um uso muito ineficiente dos recursos (ANA, 2021).

No Brasil, verifica-se que não há, atualmente, nenhum município enquadrado na categoria A1, e 48,7 % dos municípios estão nas categorias B, C ou D de performance, ou seja, com margem para melhorias muito significativas (ANA, 2021).

Nesta conjuntura, o novo marco legal do saneamento básico, sancionado, em 2020, pelo Governo Federal (Lei nº 14.026), atribuiu à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a responsabilidade de estabelecer normas de referência para padrões de qualidade e eficiência na prestação, manutenção e operação dos serviços oferecidos pelas companhias de abastecimento. A partir de então, as empresas deverão, nos próprios contratos de prestação de serviço público, definir, previamente, metas para o controle e a redução contínua das perdas de água existentes (Brasil, 2020a).

No geral, as perdas desencadeiam uma maior exploração do recurso natural e uma majoração dos custos da prestação dos serviços. Além disso, os vazamentos geram danos

secundários à infraestrutura do local. A erosão causada, por um vazamento, nos leitos de uma tubulação avariada, por exemplo, proporciona concentração de tensões e momentos fletores malquistos no duto, podendo, assim, desencadear um maior sinistro na rede e até nas fundações das estradas e edifícios (Hunaidi *et al.*, 2000). Ademais, os vazamentos também podem representar um risco para a saúde pública, pois são potenciais pontos de entrada para agentes contaminantes.

Diferentemente do combate às perdas aparentes, que envolvem ações de menor complexidade e geram resultados a curto prazo – por envolverem, preponderantemente, aspectos gerenciais e um sistema robusto de medição –, a redução das perdas reais exige investimentos de médio e longo prazo, pois comprometem todo suporte técnico de engenharia de projeto, construção, operação e manutenção (ANA, 2021; AESBE, 2015). Contudo, em um cenário realista, o benefício líquido produzido pela redução de perdas é da ordem de R\$ 27,4 bilhões em 13 anos (Trata Brasil, 2023).

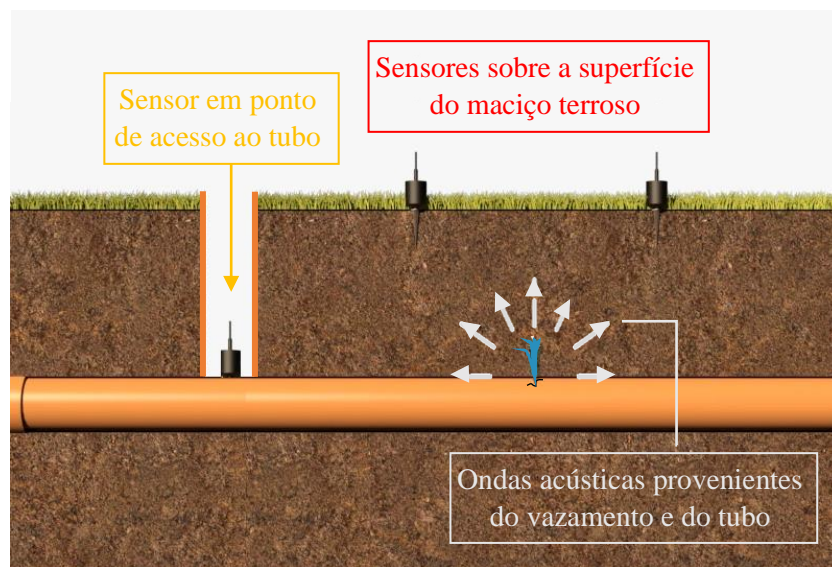
Para contribuir, com maior eficiência e agilidade, no controle ativo de vazamentos, diversas técnicas de detecção e localização vêm sendo continuamente desenvolvidas e aprimoradas no mercado, e é com este campo de conhecimento que o presente trabalho visa colaborar.

A localização precisa de um vazamento subterrâneo, geralmente, é uma atividade hermética por envolver parâmetros de projeto; diretrizes normativas; forte influência do solo circundante, com suas características morfológicas e de estado; e ambientes metropolitanos ruidosos. Portanto, esta pesquisa irá reunir e discutir importantes tópicos relacionados ao assunto, agregando novas informações às discussões.

O processo de detecção/localização de vazamentos de água pode ser realizado por meio de técnicas acústicas ou não-acústicas. Este trabalho irá focar em tecnologias acústicas, que, em suma, coletam e processam o próprio sinal vibro-acústico gerado, pelo vazamento, no subsolo, que se propaga até a superfície do maciço terroso ou em pontos de acesso à tubulação enterrada, como ilustra a Figura 1. O manuscrito trará uma breve revisão dos principais métodos atualmente empregados em campo e, em seguida, irá propor um modelo de localização vibro-acústico, através de uma abordagem geofísica do problema – uma perspectiva muito pouco investigada até o momento.

A validação do modelo proposto partirá de uma metodologia desenvolvida, pelo autor, para simular mecanicamente a excitação de um vazamento de água, permitindo, assim, repetibilidade em ensaios iniciais e um maior controle de alguns parâmetros do sistema.

Figura 1 – Ilustração dos meios de propagação e sensoriamento do sinal vibro-acústico de um vazamento subterrâneo.



