

ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE RUÍDO DE VAZAMENTO UTILIZANDO GEOFONE COMO ATUADOR PARA LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTO EM UMA TUBULAÇÃO SUBTERRÂNEA

F. Kroll de Lima, famil88@gmail.com¹

M.J. Brennan, mjbrennan0@btinternet.com¹

F.C.L. de Almeida, fabricio@tupa.unesp.br²

P.C. Ayala, payala@dimmm.com.pe¹

D.H. de Sousa Obata, danielobata@gmail.com¹

A.T. Paschoalini, tabone@dem.feis.unesp.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Ilha Solteira, SP 15385-000, Brasil.

²Departamento de Engenharia de Biossistemas, UNESP, Tupã, SP 17602-496, Brasil.

Resumo: A detecção e localização de vazamentos em tubulações subterrâneas de distribuição de água tem sido um dos maiores problemas enfrentados pelas companhias de distribuição e saneamento. Com o objetivo de reduzir o grande índice de perdas de água, técnicas tem sido desenvolvidas com o intuito de estimar a presença e a localização de vazamentos. Pesquisas comprovam que o método vibro-acústico de correlação-cruzada tem se destacado perante aos demais por apresentar bons resultados na estimativa da localização do vazamento em campo. Essa técnica utiliza a estimativa do atraso (correlação-cruzada) entre os sinais adquiridos em dois lugares distintos de medições (geralmente hidrantes) e a velocidade com que o ruído de vazamento se propaga. Entretanto, existem fatores que acabam influenciando a estimativa de tais parâmetros, tais como as propriedades geométricas e construtivas do material e a dinâmica do sistema de tubulações. Nos últimos anos, a determinação de valores cada vez mais precisos do tempo de atraso tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores no ramo de detecção de vazamentos. Entretanto o valor referente a velocidade de propagação é obtido através de valores tabelados de acordo com o tipo de material e seu comprimento do tubo, todavia, tais valores nem sempre condizem com o real valor da velocidade na seção da tubulação. Uma maneira de estimar a velocidade de propagação é através de uma metodologia baseada na utilização de uma fonte externa de excitação (atuadores), para gerar sinais vibratórios na tubulação através de impactos em um dos pontos de acesso na seção da tubulação em análise. Neste artigo, será mostrado um estudo inédito, do uso de geofones, também conhecidos como “pick-up” de velocidade, como atuadores com o objetivo de determinar a velocidade de propagação do ruído de vazamento ao longo de uma seção da tubulação em uma condição real.

Palavras-chave: detecção de vazamentos, método vibro-acústico de correlação, velocidade de propagação, geofone.

1. INTRODUÇÃO AO PROBLEMA DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

Pesquisas comprovam que uma parte significativa do volume de água disponibilizado pelas concessionárias de distribuição de água é perdida devido a problemas existentes ao longo das tubulações responsáveis por sua distribuição. Segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), estima-se que por dia cerca de 3.5 bilhões de litros de água passam pelas tubulações de distribuição em São Paulo (SP) e o índice de perda de água chega a 30%. Os vazamentos correspondem a 19.5% e as fraudes e roubo de água direto da tubulação equivalem a 10.5% (SABESP, 2017).

Ressalta-se que não existe perda igual a zero, entretanto, existem países que no cenário mundial vem se destacando no combate ao desperdício de água e se tornando referência na administração dos recursos hídricos, como por exemplo o Japão que apresentou os menores percentuais de perda de água, chegando a 2%, (MAISONNAVE, 2015). Estudos sobre a temática, apontam que as técnicas acústicas tem apresentado bons resultados na detecção e localização de vazamentos, sendo assim bastante utilizados por empresas de distribuição e saneamento quando comparadas com as técnicas não acústicas. Pode-se aqui citar dentre as técnicas acústicas, o método de correlação cruzada como uma ferramenta de detecção de vazamentos, sendo este bem aceito por apresentar bons resultados na estimativa da localização de vazamentos em tubulações subterrâneas (GAO, 2004). As técnicas acústicas empregadas para a

localização de vazamentos utilizam a própria vibração gerada pelo vazamento para estimar sua localização. No método de correlação cruzada os sensores vibro-acústicos são instalados em pontos de acesso que delimitam a seção da tubulação, onde existe a suspeita de vazamento, e por meio de uma análise dos sinais medidos pelos sensores é possível estimar sua localização (GAO, 2004). Na Fig. 1 é mostrado um esquema de uma tubulação com os sensores instalados em pontos de acesso, sendo d_1 e d_2 as distâncias do vazamento até o ponto de instalação do sensor 01 e 02 respectivamente, enquanto d corresponde ao comprimento da tubulação entre os dois sensores.

