

## **LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS DE ÁGUA EM REDES SUBTERRÂNEAS UTILIZANDO TÉCNICA GEOFÍSICA VIBRO-ACÚSTICA**

### **Matheus Silva Proença<sup>(1)</sup>**

Eng. Mecânico graduado pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - FEIS/UNESP (2017) e Mestre em Mecânica dos Sólidos (2019), com pesquisa na área de Modelagem Computacional aplicada a dinâmica de solos. Eng. de Segurança do Trabalho (2020), e Especialista em Empreendedorismo e Inovação Tecnológica (2021). Atualmente, doutorando em Eng. Mecânica (PPGEM-UNESP) e bolsista do programa CAPES, com projeto de pesquisa na área de detecção de vazamentos em redes distribuição de água subterrâneas.

### **Amarildo Tabone Paschoalini<sup>(2)</sup>**

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP (1992), mestrado (1996) e doutorado (2001), em Engenharia Mecânica, pela UNICAMP. Desde 1996 é professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica e Eletrônica, com ênfase em Métodos Numéricos, Modelagem Computacional, Projeto de Máquinas, Bioengenharia e Empacotamento Eletromecânico.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Brasil, 56 - Centro - Ilha Solteira - São Paulo - CEP: 15385-000 - Brasil - Tel: +55 (18) 3743-1038 Fax: +55 (18) 3742-2992 - e-mail: matheus.proenca@unesp.br .

### **RESUMO**

Visando performance no gerenciamento sustentável dos recursos hídricos, se intensifica as ações ligadas ao controle e a redução dos índices de perdas nos sistemas de abastecimento de água. Nesta conjuntura, para o combate das perdas reais no sistema, diversas técnicas de detecção/localização de vazamentos vêm sendo aprimoradas continuamente. No entanto, muitas das técnicas existentes no cenário são invasivas ou demandam, pelo menos, pontos de acesso à tubulação, além disso, muitas são onerosas ou exigem alta qualificação e experiência dos operadores. Em vista disto, o presente trabalho propôs um modelo analítico simples, baseado em técnicas geofísicas vibro-acústicas, para a localização de vazamentos de água subterrâneos. O modelo referido se detém à análise de pares de sensores na superfície do solo e, através de ferramentas estatísticas, prediz, de forma automatizada, o epicentro do vazamento. Nos ensaios prévios realizados, o máximo erro absoluto obtido nas predições foi de 16 cm. Assim, em vista dos bons resultados apresentados, conclui-se que o modelo tem grande potencial na otimização do processo de localização de vazamentos e deve, futuramente, ser testado em campo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Localização de Vazamentos, Vibrações, Propagação de ondas.

### **INTRODUÇÃO**

Os índices de perda de água em muitos países ainda são preocupantes e exigem uma intervenção sistemática. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), elaborados pela ONU, espelham esta apreensão mundial. No Brasil, por exemplo, aproximadamente, 40 % da água tratada é perdida, em média, no processo de distribuição (SNIS 2022), e cerca de 60 % deste volume não faturado é, essencialmente, devido a vazamentos reais existentes na rede (GO-ASSOCIADOS/INSTITUTO TRATA BRASIL, 2022).

Para se combater este cenário, diversas técnicas de detecção/localização vêm sendo aprimoradas e aplicadas e, dentre elas, as técnicas vibro-acústicas assumem protagonismo, por, usualmente, apresentarem boa sensibilidade e precisão, baixa taxa de falsos positivos e reduzido tempo de trabalho (TSUTIYA, 2008; LIU *et al.*, 2017). Em suma, estes métodos coletam e processam o próprio sinal vibro-acústico emitido pelo vazamento, que, em movimentos ondulatórios, se propaga até a superfície do solo ou em pontos de acesso à tubulação enterrada (FUCHS & RIEHLE, 1991).

Entretanto, apesar de serem promissores, alguns destes métodos, como o da tecnologia das *smart-balls*, são invasivos, exigindo, para a sua aplicação, um tempo de inatividade em um ramo do sistema, ou alterações em seus parâmetros de funcionamento (EL-ZAHAB & ZAYED 2019). Outros métodos, como os correlacionadores, exigem pontos de

acesso direto à tubulação, como hidrantes e válvulas (SCUSSEL *et al.*, 2021), sendo por vezes inviáveis em cidades com menor infraestrutura.

Além disso, alguns métodos vibro-acústicos existentes no mercado são caros devido à tecnologia embarcada em seus equipamentos, e, também, exigem uma ampla qualificação e experiência da equipe de operadores envolvida para se realizar o processamento e a interpretação adequada dos dados coletados (YU *et al.* 2021). Alguns métodos ainda apresentam limitações em sua aplicação e têm sua eficiência prejudicada quando aplicados em redes com tubulações plásticas, por exemplo (EL-ZAHAB & ZAYED 2019; SCUSSEL *et al.* 2021).

Em vista disto, o presente trabalho propôs um modelo analítico, vibro-acústico, para prever a localização de vazamentos em redes de distribuição subterrâneas, por meio da análise de pares de sensores na superfície do solo, não exigindo interferências e nem paradas no sistema. O método apresentado requer mínima experiência e treinamento do operador, pois, com a superfície georreferenciada, automatiza-se a localização do sinistro com o fornecimento da distância entre um sensor e o epicentro do vazamento procurado. Além disso, a instrumentação utilizada é leve, portátil e relativamente barata.