Fonte: Modificado de Proença e Paschoalini (2022).

No capítulo 3 desta obra, será retratado o estado da arte e importantes conceitos sobre o tema em questão. Trabalhos desenvolvidos pelo próprio autor e seu grupo de pesquisa também enriqueceram este capítulo.

Na seção seguinte, será investigado alguns procedimentos para a simulação fidedigna da excitação gerada por um vazamento real, visando estabelecer uma metodologia para tal. No Capítulo 5, com tratativas numérica e experimental, foi investigado o potencial de uma determinada técnica geofísica vibro-acústica para a localização de vazamentos de água em dutos subterrâneos.

Por fim, o capítulo de conclusão sintetiza os resultados obtidos, realça a significância e as contribuições da pesquisa para o presente estado da arte e discute as limitações do projeto e as recomendações e desejos futuros.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como estudado, o processo de detecção e localização de vazamentos de água em tubulações subterrâneas pode ser influenciado por diversas variáveis, a depender da metodologia e da instrumentação escolhida. Dentre as diversas técnicas existentes no mercado, atualmente, os métodos vibro-acústicos se destacam por apresentarem maior eficiência e aplicabilidade, portanto, foram o objeto especial desta pesquisa.

Na essência, a precisão dos métodos vibro-acústicos pode ser comprometida pelo material e a profundidade da tubulação, por parâmetros operacionais da rede, pelas características morfológicas e de estado do solo circundante e pelo ruído externo do ambiente. Logo, foi importante discutir e fundamentar os principais mecanismos de emissão acústica de um vazamento e como estes são modificados pela configuração do sistema.

Como visto, a excitação gerada por um vazamento resulta de mecanismos hidrodinâmicos e de seus efeitos na interação fluido-estrutura. O fluxo turbulento que gera caóticas vibrações transversais e longitudinais da tubulação é um dos protagonistas na geração do sinal, seguido pelo impacto do jato d'água pressurizado no solo circundante e a possível formação de uma zona fluidizada, a cavitação, e o crescimento de trincas.

A partir do conhecimento destas fontes de emissão foi possível descrever as características gerais do sinal de um vazamento. Tal conhecimento é de extrema importância não só para a coleta e o processamento adequado dos sinais, em campo, mas, também, para se ter simulações numéricas fidedignas do problema. Como apresentado no trabalho, o ruído gerado pela combinação das fontes se assemelha a um sinal ciclo-estacionário de segunda ordem, por combinar o sinal contínuo aleatório proveniente do escoamento turbulento com sinais periódicos e pseudo-periódicos, provenientes do desprendimento de vórtices e da cavitação.

A excitação subterrânea gerada irá então se propagar, ao longo da casca da tubulação, pelo fluido interno e através de ondas sísmicas, no solo. Este trabalho se deteve a propagação do sinal nos geomateriais. Observou-se que a irradiação das excitações do tubo para o solo depende da razão de impedâncias acústicas dos dois meios. Quando a velocidade das ondas no tubo é superior à velocidade das ondas no geomaterial, as ondas, preponderantemente, são transmitidas para o meio. Este caso é o mais frequente.

Em sequência, as ondas sísmicas geradas irão se propagar até a superfície do maciço. No entanto, como abordado, ao longo do caminho, estas poderão, devido as propriedades físicas

do solo e o estado em que ele se encontra – índices de vazios e de umidade – gerar múltiplas reflexões, refrações, difrações e espalhamentos que ajudarão a dissipar a energia do sinal.

Quanto aos mecanismos de amortecimento discutidos, a atenuação intrínseca de natureza viscosa é um dos principais mecanismos para camadas rasas e não consolidadas, como ocorre no cenário estudado. Observou-se, também, uma grande influência dos graus de compactação dos solos no processo de atenuação. Verificou-se que os espectros de ruído de vazamento decaem com uma Lei de Potência próxima a $1/\omega^2$ no solo arenoso com nível de compactação controlado, e igual a $1/\omega$ no solo arenoso com alto nível de compactação.

Após fundamentar todos os princípios necessários, o presente estudo propôs e validou os procedimentos para a simulação mecânica de um vazamento de água, a fim de contribuir com estudos futuros, permitindo que, nestes, haja repetibilidade e controle de alguns parâmetros do sistema. Em suma, os acoplamentos testados no trabalho apresentaram bons resultados para a simulação – tanto no que se refere a distribuição de energia, quanto à inclinação da fase.

Finalmente, a tese desenvolveu e validou um modelo analítico de localização baseado em técnicas geofísicas vibro-acústicas, utilizando uma malha de sensores na superfície do maciço. O método proposto considera dois tipos de caminhos sísmicos para a propagação do sinal do vazamento – um caminho direto percorrido por ondas de corpo compressionais e um caminho percorrido por ondas superficiais de Rayleigh, a partir do epicentro do vazamento –. Em suma, para se obter a localização probabilística do vazamento de água, são utilizadas relações trigonométricas, processamento de sinais e inferência estatística.