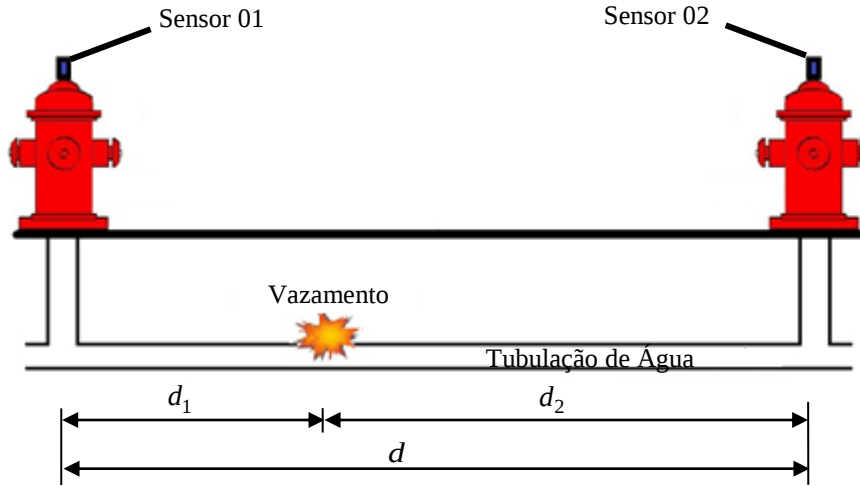


Figura 1. Esquemática de um sistema de tubulação para a realização da estimativa da velocidade de propagação.

Depois da aquisição do ruído gerado pelo vazamento pelos sensores, é realizado um procedimento de análise de sinais conhecido como correlação cruzada, que nada mais é do que uma avaliação da similaridade entre os sinais adquiridos pelos sensores. Quando os sinais são parecidos, então a correlação cruzada é máxima (pico) evidenciando o atraso entre os sinais adquiridos. O resultado obtido através desta ferramenta de análise de sinais fornecerá um valor referente à diferença de tempo na chegada do ruído de vazamento entre os sensores T_0 . Por meio da Eq. (1), é possível então determinar o valor referente à distância do sensor 01 (d_1) até o vazamento:

$$d_1 = \frac{d - cT_0}{2} \quad (1)$$

sendo c a velocidade de propagação do ruído de vazamento, sendo este valor geralmente obtido em tabelas padrões de correlacionadores de sinais, que determinam a velocidade de propagação com base nas características do material do tubo (GAO et al., 2004).

Entretanto, existem fatores que podem influenciar na estimativa do método de correlação cruzada, tais como os efeitos de atenuação do ruído de vazamento causados pelo material de que é feito o tubo e a velocidade com que o ruído se propaga ao longo da tubulação (ALMEIDA, 2015). A velocidade de propagação varia de acordo com as propriedades do material de que é feito o tubo, suas propriedades geométricas e também do tipo de solo onde se encontra a tubulação (BRENNAN, 2017).

Para realizar uma boa estimativa da localização de um vazamento, além da realização de um bom processamento de sinais para a obtenção do tempo de atraso entre os sinais medidos, se faz necessário também a utilização de um valor da velocidade de propagação do ruído o mais próximo do valor real. A utilização de um valor incorreto da velocidade de propagação (vide Eq. (1)), resulta num erro na estimativa da distância do ponto de acesso até o vazamento. Dessa forma, Almeida et. al (2013) propôs um método robusto e simples para a realização da estimativa da velocidade de propagação, baseado na excitação da tubulação por meio de um atuador realizando impactos na tubulação e a determinação do tempo gasto necessário para que esta vibração percorra a seção em análise da tubulação.