Para se realizar o processo de localização, como mostra a Figura 1, o modelo considera dois caminhos sísmicos através dos quais o sinal do vazamento irá se propagar até atingir os sensores na superfície. Como os ambientes geológicos representam sistemas multiparamétricos complexos, alguns parâmetros de entrada do modelo possuem incertezas epistêmicas associadas a eles, então, são tratados estatisticamente. Para este fim, o trabalho utilizou o Método clássico de Monte Carlo, uma técnica de simulação muito empregada para cálculos estocásticos devido à sua simplicidade conceitual e algorítmica, e bons resultados (SHONKWILER & MENDIVIL, 2009).

A inferência estatística irá tanto descrever as observações experimentais, quanto verificar a qualidade de predição do modelo analítico proposto, com níveis de confiança conhecidos e com perda mínima de informações do fenômeno (TROYAN & KISELEV, 2010).

## **OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de localização analítico que facilite e reduza custos no processo de busca de vazamentos de água em dutos subterrâneos. O modelo se baseia em técnicas geofísicas vibro-acústicas e se detém à análise de pares de sensores na superfície do solo, tratando as incertezas existentes com inferência estatística.

## **METODOLOGIA UTILIZADA**

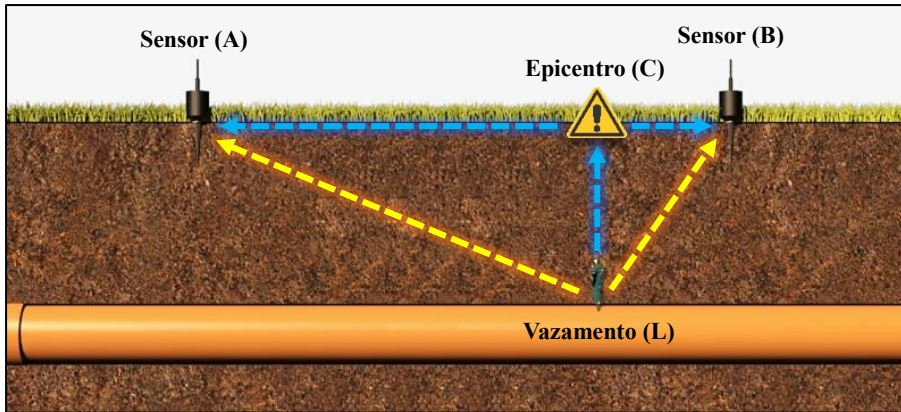
### ***Modelo Analítico***

Parte da energia vibro-acústica gerada, pelo vazamento, no subsolo, irá se propagar ao longo do geomaterial e chegar à superfície através de ondas sísmicas, que são classificadas de acordo com o seu perfil de propagação. As ondas geradas internamente no maciço são conhecidas como ondas de corpo, podendo ser elas ondas de compressão ou ondas de cisalhamento. Já as ondas de propagação superficial são conhecidas como ondas de superfície. As ondas Rayleigh e as ondas Love são exemplares desse tipo (KRAMER 1996).

Os caminhos de propagação do sinal do vazamento podem ser diversos. No entanto, a presente pesquisa considerou apenas dois tipos de caminhos sísmicos para gerar as predições de localização desejadas. O primeiro caminho adotado, representado, na Figura 1, pela linha tracejada amarela, considera ondas de corpo de compressão (P) se propagando, diretamente, da fonte de excitação até os sensores na superfície. Este evento gera sucessivas compressões e extensões do meio.

O segundo caminho ponderado, por sua vez representado pela linha tracejada azul na Figura 1, considera que as ondas de corpo geradas pelo vazamento irão primeiramente se propagar até a interface da superfície e, em seguida, se converter em ondas de superfície do tipo Rayleigh, se propagando, então, até os sensores. As Interfaces existentes ao longo dos caminhos de propagação, com diferenças de impedância, são responsáveis por este processo de transformação e decomposição das ondas sísmicas.

**Figura 1 – Representação dos caminhos sísmicos adotados no modelo.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As ondas Rayleigh se propagam em um movimento elíptico retrógrado, gerando deslocamento verticais no plano de propagação. A velocidade destas ondas de superfície,  $V_R$ , é, geralmente, inferior à das ondas P,  $V_P$  (FILHO, 2002; PINTO, 2016). A relação empírica entre as velocidades pode ser dada como:

$$C_V = \frac{V_P}{V_R} = \sqrt{\frac{(1 - \nu) \cdot (1 + \nu)^2}{(0.5 - \nu) \cdot (0.87 + 1.12\nu)^2}} \quad (1)$$

sendo  $\nu$  o coeficiente de Poisson do solo em questão. A relação  $C_V$  foi deduzida das velocidades  $V_P$  e  $V_S$  e da razão  $V_R/V_S$  apresentada por Filho (2002).

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} ; \quad V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} ; \quad \frac{V_R}{V_S} \cong \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (2)$$

As ondas sísmicas são ondas elásticas, pois, como observado, dependem das propriedades elásticas do material através do qual viajam (HUNTER & CROW 2012).