O modelo de predição foi tratado considerando graus de incertezas associado a velocidade da onda Rayleigh (V_R), a razão de velocidades das ondas (C_V) – que é função do coeficiente de Poisson (ν) – e a profundidade do tubo (h). A FDP da velocidade da onda superficial foi obtida de forma empírica e a FDP do coeficiente de Poisson e da profundidade do tubo foram deduzidas pelo Princípio da Entropia Máxima. Então, a propagação de incertezas desses parâmetros geofísicos foi abordada utilizando a simulação clássica de Monte Carlo.

Inicialmente, utilizou-se um ambiente experimental controlado para verificar a validade e a precisão do modelo. A metodologia de simulação do vazamento foi aplicada. A performance do modelo de localização foi analisada com eventos sísmicos isolados, e com um evento combinado. Para todos os casos trabalhados, os resultados estatísticos forneceram uma boa previsão da localização do vazamento. Levando em consideração o valor mais provável da FDP, o erro absoluto máximo obtido foi de 16 cm para o primeiro evento sísmico e de 9 cm para o segundo, enquanto que a combinação dos eventos gerou uma melhora de 66,7 % nos resultados.

Além disso, os resultados atestaram a validade do cálculo das curvas de tempo de percurso da onda de corpo P em função de informações da onda superficial Rayleigh, evitando assim a necessidade de se realizar tomografia sísmica intrusiva no maciço, o que geraria mais custos no projeto, uma mão de obra especializada, e maior tempo de serviço.

O modelo analítico desenvolvido apresenta certas vantagens em relação à diversos outros métodos existentes no mercado, pois não consiste em uma técnica intrusiva, não requer operadores altamente experientes e qualificados, e utiliza uma instrumentação leve, portátil e, relativamente, barata.

Em trabalhos futuros, pretende-se, também, investigar e discutir a qualidade das predições do modelo apresentado na localização de um vazamento real, em campo, e em condições diversas de umidade, e também em diferentes solos e cenários. Deseja-se desenvolver, ao final, o protótipo visionado.

Paralelamente, o autor tem interesse em estudar as características da excitação de um jato d'água no subsolo e a zona fluidizada – evento ainda muito pouco estudado na literatura e que é relevante em problemas do presente cenário.

O campo de provas construído, nestes últimos 2 meses, tem um imenso potencial para prover novas pesquisas e investigações na área, assim como, para contribuir, em parceria, com grupos científicos de outras universidades, que abordam um tema semelhante. Uma linha de pesquisa utilizando Inteligência Artificial (IA) já está sendo desenvolvida no local. O autor também pretende, futuramente, testar, no campo de provas, outros dois modelos de localização idealizados.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, **ANSYS FLUENT Theory Guide**: Release 12.0. Canonsburg: Ansys, Inc., 2009. 816 p.
- ANSYS, **ANSYS Workbench**: Release 14.5. Canonsburg: Ansys, Inc., 2012. (Conjunto de Programas).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5626**: Sistemas prediais de água fria e água quente - Projeto, execução, operação e manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 56 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**: Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 28 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17015**: Execução de obras lineares para transporte de água bruta e tratada, esgoto sanitário e drenagem urbana, utilizando tubos rígidos, semirrígidos e flexíveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 114 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 40 p.
- ADAMO, F.; ANDRIA, G.; ATTIVISSIMO, F.; GIAQUINTO, N. An Acoustic Method for Soil Moisture Measurement. **IEEE Transactions and Measurement**, New York, v. 53, n. 4, p. 891-898, 2004.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (Brasil). **Atlas-Água**: Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021.
- ALSAYDALANI, M. O. Effect of Orifice Hydraulic and Geometric Characteristics on Leakage in Water Distribution Systems. **International Journal of GEOMATE**, Tsu, v. 25, n. 107, p. 59-67, 2023.
- ANASTASOPOULOS, A.; KOUROUSIS, D.; BOLLAS, K. Acoustic emission leak detection of liquid filled buried pipeline. **Journal of Acoustic Emission**, Los Angeles, v. 27, p. 27-39, 2009.
- ANTONI, J. Cyclostationarity by examples. **Mechanical Systems and Signal Processing**, London, v. 23, n. 4, p. 987-1036, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS ESTADUAIS DE SANEAMENTO – AESBE. **Série Balanço Hídrico**: Guia Prático para Método Direto de Quantificação de Perdas Reais em Sistemas de Abastecimento. Brasília, v. 6, p. 44, 2015.
- AKI, K.; RICHARDS, P. G. **Quantitative Seismology**: Theory and Methods. San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1980. v. 1, 557 p.

