



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FÁBIO KROLL DE LIMA

**MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO
RUÍDO DE VAZAMENTO EM UM SISTEMA DE
TUBULAÇÃO SUBTERRÂNEA DE ÁGUA**

Ilha Solteira
2019

FÁBIO KROLL DE LIMA

**MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO
RUÍDO DE VAZAMENTO EM UM SISTEMA DE
TUBULAÇÃO SUBTERRÂNEA DE ÁGUA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Michael John Brennan

Orientador

Prof. Dr. Fabricio César Lobato de Almeida

Co-orientador

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L732m Lima, Fábio Kroll de.
Medição da velocidade de propagação do ruído de vazamento em um sistema de tubulação subterrânea de água / Fábio Kroll de Lima. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
124 f. : il.

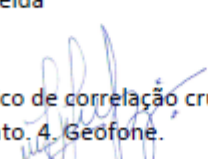
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2019

Orientador: Michael John Brennan

Co-orientador: Fabricio César Lobato de Almeida

Inclui bibliografia

1. Detecção de vazamento. 2. Método acústico de correlação cruzada. 3. Velocidade de propagação do ruído de vazamento. 4. Geofone.


João Josué Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS VIBRO-ACÚSTICOS EM DUTOS SUBTERRÂNEOS DE SÃO PAULO E O DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE SUA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

AUTOR: FÁBIO KROLL DE LIMA

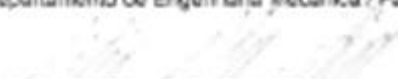
ORIENTADOR: MICHAEL JOHN BRENNAN

COORIENTADOR: FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA

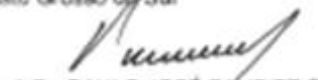
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MICHAEL JOHN BRENNAN
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. AILTON AKIRA SHINODA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MARCO HIROSHI NAKA
Pró-reitoria de Pesquisa, Inovação e Pós-graduação / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul


Prof. Dr. PAULO JOSÉ PAUPITZ GONÇALVES
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Ilha Solteira, 27 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter guiado meus passos e zelado por mim durante toda a minha vida.

Agradeço aos meus pais, Heitor e Nelci. Por tudo que fizeram por mim, por todo sacrifício, esforço e dedicação para que eu me tornasse quem eu sou hoje. Gostaria que eles soubessem o quanto eu os amo e que se eu cheguei até aqui, foi graças a eles.

Deixo aqui também um agradecimento especial a uma pessoa muito importante para mim, minha namorada Laísa Milena, agradeço por todo amor, incentivo, cuidado, paciência e carinho que me proporcionou ao longo de todo o tempo que estivemos juntos.

Aos meus orientadores, Professor Michael John Brennan e Professor Fabrício César Lobato de Almeida, por toda orientação e pela oportunidade de trabalharmos em conjunto para o desenvolvimento deste projeto.

Aos meus colegas de projeto Pedro Ayalla, Daniel Obata, Oscar Scussel e Maurício Iwanaga, pelo companheirismo e amizade.

Aos professores do departamento de engenharia mecânica, assim como todos os técnicos e funcionários da FEIS-UNESP.

Agradeço SABESP pela oportunidade de realização deste projeto.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo número 2016/01733-0, pelo apoio financeiro e institucional.

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não somente na vitória. ”

Mahatma Gandhi

RESUMO

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. Com o objetivo de reduzir os prejuízos causados por vazamentos, técnicas tem sido desenvolvidas com o intuito de estimar a presença e a localização de vazamentos. O método vibro-acústico de correlação-cruzada tem se destacado perante aos demais métodos 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), a distância entre os pontos de medição e a velocidade com que o ruído de vazamento se propaga. 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. Esta tese de doutorado tem três objetivos principais. O primeiro visa caracterizar sinais vibro-acústicos de vazamento em uma seção de tubulação existente em um campo de provas. O segundo objetivo consiste em investigar a viabilidade de medir a velocidade de propagação do ruído de vazamento *in-situ*. E o terceiro objetivo visa realizar uma investigação sobre o uso de um geofone como atuador para medir a velocidade de propagação da onda em uma seção do campo de provas. Um protótipo de um dispositivo sensor-atuador foi desenvolvido e testado em laboratório e em campo, com intuito incorporar este dispositivo em um novo protótipo de correlacionador acústico.

Palavras-chave: Detecção de vazamento. Método acústico de correlação cruzada. Velocidade de propagação do ruído de vazamento. Geofone.