Desenvolvendo, então, adequadamente, as relações trigonométricas do problema e estimando o atraso de tempo entre pares de sinais da malha de sensores, a partir do pico da Função de Correlação Cruzada dada pela Eq. 4, tem-se que a distância entre o sensor A e o epicentro do vazamento C, pelo primeiro caminho de onda proposto,  $\overline{AC}_P$ , é dada por:

$$\overline{AC}_P = \sqrt{\left( \frac{\left( \frac{1 + C_V^2}{2} \right) \overline{AB} + (\text{delay}_{\overline{AB}} \cdot V_P) \cdot \cos(\overline{ABL})}{(C_V + \cos(\overline{ABL}))} \right)^2 - h^2} \quad (3)$$

sendo o ângulo  $\overline{ABL} = \text{atan}\left(\frac{h}{\overline{BC}}\right)$ ;  $h$  a profundidade do tubo enterrado;  $C_V$  a razão entre as velocidades das ondas  $(V_P/V_R)$  e  $\text{delay}_{\overline{AB}}$  o atraso de tempo entre os sensores A e B. A distância  $\overline{BC}$  pode ser obtida por um processo iterativo simples ( $\overline{AB} = \overline{AC} + \overline{BC}$ ) ou também pode ser tratada como um parâmetro com incertezas associadas e ( $0 \leq \overline{BC} \leq \overline{AC}$ ).

$$R_{X_A X_B}(\tau) = F^{-1}\{S_{X_A X_B}(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{X_A X_B}(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (4)$$

sendo  $i = \sqrt{-1}$ .  $F^{-1}\{\cdot\}$  indica a transformada inversa de Fourier (iFFT) e  $S_{X_A X_B}$  a Densidade Espectral de Potência Cruzada (CPSD) entre os sinais.

Quanto ao segundo evento sísmico proposto, a distância entre o sensor A e o epicentro do vazamento C,  $\overline{AC}_R$ , é descrita por:

$$\overline{AC}_R = \frac{\overline{AB} + (\text{delay}_{\overline{AB}} \cdot V_R)}{2} \quad (5)$$

Assim, a predição da localização do epicentro do vazamento (posição C da Figura 1) pode ser obtida pelos caminhos sísmicos aplicados isoladamente, como apresentado pelas Eq. 3 e 5, ou de forma combinada, como proposto na Eq. 6. A ordem de associação dos eventos pode ser melhor investigada em estudos futuros, no entanto, para este trabalho, aplicou-se uma relação linear entre eles, como se segue.

$$\overline{AC}_{real} = F_P \cdot \overline{AC}_P + F_R \cdot \overline{AC}_R \quad (6)$$

sendo  $F_P$  e  $F_R$  as porcentagens de contribuição dos eventos 1 e 2, respectivamente, na predição final. Além disso, para uma maior precisão nas previsões, é possível, também, realizar um estudo paramétrico para se relacionar os coeficientes  $F_P$  e  $F_R$  com a distância dos sensores.

É importante salientar que, se o solo analisado apresentar alta heterogeneidade – gerando um grande número de interfaces internas refletivas –, ou se a distância entre os pares de sensores for grande o suficiente para gerar mudanças significativas nas contribuições das ondas entre cada sensor, a correlação entre os sinais coletados será, de certa forma, prejudicada, desencadeando em maiores erros nas predições. Todavia, o tratamento estatístico proposto, ainda contribuirá para as melhores decisões neste cenário.

#### ***Caracterização das incertezas dos parâmetros***

Em um estudo geofísico sempre haverá um grau significativo de incertezas relacionado. No trabalho desenvolvido, as incertezas que o modelo apresenta são, essencialmente, de origem epistêmica, uma vez que estão ligadas à variabilidade das propriedades elásticas do solo, a possibilidade de desvios nas medições experimentais, e, também, devido a erros associados às simplificações adotadas, a hipóteses de modelagem e a algum desconhecimento sobre o fenômeno físico abordado (SOIZE 2013, 2017).