- BANKS, H. T.; HU, S.; KENZ, Z. R. A brief review of elasticity and viscoelasticity. **Advances in Applied Mathematics and mechanics**, Hong Kong, v. 3, n. 1, p. 1-51, 2010.
- BASHAN, A.; BARTSCH, R.; KANTELHARDT, J. W.; HAVLIN, S. Comparison of detrending methods for fluctuation analysis. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Amsterdam, v. 387, n. 21, p. 5080-5090, 2008.
- BATZLE, M.; HOFMANN, R.; PRASAD, M.; KUMAR, G.; DURANTI, L.; HAN, D. Seismic attenuation: observations and mechanisms. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, Houston, p. 1565-1568, 2005. <https://doi.org/10.1190/1.2147991>.
- BEN-MANSOUR, R.; HABIB, M. A.; KHALIFA, A.; YUCEF-TOUMI, K.; CHATZIGEORGIOU, D. Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction. **Computers & Fluids**, New York, v.57, p. 110-123, 2012.
- BJORLYKKE, K.; MONDOL, N. H. **Petroleum geoscience: from sedimentary environments to rock physics**. 2. ed. Berlim: Springer-Verlag, p. 375-402, 2015.
- BOAVENTURA, O. D. Z.; PROENÇA, M. S.; OBATA, D. H. S.; PASCHOALINI, A. T. Convolutional Neural Network for Leak Location in Buried Pipes of Underground Water Supply. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 46, n. 352, p. 14, 2024.
- BORN, M.; WOLF E. **Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light**. 6. ed. New York: Pergamon Press, 1959.
- BORN, W. T. The attenuation constant of earth materials. **Geophysics**, Tulsa, v. 6, n. 2, p. 132-148, 1941.
- BRASIL. Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, jul. 2020a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/14026.htm. Acesso em: mar. 2021.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional da Saúde. **Redução de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água**. 2. ed. Brasília, DF: Funasa, 2014.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Abastecimento de Água: Gerenciamento de Perdas de Água e Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento**. Salvador: ReCESA, 2008. 139 p. (Guia do Profissional em Treinamento: nível 2).
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento - SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2019**. Brasília, DF: SNS/MDR, dez. 2020a. 183 p.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento - SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático: serviços de água e esgotos - Visão Geral 2021**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, dez. 2022.

BRAUN, M. J.; HANNON, W. M. Cavitation formation and modelling for fluid film bearings: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Bury Saint Edmunds, v. 224, n. 9, p. 839-863, 2010.

BRENNAN, M. J.; CHAPMAN, D. N.; JOSEPH, P. F.; METJE, N.; MUGGLETON, J. M.; RUSTIGHI, E. Achieving Zero Leakage by 2050: Leak Detection and Location Methods – Acoustic Leak Detection. **UK Water Industry Research Limited**, London, 2017. 38 p.

BRENNAN, M. J.; KARIMI, M.; MUGGLETON, J. M.; ALMEIDA, F. C. L.; LIMA, F. K.; AYALA, P. C.; OBATA, D. H. S.; PASCHOALINI, A. T.; KESSISSOGLU, N. On the effects of soil properties on leak noise propagation in plastic water distribution pipes. **Journal of Sound and Vibration**, Oxford, v. 427, n. 1, p. 120-133, 2018.

BUTTERFIELD, J. D. **Deriving further information from the leak signal in water distribution pipes**. 2018. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - University of Sheffield, Sheffield, UK, 2018.

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**, Barking, v. 119, p. 146–155, 2017.

CASSA, A. M.; VAN ZYL, J. E.; LAUBSCHER, R. F. A numerical investigation into the effect of the pressure on holes and cracks in water supply pipes. **Urban Water Journal**, London, v. 7, n. 2, p. 109-120, 2010.

CHATZIGEORGIOU, D.; YOUCEF-TOUMI, K.; BEN-MANSOUR, R. Design of a novel in-pipe reliable leak detector. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Piscataway, v. 20, n. 2 p. 824-833, 2015.

CHEN, P.; CHUA, P. S. K.; LIM, G. H. A study of hydraulic seal integrity. **Mechanical Systems and Signal Processing**, London, v. 21, n. 2, p. 1115-1126, 2007.

CHEN, W.; HOLM, S. Fractional Laplacian time-space models for linear and nonlinear lossy media exhibiting arbitrary frequency power-law dependency. **The Journal of Acoustical Society of America**, Melville, v. 115, n. 4, p. 1424- 1430, 2004.

CUNHA JR., A. MaxEnt: Maximum Entropy Code. São Francisco: Repositório GitHub, 2020. Disponível em: <https://github.com/amicocunhajr/MaxEnt>. Acesso em: 11 dez. 2021.

DAS, B. M. **Principles of geotechnical engineering**. 3. ed. Boston: PWS Publishing, 1993.

DATTA, S.; SARKAR, S. A review on different pipeline fault detection methods. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Amsterdam, v. 41, p. 97–106, 2016.

DAVIES, J. T. **Turbulence Phenomena**. New York: Academic Press, 1972.

DOMAGALA, M.; MOMENI, H; DOMAGALA-FABIS, J.; FILO, G.; KWIATKOWSKI, D. Simulation of Cavitation Erosion in a Hydraulic Valve. *In: Terotechnology: CONFERENCE ON TEROTECHNOLOGY*, 10., 2017, Kielce. **Annals [...]**. Millersville, PA: Materials Research Forum LLC, 2018. p. 1-6.

EKMEKCIOĞLU, O.; BAŞAKIN, E. E.; ÖZGER, M. Discharge coefficient equation to calculate the leakage from pipe networks. **Journal of the Institute of Science and Technology**, Kathmandu, v. 10, n. 3, p. 1737-1746, 2020.

EL DEBS, M. K. **Projeto Estrutural de Tubos Circulares de Concreto Armado**. 1. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Telas Soldadas, 2003.

EL-ZAHAB, S.; ZAYED, T. Leak detection in water distribution networks: an introductory overview. **Smart Water**, Madrid, v. 4, n. 5, p. 1-23, 2019.