Este artigo baseia-se em um estudo inédito realizado ao utilizar um sensor do tipo geofone como um atuador para produzir vibrações através de impactos, com o objetivo de determinar a velocidade de propagação aplicando a metodologia similar proposta por Almeida et. al (2013) numa seção de tubulação localizada em um campo de provas situado em São Paulo (SP).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Em uma determinada seção da tubulação, delimitada por dois pontos de acesso (ponto de acesso 01 e ponto de acesso 02), foram instalados sensores (acelerômetros) e atuadores (geofones) assim como mostrado na Fig. 2. O

objetivo de se utilizar o atuador é excitar a tubulação em um dos pontos de acesso (ponto conhecido) de tal forma que a vibração gerada se propague ao longo da tubulação e seja medida pelo sensor localizado a d metros do ponto onde o atuador está.

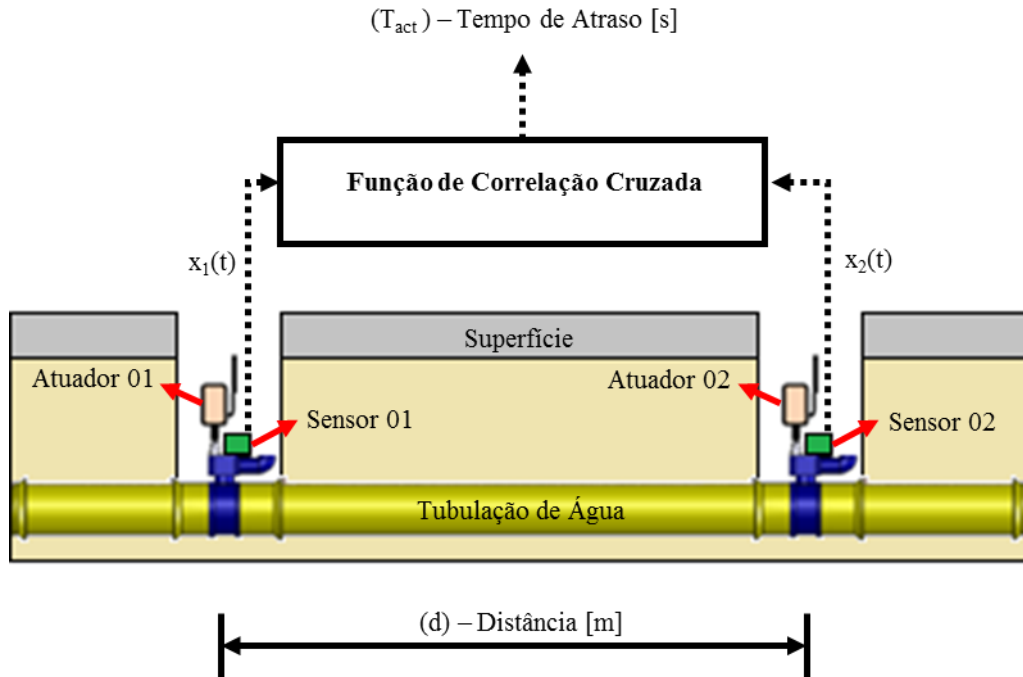


Figura 2. Esquemática de um sistema de tubulação para a realização da estimativa da velocidade de propagação.

Conhecendo-se a distância entre os dois pontos de acesso d e existindo coerência entre os sinais medidos (sensor 01 e 02) a função de correlação-cruzada poderá ser aplicada com o intuito de fornecer um valor correspondente ao tempo total gasto T_{act} que o sinal leva para percorrer a seção da tubulação e tornando assim possível realizar a estimativa da velocidade de propagação através da seguinte equação:

$$c = \frac{d}{T_{act}} \quad (2)$$

Na Figura 3 são mostradas fotografias dos pontos de acesso utilizados no campo de provas onde foram realizadas as medições.