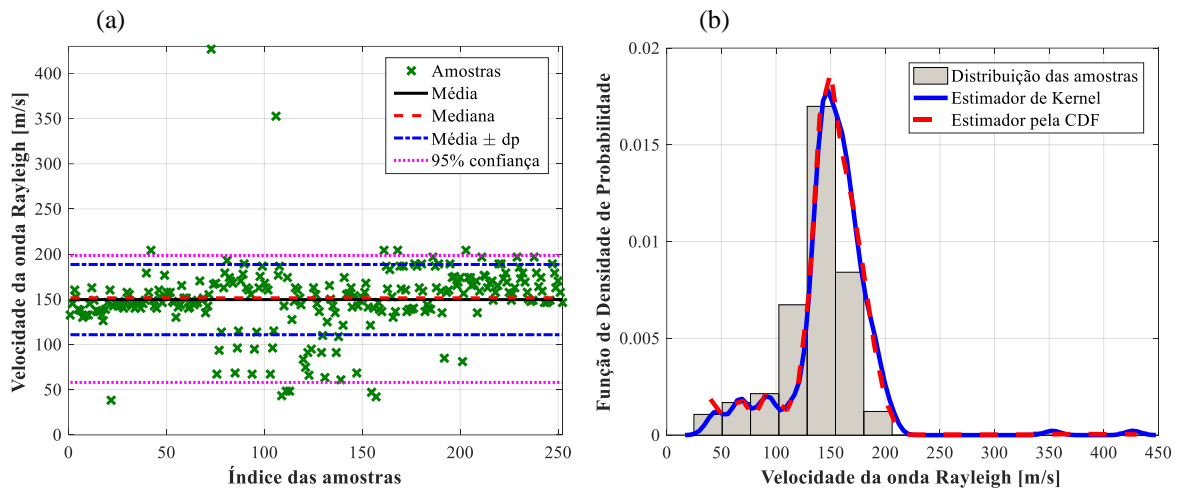
Assim, o modelo analítico desenvolvido foi tratado considerando um grau de incertezas associado a velocidade da onda Rayleigh ( $V_R$ ), a razão de velocidades  $C_V$  – que é função do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) – e a profundidade do tubo ( $h$ ). A velocidade da onda superficial do tipo Rayleigh, por exemplo, varia não só devido a dispersividade natural deste tipo de onda (JONGMANS & DEMANET, 1993), mas, também, com as heterogeneidades existentes no geomaterial ensaiado.

A Função de Densidade de Probabilidade (FDP) da velocidade da onda superficial foi estimada a partir de amostras experimentais obtidas em um ensaio prévio, de impacto, realizado na superfície do maciço, e através de abordagens probabilísticas não paramétricas, como o estimador de densidade de *Kernel* e a função de distribuição acumulada empírica (FDC).

A Fig. 2a apresenta a distribuição das amostras coletadas e a Fig. 2b mostra um histograma dos conjuntos de dados experimentais e a respectiva distribuição de probabilidade ajustada. A FDP descreve a verossimilhança de uma variável aleatória assumir um determinado valor, permitindo, assim, uma maior precisão na descrição das incertezas dos parâmetros utilizados (REZVANI & BOLDUC, 2014).

Como apresentado na Figura 2, a distribuição das amostras experimentais tem suporte igual a [37,79; 426,67] m/s, e parâmetros estatísticos  $\mu = 149,73$  m/s, e  $\sigma = 38,87$  m/s.

**Figura 2 – a) Amostras experimentais de  $V_R$  e seus parâmetros estatísticos. b) FDP empírica calculada.**



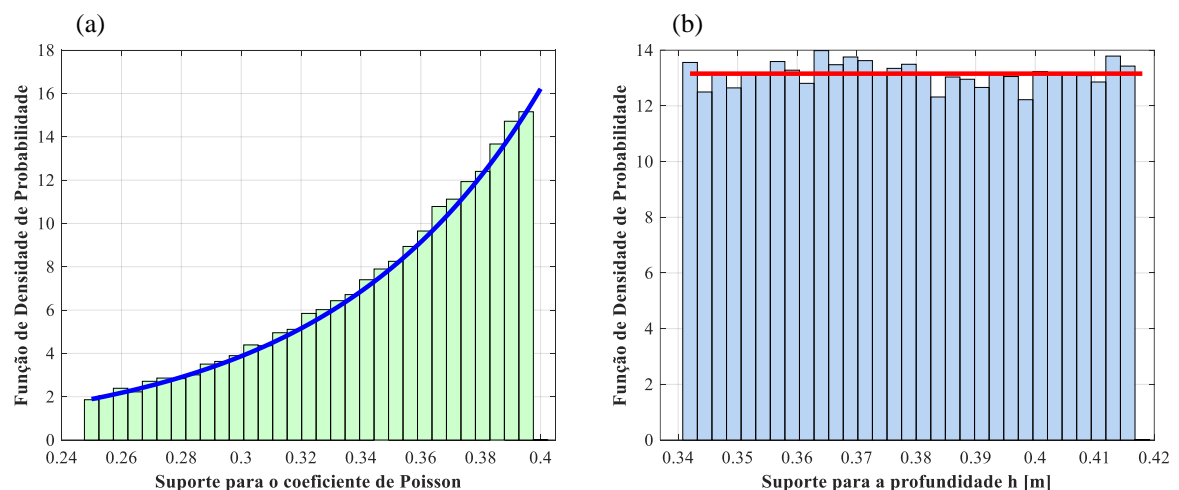
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As velocidades da onda de corpo compressional ( $V_P$ ) foram, então, associadas às velocidades da onda superficial por meio do coeficiente  $C_V$  (Eq. 1).

Já as Funções de Densidade de Probabilidade do coeficiente de Poisson e da profundidade do tubo foram construídas por meio do Princípio da Entropia Máxima. Para um suporte finito positivo para o coeficiente de Poisson igual a  $[0,25-0,40]$  e uma expectativa  $\mu=0,35$ , tem-se que a distribuição maximamente não presumida consistente é uma distribuição exponencial truncada (UDWADIA, 1989; CUNHA, 2020), como mostrado na Fig. 3a.