FAJARDO, R. I. C. **Previsão numérica do comportamento dinâmico da barragem de Breapampa no Peru**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

ROSA FILHO, J. C. **Modelagem Sísmica de Ondas Elásticas e Migração Reversa no Tempo em Meios Transversais Isotrópicos**. 2002. 162 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FLACHSKAMPF, F. A.; WEYMAN, A. E.; GUERRERO, J. L.; THOMAS, J. D. Influence of Orifice Geometry and Flow Rate on Effective Valve Area: An In Vitro Study. **Journal of the American College of Cardiology**. New York, v. 15, n. 5, p. 1173-1180, 1990.

FOX, S. **Understanding the Dynamic Leakage Behaviour of Longitudinal Slits in Viscoelastic Pipes**. 2016. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Estrutural), University of Sheffield, Sheffield, UK 2016.

FUCHS, H.V.; RIEHLE, R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. **Applied Acoustics**, Barking, v. 33, n. 1, p. 1-19, 1991.

GALHARDO, C. E. C.; PENNA, T. J. P.; ARGOLLO DE MENEZES, M.; SOARES, P. P. S. Detrended fluctuation analysis of a systolic blood pressure control loop. **New Journal of Physics**, Bristol, v. 11, 2009.

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

GAO, Y.; LIU, Y.; MUGGLETON, J. M. Axisymmetric fluid-dominated wave in fluid-filled plastic pipes: Loading effects of surrounding elastic medium. **Applied Acoustics**, Barking, v. 11, p. 43-49, 2017.

GAO, Y.; MUGGLETON, J. M., 2014. Effect of shear coupling on the axisymmetric wave motion for buried fluid-filled pipes. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION, 21., 2014, Beijing. **Annals** [...]. Beijing: ICSV, 2014. p. 1-8.

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**, Oxford, v. 375, p. 386-402, 2016.

GIBOWICZ, S. J.; KIJKO, A. **An Introduction to Mining Sismology**. 1. ed. London: Academic Press. 1994. 399 p. (International Geophysics, v. 55). ISBN 9780080918365.

GO ASSOCIADOS; INSTITUTO TRATA BRASIL. **Estudo de Perdas de Água do Instituto Trata Brasil de 2023 - SNIS (2021):** desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico no Brasil. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2023. 74 p.

GREYVENSTEIN, B.; VAN ZYL, J. E. An experimental investigation into the pressure leakage relationship of some failed water pipes. **Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua**, London, v. 56, n. 2, p. 117-124, 2007.

GUILMINEAU, E.; QUEUTEY, P. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a circular cylinder with low mass-damping in a turbulent flow. **Journal of Fluids and Structures**. London, v.19, p. 449-466, 2004.

HAMILTON, E. L. Compressional wave attenuation in marine sediments. **Geophysics**, Oklahoma, v. 37, n. 4, p. 620-646, 1972.

HAMILTON, S.; CHARALAMBOUS, B. **Leak Detection: Technology and Implementation**. 2. ed. London: IWA Publishing, 2013. 200 p.

HARDIN, B. O. The nature of damping in sands. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, Ann Arbor, v. 91, n. 1, p. 63–97, 1965.

HOLTZ, D. R.; KOVACS, D. W. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1981.

HUNAIDI, O. Detecting leaks in water-distribution pipes. **Construction technology update**, Ottawa, Canada, n° 40, 2000. National Research Council of Canada.

HUNAIDI, O.; CHU, W. T. Acoustical characteristics of leak signals in water distribution pipes. **Applied acoustics**, Barking, v. 58, n. 3, p. 235-254, 1999.

HUNAIDI, O.; CHU, W.; WANG, A.; GUAN, W. Detecting Leaks in plastic pipes. **Journal of the American Water Works Association**, New York, v. 92, n. 2, p. 82-94, 2000.

HUNAIDI, O.; GIAMOU, P. Ground-penetrating radar for detection of leaks in buried plastic water distribution pipes. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR*, 1., 1998, Kansas. **Annals [...]**. Kansas: University of Kansas, 1998. p. 783-786.

HUNTER, J. A.; CROW, H. L. **Shear wave velocity measurement guidelines for canadian seismic site characterization in soil and rock**. Canada: Geological Survey of Canada, 2012. 227 p.

JONGMANS, D.; DEMANET, D. The importance of surface waves in vibration study and use of Rayleigh waves for estimating the dynamic characteristics of soils. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 34, n. 1, p. 105–113, 1993.

KAEWWAEWNOI, W.; PRATEEPASEN, A.; KAEWTRAKULPONG, P. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage. **Measurement**, London, v. 43, n. 2, p. 274-282, 2010.

KHULIEF, Y. A.; KHALIFA, A.; BEN MANSOUR, R.; HABIB, M. A. Acoustic Detection of Leaks in Water Pipelines Using Measurements inside Pipe. ASCE, **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, Reston, v. 3, n. 2, p. 47-54, 2012.

KNOPOFF, L. The attenuation of compression waves in lossy media. **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 46, n. 1, p. 47-56, 1956a.

KNOPOFF, L. The seismic pulse in materials possessing solid friction, I: Plane waves. **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 46, n. 3, p. 175-183, 1956b.