ABSTRACT

Research has shown that a significant part of the volume of water provided by water distribution utilities is lost due to problems existing along the pipes responsible for their distribution. In order to reduce the damage caused by leaks, techniques have been developed with the purpose of estimating the presence and location of leaks. The vibro-acoustic cross-correlation method has been outstanding in relation to the others methods because it presents good results in the estimation of the location of the field leakage. This technique uses the estimate of the time delay (cross-correlation) between the signals acquired at two different places of measurements (usually hydrants), the distance between the measuring points and the speed at which the leakage noise propagates. The value for the wavespeed is obtained by tabulated values according to the type of material and its length of the pipe, however, these values do not always correspond to the actual velocity value in the pipe section. This doctoral thesis has three main objectives. The first aims to characterize vibro-acoustic leakage signals in an existing pipe section in a testing field. The second objective is to investigate the feasibility of measuring the propagation velocity of in-situ leakage noise. The third objective is to conduct an investigation into the use of a geophone as an actuator to measure the wavespeed in a section of the field of evidence. A prototype of a sensor-actuator device was developed and tested in the laboratory and in the field, in order to incorporate this device in a new acoustic correlator prototype.

Keywords: Leak detection. Acoustic cross-correlation method. Velocity of leakage noise propagation. Geophone.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nome
a	Raio do tubo
c	Velocidade de propagação do ruído de vazamento
c_w	Velocidade de onda do fluido-livre
d	Distância entre os sensores
d_1	Distância entre o vazamento até o ponto de acesso 01
d_2	Distância entre o vazamento até o ponto de acesso 02
g	Filtro passa faixa no domínio do tempo
h	Espessura da parede do tubo
i	Número complexo
k	Número de onda
k_w	Número de onda de um fluido livre
n	Números modais circunferenciais
s	Ondas associadas
t	Tempo
B_w	Módulo de Bulk da água
E	Módulo de Young do material do tubo
$E[\]$	Esperança Matemática

$F\{ \}$	Transformada de Fourier
$F^{-1}\{ \}$	Transformada Inversa de Fourier
F_a	Frequência de amostragem
G	Filtro passa faixa no domínio da frequência
G_s	Módulo de cisalhamento do solo
H	Função resposta em frequência
K_w	Rigidez dinâmica da água
K_t	Rigidez dinâmica do tubo
K_s	Rigidez dinâmica do solo
$R_{x_1x_2}$	Correlação cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$
$R_{x_1x_1}$	Auto Correlação do sinal $x_1(t)$
$R_{x_2x_2}$	Auto Correlação do sinal $x_2(t)$
$S_{x_1x_2}$	Densidade Espectral Cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$
S_{xx}	Auto Densidade Espectral constante do ruído de vazamento
T	Tempo de aquisição
T_0	Diferença de tempo na chegada do ruído de vazamento entre os sensores
T_{on}	Tempo de contato do impacto do atuador
β	Atenuação da parede do tubo

δ	Função delta de <i>Dirac</i>
η	Fator de perda da parede do tubo
$\rho_{x_1x_2}$	Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$
τ	Vetor do tempo de atraso entre os sinais
ψ	Propriedades da tubulação no domínio do tempo
ω	Frequência
ω_0	Frequência de corte inferior do filtro passa faixa
ω_1	Frequência de corte superior do filtro passa faixa
Ψ	Propriedades da tubulação no domínio da frequência

Sumário

CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Motivação	11
1.2 Técnicas para detecção de vazamentos	13
1.3 Revisão da Literatura	16
1.4 Escopo da Pesquisa.....	17
1.5 Proposta de Construção do Protótipo.....	18
1.6 Objetivos.....	19
1.7 Contribuições	20
1.8 Tópicos da Tese	20
CAPÍTULO 02 – VISÃO GERAL SOBRE MÉTODO DE CORRELAÇÃO PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTO	22
2.1 Introdução	22
2.2 Técnica da Correlação Cruzada na Detecção De Vazamentos	23
2.3 Modelo Teórico de Vazamentos em Dutos Subterrâneos	25
2.4 Correlação Cruzada em Problemas de Detecção de Vazamentos.....	31
2.5 Método para Medição da Velocidade de Propagação do Ruído de Vazamento	36
2.5.1 <i>Efeito da estimativa da velocidade na localização do vazamento.....</i>	<i>38</i>
2.6 Fatores que Influenciam o Formato da Função de Correlação Cruzada na Detecção de Vazamentos.....	41
2.7 Conclusão.....	44
CAPÍTULO 03 - INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO COMO FONTE DE EXCITAÇÃO EXTERNA PARA ESTIMAR A VELOCIDADE DE RUÍDO DE VAZAMENTO	45
3.1 Introdução	45
3.2 Estudo do Impacto Produzido por um Geofone	46
3.2.1 <i>Geofone operando como atuador</i>	<i>46</i>
3.2.2 <i>Procedimento Experimental</i>	<i>48</i>
3.2.3 <i>Resultados</i>	<i>50</i>
3.2.4 <i>Discussão dos Resultados</i>	<i>54</i>
3.3 Simulação do Impacto Produzido pelo Geofone no Modelo do Tubo	55
3.4 Conclusão.....	62
CAPÍTULO 04 - DESCRIÇÃO DO CAMPO DE PROVA E EXPERIMENTOS REALIZADOS	64