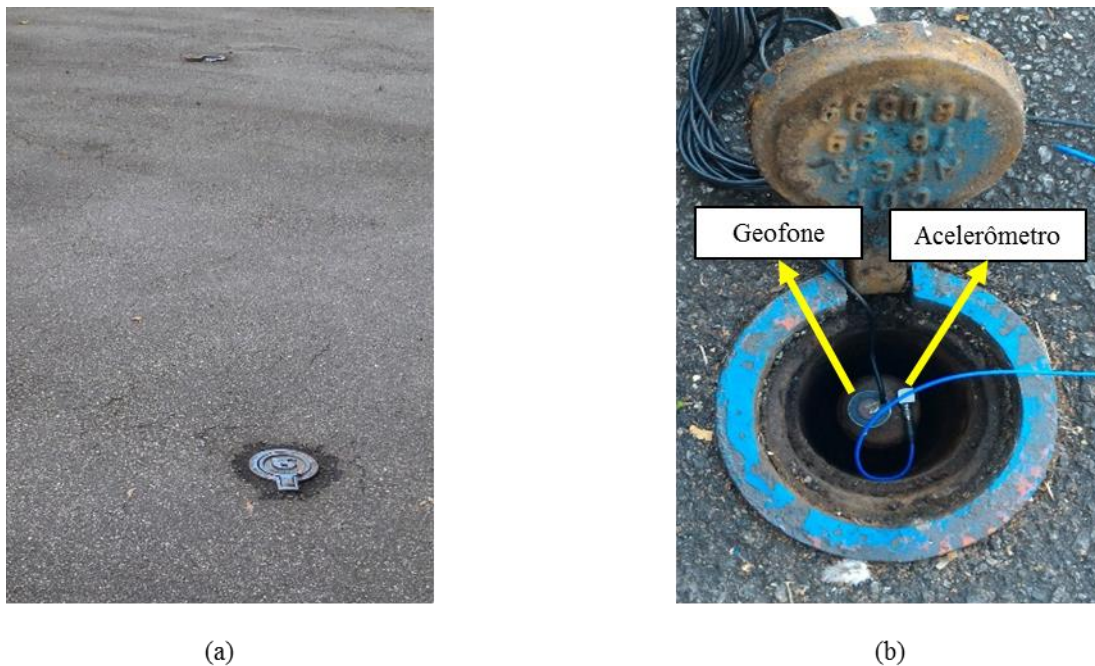


Figura 3. Fotografia do campo de provas. (a) Pontos de acesso de uma seção da tubulação do campo de provas; (b) Ponto de acesso aberto com o geofone e o acelerômetro instalados.

Geofones são sensores passivos analógicos capazes de converter vibração em voltagem. Basicamente, em seu interior existe um bloco de massa magnética, suspenso por molas e rodeado por uma bobina para gerar sinal elétrico. Tal sensor é bastante utilizado para medições de terremotos e detecção de vazamentos em tubulações subterrâneas de água. O motivo da escolha para se utilizar este sensor como atuador deve-se ao fato deste ser facilmente encontrado no mercado, bem como seu valor comercial (cerca de algumas centenas de reais) ser inferior quando comparado com atuadores profissionais (alguns milhares de reais).

Para que um geofone opere de forma inversa, isto é, como um atuador, deve-se aplicar um sinal de excitação no terminal de saída que proporcionará uma vibração causada pelo deslocamento da massa magnética localizada em seu interior, como pode ser observado na representação esquemática mostrada na Fig. 4.