KRAMER, S. L. **Geotechnical earthquake engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 653 p. International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.

KROESE, D. P.; TAIMRE, T.; BOTEV, Z. I. **Handbook of Monte Carlo Methods**. Nova York: John Wiley & Sons, 2011. 775 p.

LAMBERT, A. O. Water Losses Management and Techniques. *In*: INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION (IWA) CONGRESS, 2001a, Berlim. **Annals** [...]. Berlim: IWA, 2001a.

LAMBERT, A. What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems? *In*: IWA CONFERENCE ON SYSTEM APPROACH TO LEAKAGE CONTROL AND WATER DISTRIBUTION SYSTEMS MANAGEMENT, 2001b, Brno. **Annals** [...]. Brno: IWA, 2001b. p. 1-8.

LINER, C. L. **Elements of Seismic Dispersion: A Somewhat Practical Guide to Frequency-dependent Phenomena**. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 2012. 184 p. (Distinguished Instructor Series n° 15).

LINER, C. L. **Elements of 3D Seismology**. 3. ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 2016. 362 p. (Investigation in Geophysics Series n° 19).

LI, R.; HUANG, H.; XIN, K.; TAO, T. A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, Oxford, v. 15, n. 3, p. 429-441, 2015.

LIU, C.; LI, Y.; FANG, L.; HAN, J.; XU, M. Leakage monitoring research and design for natural gas pipelines based on dynamic pressure waves, **Journal of Process Control**, Guildford, v. 50, n. 6, p. 66-76, 2017.

LOVE, A. E. H. **Some problems of geodynamics**. London: Cambridge University Press, 1911. 220 p.

MATLAB. **MATLAB version: 2016 (R2016b)**, Natick, Massachusetts: THE MATHWORKS Inc., 2016. Disponível em: https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo. Acesso em: 27 jul. 2020.

MAVKO, G.; MUKERJI, T.; DVORKIN, J. **The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media**. New York: Cambridge University Press, 2009. 511 p.

MEDINA, M. M. G.; REIS, L. F. R.; GUIDO, R. C. Feature extraction in pressure signals for leak detection in water networks. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING AND CONTROL FOR THE WATER INDUSTRY*, 12., v. 70, (2014), Perugia. **Annals** [...]. Perugia: University of Perugia, 2014. p. 688-697.

MEIDAV, T. Viscoelastic Properties of the Standard Linear Solid. **Geophysical Prospecting**, Oxford, v. 12, n. 1, p. 80-99, 1964.

MELAND, E.; HENRIKSEN, V.; HENNIE, E.; RASMUSSEN, M. Spectral analysis of internally leaking shut-down valves. **Measurement**, London, v. 44, n. 6, p. 1059–1072, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2011.03.004>.

MERIBOUT, F. **Analyse de la transmission au sol des vibrations a partir d'une structure vibrante**. 2008. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Mentouri Constantine, Constantine, 2008.

MICHAELS, P. Relating damping to soil permeability. **International Journal of Geomechanics**, Boise, v. 1, n. 1, p. 158–165, 2006.

MILLER, R. K.; HILL, E. V. K.; MOORE, P. O. **Nondestructive Testing Handbook: Acoustic emission testing**. 3. ed. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 2005. 446 p.

MILLER, R. K.; POLLOCK, A. A.; WATTS, D. J.; CARLYLE, J. M.; TAFURI, A. N.; YEZZI JR, J. J. A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. **NDT&E International**, Oxford, v. 32, n. 1, p. 1-8, 1999.

MOORE, S. A review of noise and vibration in fluid-filled pipe systems. *In: PROCEEDINGS OF ACOUSTICS 2016: THE SECOND AUSTRALASIAN ACOUSTICAL SOCIETIES CONFERENCE*, 2016, Brisbane. **Annals** [...]. Brisbane: The Australian Acoustical Society Queensland Division, 2016. p. 1-10.

MUGGLETON, J. M.; SCUSSEL, O.; RUSTIGHI, E.; BRENNAN, M. J.; ALMEIDA, F.; KARIMI, M.; JOSEPH, P. F. A simplified Model of the Ground Surface Vibration Arising from a Leaking Pipe. *In: DIMITROVOVÁ, Z.; BISWAS, P.; GONÇALVES, R.; SILVA, T. Recent Trends in Wave Mechanics and Vibrations*. Lisboa: Springer, 2022.

NEVES, S.; BORGES, J. F.; CALDEIRA, B.; MOITA, P.; PEDRO, J.; BOAVENTURA, R. Aspectos sobre os métodos de refração sísmica. **Geonovas**, Lisboa, v. 28, p. 79-92, 2015.

NOVAK, J. A. **Cavitation and bubble formation in water distribution systems**. 2005. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Ambiental) - Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2005.

OBATA, D.H.S. **Investigação de Métodos de Transmissão e Sincronização de Sinais para uso em um Detector de Vazamentos em Tubulações Enterradas por meio de Correlação Cruzada**. 2019. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2019.

OELZE, M. L.; O'BRIEN, W. D.; DARMODY, R. G. Measurement of Attenuation and Speed of Sound in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 788-796, 2002.