Quanto as incertezas associadas a profundidade de instalação das tubulações subterrâneas, tem-se apenas um suporte conhecido, com uma variação  $\Delta h = 10\%$ . Assim, uma distribuição uniforme para o parâmetro é a mais adequada (Fig. 3b).

**Figura 3 – a) Distribuição de probabilidade exponencial truncada para o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). b) Distribuição de probabilidade uniforme para a profundidade do tubo ( $h$ ).**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



Com as incertezas de todos os parâmetros caracterizadas, uma grande variedade de cenários probabilísticos foi criada através da simulação de Monte Carlo. Tais informações foram então combinadas e a solução probabilística do modelo foi obtida.

No cerne de qualquer simulação de Monte Carlo está o gerador de números aleatórios que deve ser capaz de criar um grande fluxo de variáveis aleatórias independentes e distribuídas de acordo com uma Função de Distribuição de Probabilidade pré-estabelecida (KROESE, TAIMRE & BOTEV, 2011). Neste trabalho, para a geração das variáveis aleatórias utilizadas nas simulações, aplicou-se o Método da Transformada Inversa.

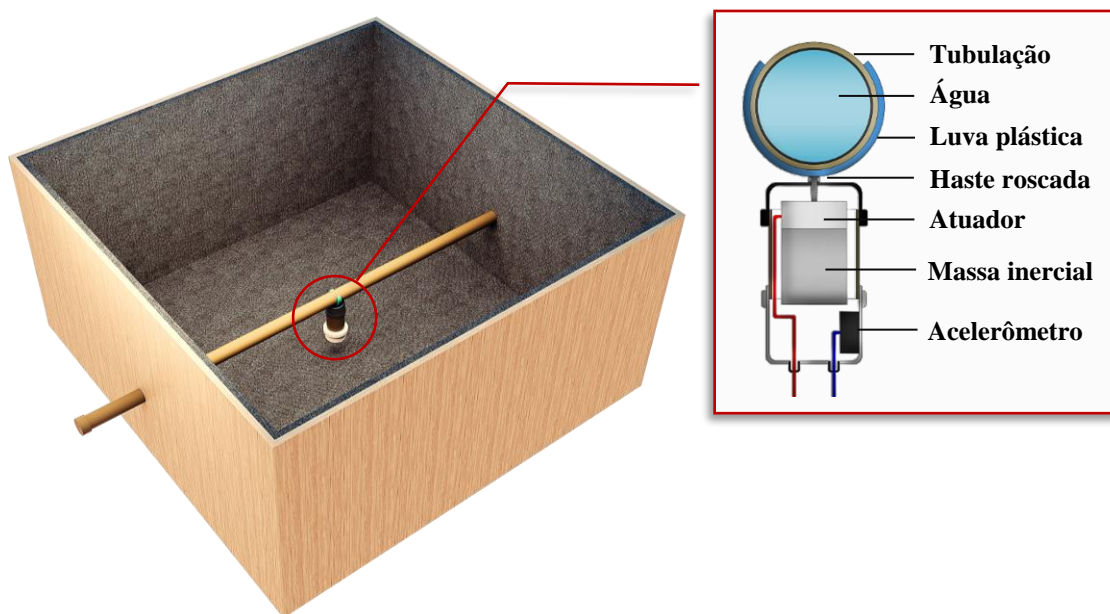
### ***Procedimentos Experimentais***

Os ensaios experimentais utilizados para a avaliação do modelo foram executados em uma bancada de teste. Conforme mostrado na Figura 4, o *setup* foi constituído por um reservatório de madeira, com dimensões iguais a 1,6 m x 1,6 m x 0,8 m, preenchido com solo local, previamente peneirado e compactado. Todas as paredes internas da caixa foram adequadamente revestidas com uma manta de poliéster, com 10 mm de espessura.

A 0,3 m da base, foi enterrada uma tubulação de PVC ( $\varnothing = 50$  mm), preenchida por água. Para a simulação da excitação do vazamento, acoplou-se, ao tubo, um atuador mecânico instrumentado, como ilustra a Figura 4. O sinal emitido pelo sistema foi um ruído branco, na faixa [0–6400] Hz, gerado computacionalmente e amplificado por um amplificador de som. Tal simulação da excitação é respaldada por Wang *et al.* (2017) e Scussel *et al.* (2021).

A fonte estava a uma profundidade de 0,38 m da superfície, e em  $x = 0$  m e  $y = 0$  m.