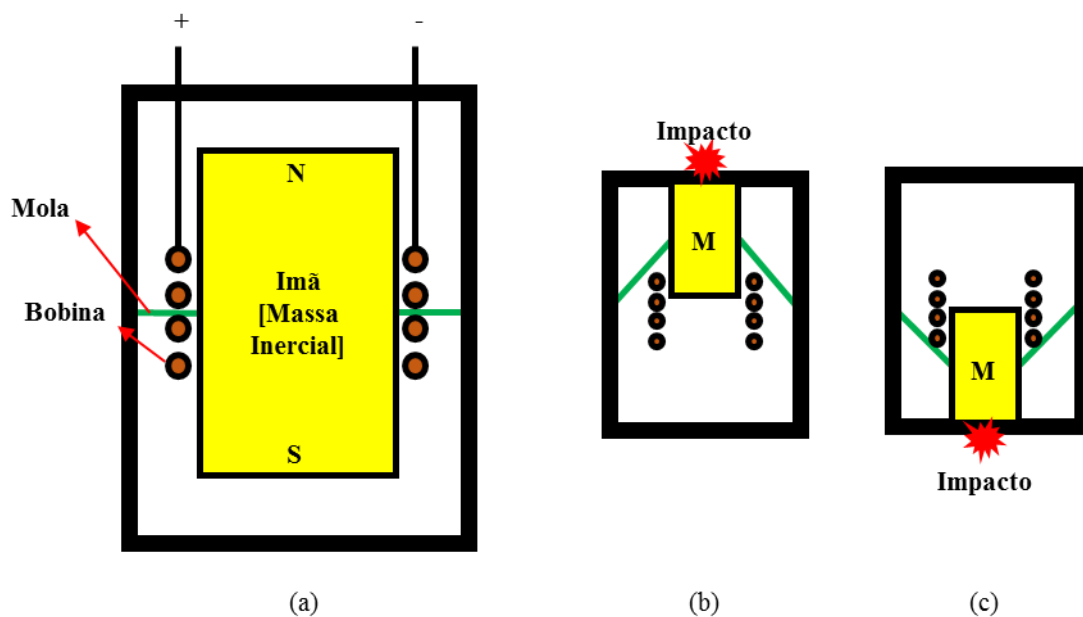


Figura 4. Utilização de um geofone como atuador. (a) Estrutura interna de um geofone; (b) Impacto na parte superior; (c) Impacto na parte inferior.

Testes preliminares realizados em laboratório constataram que para fazer com que o geofone vibre como um “chocalho” é necessária uma voltagem de aproximadamente 18 volts. Com o intuito de reduzir a tensão necessária para

obter tais níveis de vibração, decidiu-se utilizar uma frequência de excitação que coincida com a frequência de ressonância do geofone. Dados obtidos através do catálogo do fabricante do geofone indicaram que o sensor possui uma frequência de ressonância de 10 Hz (que também foi comprovada em laboratório), logo ao utilizar o sinal de excitação com esta frequência, a voltagem necessária para excitar o geofone é menor e sua medida foi aproximadamente de 4 volts.

Dessa forma, para a realização do experimento foi necessário um gerador de sinal configurado para enviar um sinal do tipo senoidal com frequência característica 10 Hz, sendo este enviado para um amplificador para então excitar o geofone.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão discutidos dados relevantes medidos, bem como, calculado a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento em uma condição real, utilizando a técnica descrita anteriormente. Na Figura 5 são mostrados os resultados gráficos obtidos ao analisar uma seção da tubulação de comprimento equivalente a 7 metros um campo de provas. As Figuras 5(a) e 5(b) mostram os sinais medidos pelos sensores (acelerômetros) instalados nos pontos de acesso 01 e 02 respectivamente.

Existem duas maneiras de estimar o tempo de atraso entre dois sinais, a primeira é estimando o gradiente da fase da densidade espectral cruzada que corresponde ao tempo de atraso entre os sinais e a segunda se faz através do cálculo da função de correlação cruzada que apontará o valor do tempo de atraso correspondente ao pico obtido nesta função.

Na Figura 5(d) é mostrada a fase da densidade espectral cruzada entre os sinais medidos e nota-se na faixa de frequência correspondente a 380 a 510 Hz que houve um comportamento linear, sendo então possível determinar o tempo de atraso entre os sinais cujo valor corresponde a aproximadamente 15 milissegundos, e assim a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento foi de 465 m/s.

A Figura 5(c) mostra o gráfico do módulo da densidade espectral cruzada entre os sinais mensurados. Pode-se observar a existência de um pico de concentração de energia e também bons níveis de coerência entre os sinais, vide Figura 5(e) que mostra a coerência entre os dois sinais. Observa-se que a faixa de frequência onde existe a energia e coerência entre os sinais é a mesma que obtêm-se o comportamento linear da fase da densidade espectral cruzada, o que leva a crer que é nesta faixa de frequência que o ruído gerado pelo atuador se propaga ao longo da tubulação subterrânea.

Já a Figura 5(f) é mostrado o resultado da função de correlação-cruzada onde o valor obtido correspondente ao tempo de atraso entre os sinais foi de aproximadamente 15 milissegundos resultando em uma velocidade de propagação de valor igual a aproximadamente 465 m/s. Vale ressaltar que é necessário realizar um procedimento de filtragem dos sinais antes de aplicar a correlação cruzada, de forma a apenas trabalhar com o sinal correspondente à vibração produzida pelo geofone, eliminando qualquer outro tipo de ruído externo e desnecessário. Neste procedimento, utilizou-se um filtro passa-faixa cuja faixa de frequência corresponde a mesma faixa de frequência onde fora obtido um comportamento linear na fase da densidade espectral cruzada que é de 380 a 510 Hz, que condiz com a frequência de interesse onde encontra-se sinais de vazamento.