OHSAKI, Y. AND IWASAKI, R. On dynamic shear moduli and Poisson's ratios of soil deposits. **Soils and Foundations**, Tokyo, v. 13, n. 4, p. 59–73, 1973.

OLSZAK, W.; SUKLJE, L. **Limit Analysis and Rheological Approach in Soil Mechanics**. New York: Springer Verlag, 1978. 292 p. CISM courses and Lectures n. 217.

OMIDVAR, M.; ISKANDER, M.; BLESS, S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates. **International Journal of Impact Engineering**, Oxford, v. 49, p. 192-213, 2012.

PAOLA, F.; GIUGNI, M. Leakages and pressure relation: an experimental research. **Drinking Water Engineering and Science**, Gottingen, v. 5, n. 1, p. 59-65, 2012.

PAPASTEFANOU, A. **An experimental investigation of leak noise from water filled plastic pipes**. 2011. 204 f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton, 2011.

PAPASTEFANOU, A. S.; JOSEPH, P. F.; BRENNAN, M. J. Experimental Investigation into the Characteristics of in Pipe Leak Noise in Plastic Water Filled Pipes. **Acta Acustica United with Acustica**, Stuttgart, v. 98, n. 1, p. 847-856, 2012.

PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PINTO, J. P. C. **Determinação Experimental do Amortecimento de um Solo: Desenvolvimento de uma Ferramenta de Aplicação Laboratorial**. 2016. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Geotecnia) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

POLLOCK, A.; HSU, S. Y. Leak detection using acoustic emission. **Journal of Acoustic Emission**, Los Angeles, v. 1, n. 4, p. 237-243, 1982.

PRITIZ, T. Frequency power law of material damping. **Applied Acoustics**, Barking, v. 65, p. 1027-1036, 2004.

PROENÇA, M. S. **Aplicação do Modelo Constitutivo viscoelástico de Kelvin-Voigt e do Método dos Elementos Finitos para a determinação da influência das propriedades do solo na detecção de vazamentos de água em redes de distribuição subterrâneas**. 2019. 124 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Sólidos) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2019.

- PROENÇA, M. S.; PASCHOALINI, A. T.; OBATA, D. H. S. Prediction of the probabilistic water leak location in underground pipelines using Monte Carlo simulation. **Water Practice & Technology**, London, v. 18, n. 3, p. 522-535, 2023.
- PROENÇA, M. S.; PASCHOALINI, A. T.; OBATA, D. H. S.; BOAVENTURA, O. D. Z. Numerical and experimental investigation of the leakage vibro-acoustic signal in a plastic water pipe. *In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING*, 25., 2019, Uberlândia. **Anais [...]**. Uberlândia: ABCM, 2019.
- PROENÇA, M. S.; PASCHOALINI, A. T.; SILVA, J. B. C.; SOUZA, A.; OBATA, D. H. S.; LIMA, L. P. M.; BOAVENTURA, O. D. Z. The Finite Element Method applied in the viscoelastic constitutive model of Kelvin-Voigt for characterization of the soil dynamic response to water leakage simulation. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 44, n. 470, 2022.
- PROENÇA, M. S.; PASCHOALINI, A. T.; SOUZA, A. O efeito da compactação dos solos na detecção de vazamentos pelo método vibro-acústico. *In: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE*, 31., 2020, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: AESABESP, 2020.
- PROENÇA, M. S.; PASCHOALINI, A. T. Investigação Numérica dos Mecanismos de Emissão Acústica de Vazamentos de Água em Dutos Subterrâneos. *In: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE*, 33., 2022, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: AESABESP, 2022.
- PUPIN, G. R.; PROENÇA, M. S.; PASCHOALINI, A. T. A Influência da Compactação do Solo e de Revestimentos Asfálticos na Detecção Vibro-acústica de Vazamentos de Água em Redes de Distribuição Subterrâneas. **Revista DAE**, São Paulo, v. 72, n. 245, p. 1-12, 2024.
- RAO, A. K. Acoustic Emission and Signal Analysis. **Defence Science Journal**, Bhawan, v. 40, n. 1, p. 55-70, 1990.
- RAYLEIGH, L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. **Proceedings of the London Mathematical Society**, London, v. s1-17, n. 1, p. 4-11, 1885.
- REZVANI, N.; BOLDUC, D. L. Monte Carlo Analysis. *In: WEXLER, P. Encyclopedia of Toxicology*. 3. ed. New York: Academic Press, 2014. p. 393–396.
- RIBEIRO, F. B.; MOLINA, E. C. **Geofísica – Tópico 3: Ondas Elásticas no Interior da Terra**. São Paulo: USP/ Univesp/ Edusp, 2014, p. 48-70.
- ROCHA, M. S. Acoustic monitoring of pipeline leaks. *In: ISA CALGARY SYMPOSIUM PAPER*, 1989, Calgary. **Annals [...]**. Calgary: ISA Services Inc, 1989. p. 283-290.
- ROESSET, J.; KAUSEL, E.; CUELLAR, V.; MONTE, J.; VALEIRO, J. Impact of weight falling onto the ground. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 120, n. 8, p. 1394–1412, 1994.
- ROSS, D. **Mechanics of underwater noise**. California: Pergamon Press Inc, 1976. 375 p.