**Figura 4 – Ilustração da bancada experimental de testes.**



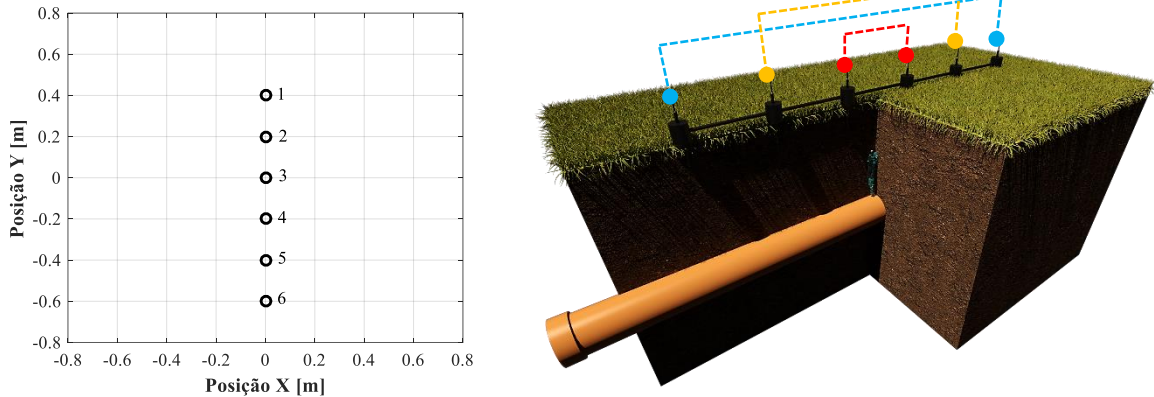
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A aquisição do sinal foi realizada utilizando o sistema Siemens - LMS SCADAS XS, e 7 acelerômetros piezoelétricos uniaxiais PCB 333B – 6 deles compoendo uma malha de sensores na superfície do solo, como mostra a Figura 5, e 1 monitorando o transdutor enterrado, como mostra a Figura 4 –.

Antes de se calcular a Função de Correlação Cruzada entre pares de sensores da malha, os sinais coletados foram filtrados aplicando-se um filtro passa-banda em uma faixa de frequência com boa coerência entre os sinais, reduzindo, assim, efeitos indesejados devido a ruídos de fundo e intrínsecos ao próprio geomaterial.

Nos testes, abordou-se 6 diferentes amplitudes de excitação, com valor quadrático médio (*rms*), da aceleração, variando de 0,1 a 2,0 m/s<sup>2</sup>. Em cada teste experimental, a previsão final da localização do vazamento foi obtida a partir da média de 11 previsões geradas da combinação, em pares, dos seis sensores da malha.

**Figura 5 – Distribuição da malha de sensores na superfície.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

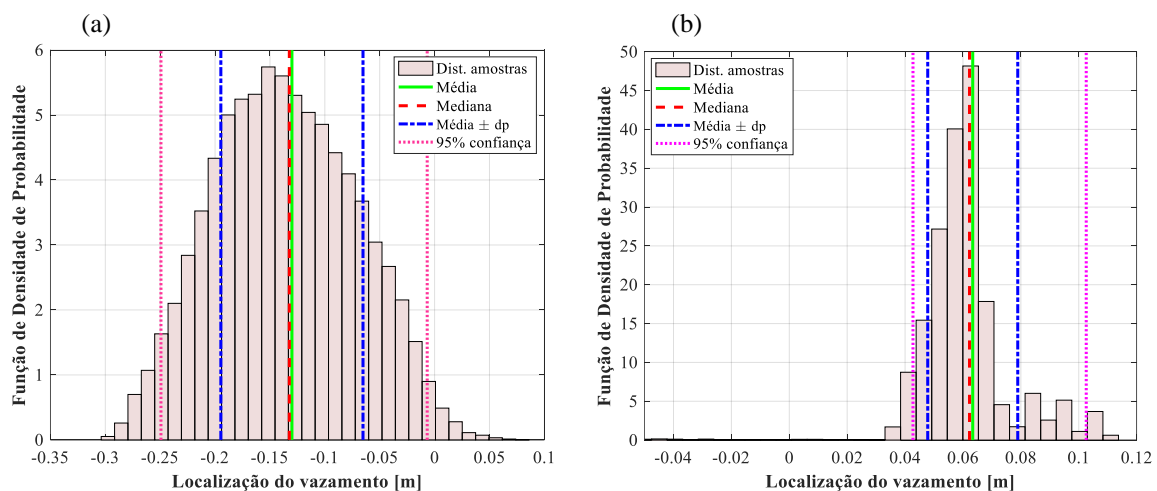
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

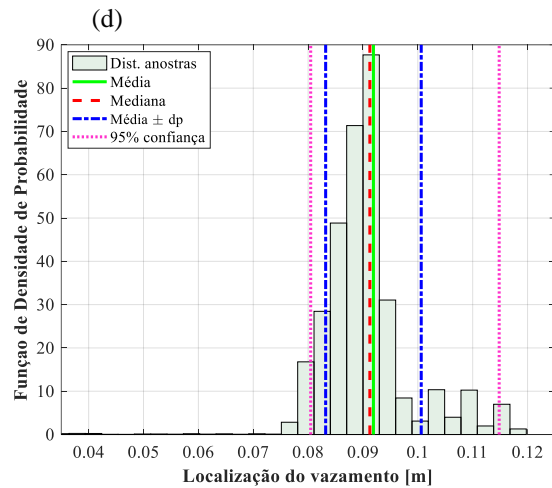
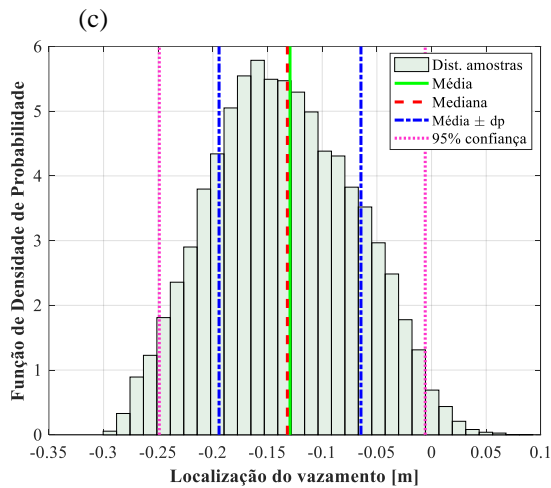
Todas as simulações numéricas do presente trabalho foram desenvolvidas no *software* de programação MATLAB. A convergência da simulação de Monte Carlo foi previamente verificada usando uma estimativa do momento de segunda ordem. 25.000 amostras aleatórias foram utilizadas em cada caso abordado.