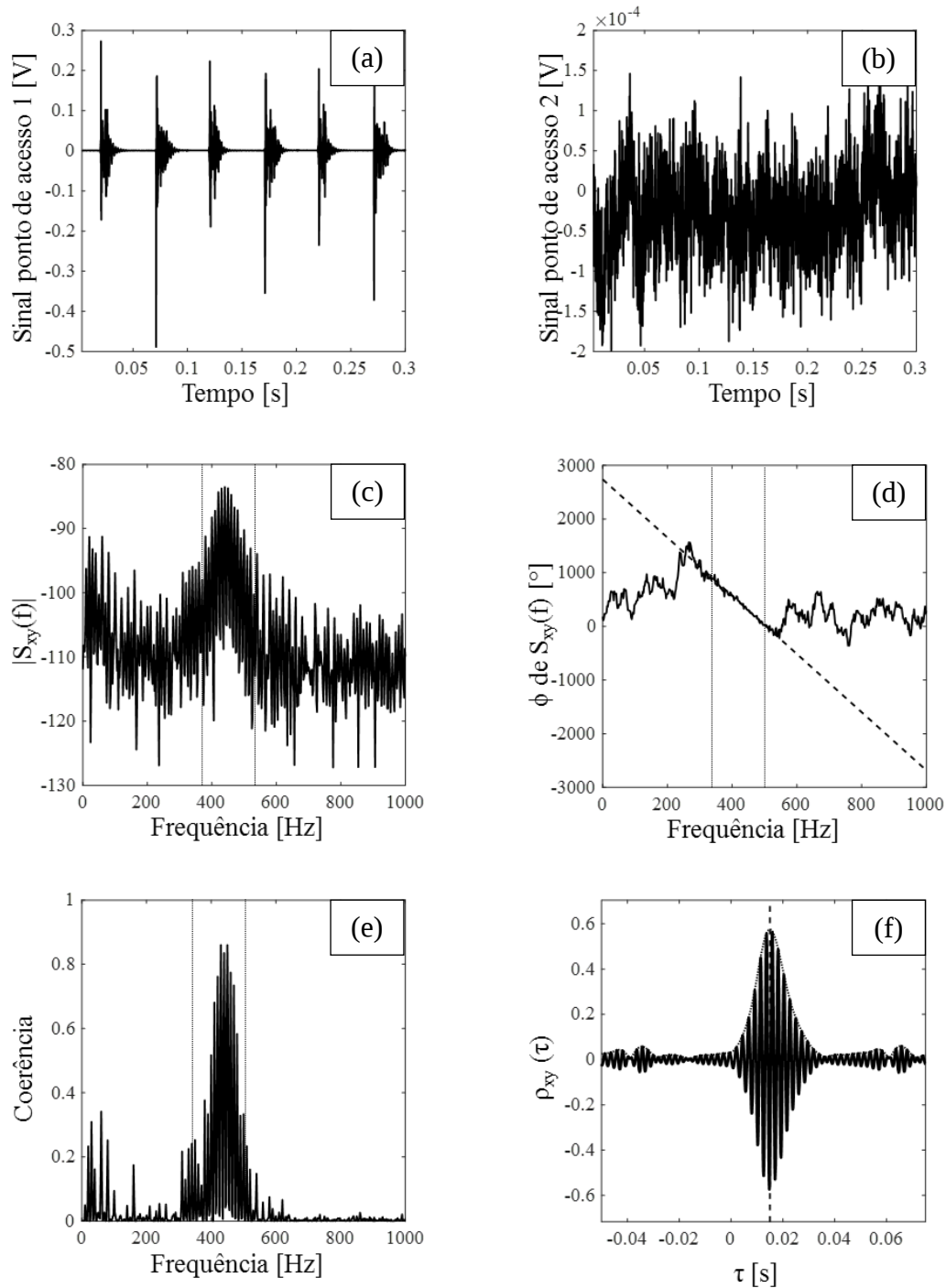


Figura 5. Resultados gráficos obtidos. (a) Sinal no ponto de acesso 01; (b) Sinal no ponto de acesso 02; (c) Módulo da densidade espectral cruzada; (d) Fase da densidade espectral cruzada; (e) Coerência; (f) Função de correlação cruzada.