SANTOS, J. A. C. **Controle de perdas de água em um distrito de medição e controle do Sistema Costa Norte em Florianópolis/SC**. 2018. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SANTOS, J. P. L. **Análise de Modelos Reológicos Viscoelásticos através de Formulações Mistas em Elementos Finitos**. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

SCOTT D. W. **Multivariate Density Estimation: Theory, Practice and Visualization**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2015.

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**, London, v. 147, n. 15, 2021a.

SCUSSEL, O.; SEÇGIN, A.; BRENNAN, M. J.; MUGGLETON, J. M.; ALMEIDA, F. C. L. A stochastic model for the speed of leak noise propagation in plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, Oxford, v. 501, n. 1, 2021b.

SHEHADEH, M.; SHARARA, A.; KHAMIS, M.; EL-GAMAL, H. A Study of Pipeline Leakage pattern Using CFD. **Canadian Journal on Mechanical Sciences & Engineering**, Ontário, v. 3, n. 3, p. 98-101, 2012.

SHONKWILER, R.W.; MENDIVIL, F. **Explorations in Monte Carlo Methods**. 1. ed. Nova York: Springer International Publishing, 2009. 243 p.

SILVA M. F.; GONÇALVES F. V.; JANZEN J. G. Effect of Hydraulic and geometric factors upon leakage flow rate in pressurized pipes. **Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 26, n. 40, p. 1-8, 2021.

SOIZE, C. Stochastic modeling of uncertainties in computational structural dynamics: recent theoretical advances. **Journal of Sound and Vibration**, Oxford, v. 332, n. 10, p. 2379–2395, 2013.

SOIZE, C. **Uncertainty Quantification: An Accelerated Course with Advanced Applications in Computational Engineering**., Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. 344 p. Interdisciplinary Applied Mathematics 47.

STOLL, R. Computer-aided studies of complex soil modulus. *In*: MEASUREMENT AND USE OF SHEAR WAVE VELOCITY FOR EVALUATING DYNAMIC SOIL PROPERTIES, 1985, New York. **Proceeding** [...]. New York: ASCE, 1985. p. 18-33.

SZABO, T. L. Time domain wave equations for lossy media obeying a frequency power law. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 96, n. 1, p. 491-500, 1994.

THOMPSON, M.; CHAPMAN, C.; HOWISON, S.; OCKENDON, J. Noise generation by water pipe leaks. *In*: EUROPEAN STUDY GROUP WITH INDUSTRY, 40., 2001, Keele. **Study Report**. Delft: ECMI, 2001. p. D1-D6.

TROYAN, V.; KISELEV, Y. **Statistical Methods of Geophysical Data Processing**. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010. 454 p.

UDWADIA, F. E. Some results on maximum entropy distributions for parameters known to lie in finite intervals. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, Philadelphia, v. 31, n. 1, p. 103–109, 1989.

VELEA, D.; SHIELDS, F. D.; SABATIER, J. M. Elastic Wave Velocities in Partially Saturated Ottawa Sand: Experimental results and modeling, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 4, p. 1226-1234, 2000.

FONSECA, A. V.; FERREIRA, C. Bender elements como técnicas laboratoriais excelentes para avaliação de parâmetros geotécnicos referenciais. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTENCIA, 8., 2022, Lisboa. **Anais** [...]. Lisboa: LNEC, 2022. p. 353-365.

WALSKI T.; WHITMAN B.; BARON M.; GERLOFF F. Pressure vs. Flow Relationship for Pipe Leaks. *In*: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2009, 2009, Kansas City. **Anaals** [...]. Kansas City: American Society of Civil Engineers, 2009.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 2. ed. California: DCW Industries, 1998.

XIAO, R.; HU, Q.; LI, J. A model-based health indicator for leak detection in gas pipeline systems. **Measurement**, London, v. 171, 2021.

YAN, S.; YUAN, H.; GAO, Y.; JIN, B.; MUGGLETON, J. M.; DENG, L. On Image Fusion of Ground Surface Vibration for Mapping and Locating Underground Pipeline Leakage: An Experimental Investigation. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 7, p. 1896, 2020.

YU Y.; SAFARI A.; NIU X.; DRINKWATER B.; HOROSHENKOV K. V. Acoustic and ultrasonic techniques for defect detection and condition monitoring in water and sewerage pipes: A review. **Applied Acoustics**, Barking, v. 183, p. 108282-108295, 2021.

ZHENG, H.; SONG, W; WANG, J. Detrended fluctuation analysis of forest fires and related weather parameters. **Physica A**, Amsterdam, v. 387, n. 8, p. 2091-2099, 2008.

ZHU, Y.; TSVANKIN, I.; DEWANGAN, F.; VAN WIJK, K. Physical modeling and analysis of P-wave attenuation anisotropy in transversely isotropic media. **Geophysics**, Tulsa, v. 72, n. 1, p. D1–D7, 2007.

ZHU, G.; ZHU, L.; YU, C. Rheological properties of soil: a review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Ordos, v. 64, n. 1, p. 1-7, 2017.

ZOHORA, F. **Study of pipe leak fluid dynamic characteristics and their influences on acoustic emission generation**. 2021. 160 f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Science and Engineering Faculty, Queensland University of Technology, Queensland, 2020.