Enfim, a Figura 6 apresenta os resultados estatísticos para a previsão da localização do vazamento, aplicando-se os eventos sísmicos, isoladamente, para uma excitação com *rms* = 0,5 m/s<sup>2</sup> e *rms* = 1,0 m/s<sup>2</sup>.

Como pode ser contemplado, os resultados, de ambas as equações analíticas propostas, para ambas as amplitudes de excitação, forneceram uma boa previsão da localização do vazamento. Levando em consideração o valor mais provável da FDP, o erro absoluto obtido foi de 15cm e 16 cm para o primeiro evento e de 6 cm e 9 cm para o segundo.

**Figura 6 – Resultados estatísticos para o a) evento 1 (*rms* = 0,5 m/s<sup>2</sup>). b) evento 2 (*rms* = 0,5 m/s<sup>2</sup>). c) evento 1 (*rms* = 1,0 m/s<sup>2</sup>). d) evento 2 (*rms* = 1,0 m/s<sup>2</sup>).**



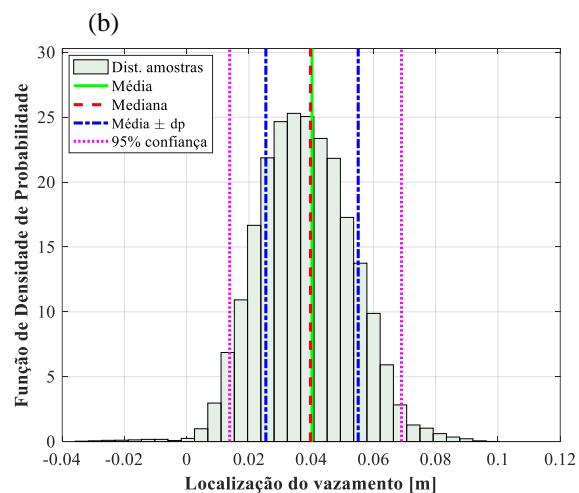
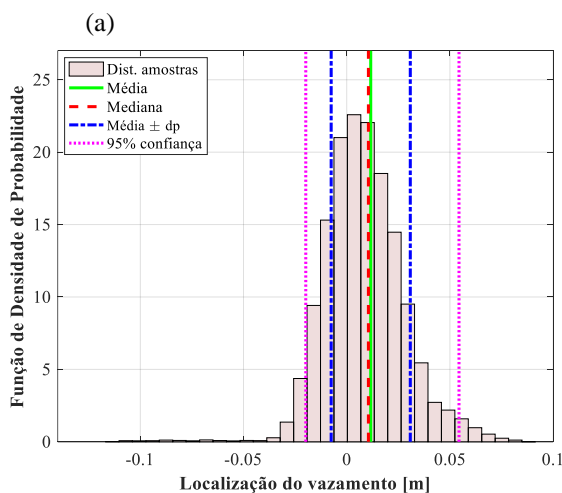


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em seguida, os dois eventos sísmicos foram combinados, linearmente, como mostra a Equação 6, para cada ajuste de excitação. Os valores dos coeficientes  $F_P$  e  $F_R$  foram obtidos por meio de um estudo paramétrico e são função da distância dos sensores. A Figura 7 mostra uma melhora significativa dos resultados com a combinação dos dois eventos, como já era esperado.

Para os casos abordados, a previsão teve uma melhora mínima de 66,7%, em relação às previsões anteriores com os modelos aplicados isoladamente. Levando em consideração o valor mais provável das FDPs, o erro absoluto máximo obtido foi de 3 cm.

**Figura 7 – Resultados estatísticos dos eventos sísmicos combinados. a)  $rms = 0.5 \text{ m/s}^2$ . b)  $rms = 1.0 \text{ m/s}^2$ .**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

18 diferentes cenários foram também investigados nesta pesquisa, alterando-se o arranjo da malha de sensores e a amplitude da excitação do vazamento simulado, e, em todos os casos, o modelo apresentou boas previsões. Demais ensaios e resultados realizados com esta linha de pesquisa podem ser apreciados na publicação realizada, pelo autor, no periódico da Associação Internacional de Água – IWA (PROENÇA, PASCHOALINI & OBATA, 2023).