4. CONCLUSÕES

Sabe-se que a velocidade de propagação varia de acordo com as propriedades geométricas e construtivas da tubulação, bem como o tipo de solo, dessa forma, para obter um valor correspondente ao real valor da velocidade de propagação são necessários realizarem-se procedimentos para estimar o seu valor. Neste artigo é mostrado um estudo realizado ao se utilizar um elemento de baixo custo como atuador, o geofone, para implementar um método capaz de determinar a velocidade de propagação ao longo de uma tubulação subterrânea. O objetivo principal deste estudo é de obter um valor o mais próximo do real e assim possibilitar uma melhor estimativa da localização de vazamento. O resultado encontrado neste estudo foi de aproximadamente 465 m/s, para o campo de prova utilizado, valor diferente do previamente estabelecido em tabelas e utilizado por correlacionadores, onde para as especificações da tubulação em análise apontou um valor correspondente a 480 m/s.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer o suporte financeiro proporcionado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), nº dos Processos 2013/50412-3 e 2016/01733-0.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, F. Improved acoustic methods for leak detection in buried plastic water distribution pipes. 2013, 274 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Southampton, Southampton.
- Almeida, F. C. L.; Brennan, M. J.; Joseph, P. F.; Dray, S.; Whitfield, S.; Paschoalini, A., 2015, "Towards an in-situ measurement of wave velocity in buried plastic water distribution pipes for the purposes of leak location.", Journal of Sound and Vibration, Londres, Vol. 359, pp. 40-55.
- Brennan, M.J.; Almeida, F. C. L.; Kroll de Lima, F.; Ayala, P. C.; Paschoalini, A. T., 2016, "Measurement of the Speed of Leak Noise Propagation in Buried Water Pipes: Challenges and Difficulties." In: XVII DINAME, 2016, São Sebastião. Proceedings of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, Vol. 1. pp. 85-92.
- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, "Combate as Perdas", São Paulo. Disponível em: < <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=499>>. Acesso em: 01 set. 2017.
- Gao, Y.; Brennan, M. J.; Joseph, P. F.; Muggleton, J. M.; Hunaidi, O., 2004, "A model of the correlation function of leak noise in-buried plastic pipes." Journal of Sound and Vibration, Londres, Vol. 277, pp. 133-148.
- Maisonnave, F., 2015, "Tóquio 'aprende a lição' e hoje perde só 2% da água.", Folha de S.Paulo, São Paulo. Disponível em: < <http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/03/1603095-toquio-aprende-a-licao-e-hoje-perde-so-2-da-agua.shtml>>. Acesso em: 01 set. 2017.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ESTIMATING THE VELOCITY OF LEAKAGE NOISE PROPAGATION USING GEOPHONE AS AN ACTUATOR FOR LEAK DETECTION IN AN UNDERGROUND WATER PIPES

F. Kroll de Lima, famil88@gmail.com¹
M.J. Brennan, mjbrennan0@btinternet.com¹
F.C.L. de Almeida, fabricao@tupa.unesp.br²
P.C. Ayala, payala@dimmm.com.pe¹
D.H. de Sousa Obata, danielobata@gmail.com¹
A.T. Paschoalini, tabone@dem.feis.unesp.br¹

¹Department of Mechanical Engineering, UNESP, Ilha Solteira, SP 15385-000, Brazil.

²Department of Biosystems Engineering, UNESP, Tupã, SP 17602-496, Brazil.

Abstract: The detection and location of leaks in underground water distribution pipelines has been one of the major problems faced by water companies around the world. In order to reduce the high rate of water loss, techniques have been developed to estimate the presence and location of leaks. Research has shown that the vibro-acoustic cross-correlation method has been outstanding among others techniques because it presents good results in the estimation of the location of leaks in buried pipes. This technique uses the estimate of the time delay (cross-correlation) between the signals acquired at two different measurement positions (usually hydrants) and the speed at which the leakage noise propagates. However, there are factors that affect the estimation of such parameters, such as the geometric and constructive properties of the material and the dynamics of the piping system. In recent years, the determination of accurate values of the time delay estimation has been focused by many researchers in the field of leak detection. Although the value of propagation velocity is obtained by standard tables estimated according to the type of material and pipe geometry, however, such estimates do not always correspond to the actual velocity in the pipe section. One way of estimating this velocity is through a methodology based on the use of an external source of excitation (actuators) to generate vibratory signals in the buried pipe by using impacts as an external source at one of the access point. In this article, it will be introduced an new study of the use of geophones, which are made to be used as sensors as actuators with the objective of estimating the leak noise velocity along a section of the pipe in an actual situation.

Keywords: leak detection, cross-correlation method, wavespeed estimation, geophone.