Vale destacar que, em campo, na presença de um vazamento real, as propriedades do solo mudarão consideravelmente nas proximidades do fluxo de água. Estas variações substanciais de impedância gerarão, juntamente com as heterogeneidades naturais do maciço, um número maior de reflexões, reduzindo, provavelmente, a precisão do modelo. Contudo, combinar vários pares de sensores, como já foi proposto, é uma



das estratégias para se reduzir o impacto desses eventos; no entanto, testes futuros também devem ser realizados, em campo, para melhor investigar e discutir a qualidade dos resultados.

## CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi desenvolvido um modelo analítico, baseado em técnicas geofísicas vibro-acústicas, a fim de simplificar o processo de localização de vazamentos de água em redes de distribuição subterrâneas, a partir da simples análise da superfície do terreno acima da tubulação.

O método proposto considerou dois tipos de caminhos sísmicos para a propagação do sinal do vazamento até a superfície do solo – um caminho direto percorrido por ondas de corpo de compressão 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 analítico 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 ( $\nu$ ) – e a profundidade do tubo ( $h$ ). A Função de Densidade de Probabilidade 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 usando a simulação de Monte Carlo.

Em um ambiente experimental controlado, o modelo proposto foi validado. Seu desempenho foi analisado para cada evento sísmico isoladamente, e para um evento combinado. Os resultados estatísticos, de ambas as equações analíticas isoladas, forneceram uma boa previsão da localização do vazamento nos casos retratados. 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. A combinação dos eventos gerou uma melhora de 66,7 % nos resultados.

Como observado, o modelo analítico apresentado facilita o processo de localização, requer mínima experiência e treinamento dos operadores, e utiliza uma instrumentação leve, portátil e, relativamente, barata. Ademais, 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 realizar tomografia sísmica intrusiva no maciço, o que geraria mais custos no projeto, uma mão de obra especializada, e maior tempo de serviço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CUNHA JR., A. MaxEnt – *Maximum Entropy Code*. Repositório GitHub, 2020. Disponível em <https://github.com/amicocunhajr/MaxEnt>. Acesso em: 11/12/2021.
2. EL-ZAHAB, S., ZAYED, T. *Leak detection in water distribution networks: an introductory overview*. *Smart Water*, v.4, n.5, p. 1-23, 2019.
3. FILHO, J.C.R. Modelagem sísmica de ondas elásticas e migração reversa no tempo em meios transversalmente isotrópicos. Rio de Janeiro, 2002. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.
4. FUCHS, H.V., RIEHLE, R. *Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis*. *Appl Acoust*, v.33, n.1, p. 1–19, 1991.
5. GO-ASSOCIADOS / INSTITUTO TRATA BRASIL. Estudo de Perdas de Água do Instituto Trata Brasil de 2022 (SNIS 2020): Desafios para Disponibilidade Hídrica e Avanço da Eficiência do Saneamento Básico. São Paulo, p. 67, 2022.
6. HUNTER, J.A., CROW, H.L. *Shear Wave Velocity Measurement Guidelines for Canadian Seismic Site Characterization in Soil and Rock*. Report of Geological Survey of Canada, Ottawa, Canada, p. 227, 2012.
7. 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*, v.34, n.1, p. 105–113, 1993.

8. KRAMER, S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall (*International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics*), p. 653, 1996.
9. KROESE, D.P., TAIMRE, T., BOTEV, Z.I. *Handbook of Monte Carlo Methods*. John Wiley & Sons, Nova York, 2011.
10. 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*, v.50, n.6, p. 66-76, 2017.
11. PINTO, J.P.C. Determinação experimental do amortecimento de um solo: Desenvolvimento de uma ferramenta de aplicação laboratorial. Porto, 2016. Dissertação de Mestrado – Universidade do Porto, 2016.
12. 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*, v.18, n.3, p.522-535, 2023.
13. REZVANI, N., BOLDUC, D.L. *Monte Carlo analysis*. Em: Wexler, P. (ed.) *Encyclopedia of Toxicology*, 3ª ed. Elsevier, Bethesda, p. 393–396, 2014.
14. 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, n.15, p. 107059–107071, 2021.
15. SHONKWILER, R.W., MENDIVIL, F. *Explorations in Monte Carlo Methods*. Springer International Publishing, Nova York, p. 243, 2009.
16. SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico Temático: Serviços de Água e Esgoto. Relatório da Secretaria Nacional de Saneamento, Brasília, p. 92, 2022.
17. SOIZE, C. *Stochastic modeling of uncertainties in computational structural dynamics – recent theoretical advances*. *Sound and Vibration*, v.332, n.10, p. 2379–2395, 2013.
18. SOIZE, C. *Uncertainty Quantification: An Accelerated Course with Advanced Applications in Computational Engineering*. *Interdisciplinary Applied Mathematics*, v.47, Springer International Publishing, Switzerland, p. 344, 2017.
19. TROYAN, V., KISELEV, Y. *Statistical Methods of Geophysical Data Processing*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, p. 454, Singapore, 2010.
20. TSUTIYA, M.T. Abastecimento de água: gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento – nível 2, Relatório da Secretaria Nacional de Saneamento, Salvador, p. 139, 2008.
21. UDWADIA, F.E. *Some results on maximum entropy distributions for parameters known to lie in finite intervals*. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, v.31, n.1, p. 103–109, 1989.
22. 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, n.1, p. 1–8, 2017.