4.1	Introdução	64
4.2	Descrição do Campo de Prova e Caracterização	64
4.3	Procedimento Experimental Utilizado na Investigação da Estimativa da Velocidade do Ruído de Vazamento	71
4.3.1	<i>Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado um vazamento localizado fora da seção da tubulação como fonte excitadora</i>	<i>74</i>
4.3.2	<i>Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado um atuador comercial para impactar a tubulação</i>	<i>76</i>
4.3.3	<i>Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado um geofone para impactar a tubulação</i>	<i>79</i>
4.4	Discussão dos Resultados	82
4.4.1	<i>Estimativa da velocidade de propagação</i>	<i>82</i>
4.4.2	<i>Estimativa da localização do vazamento</i>	<i>84</i>
4.5	Conclusão.....	85
CAPÍTULO 05 - DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO DO CORRELACIONADOR ACÚSTICO		86
5.1	Introdução	86
5.2	Desenvolvimento do Protótipo	86
5.2.1	<i>Desenvolvimento do software</i>	<i>89</i>
5.2.2	<i>Desenvolvimento do Hardware</i>	<i>94</i>
5.2.3	<i>Desenvolvimento do Invólucro (Atuador\Sensor)</i>	<i>96</i>
5.3	Validação do Invólucro na Estimativa da Velocidade de Propagação	97
5.3.1	<i>Procedimento experimental</i>	<i>97</i>
5.3.2	<i>Resultados</i>	<i>101</i>
5.3.3	<i>Discussão dos resultados</i>	<i>109</i>
5.4	Conclusão.....	110
CAPÍTULO 06 - CONCLUSÕES		111
6.1	Tópicos da Tese	111
6.2	Principais Conclusões	112
6.3	Recomendações para Trabalhos Futuros.....	114
REFERÊNCIAS.....		116
APÊNDICE – DESENHO DO INVÓLUCRO (CASE).....		120

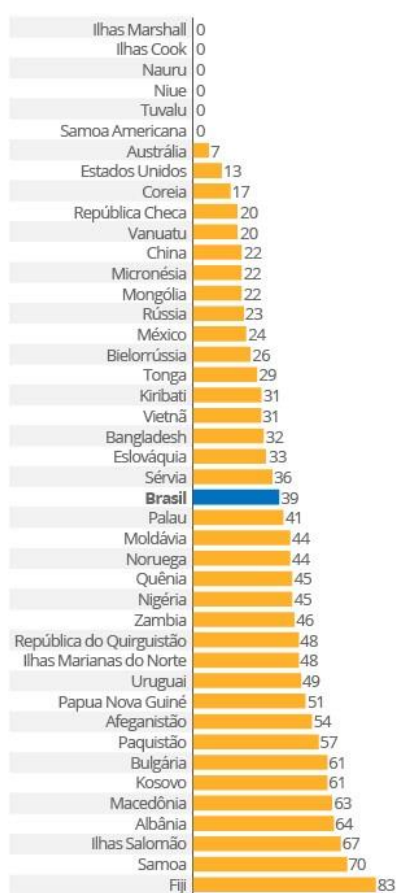
CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Água é um recurso essencial para a vida, saúde e o desenvolvimento econômico, em qualquer região do mundo. Porém, com o crescimento urbano, mudanças climáticas e esgotamento de fontes hídricas, torna-se cada vez mais necessária a conscientização para preservar e evitar o desperdício da água.

Segundo o IBNET (*International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities*), no ano de 2011, o Brasil ocupou a 20ª colocação em um ranking com 43 países, com um índice de 39% de perda de água tratada, ficando atrás de países como o Vietnã (31%), México (24%), Rússia (23%) e China (22%). Segundo esse levantamento, os países com menores índices foram os Estados Unidos (13%), Austrália (7%) e a Coreia (17%), como pode ser visto no infográfico apontado na Figura 1.1 (TREVIZAN, 2015).

Figura 1.1- Índice de perda de água tratada por país.



Fonte: “Brasil fica na 20ª posição em ranking internacional de perda de água.” - Reportagem de Karina Trevizan para G1 (30 de março de 2015).

De acordo com um levantamento realizado pelo SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento), no ano de 2013, o Brasil perdeu cerca de 37% de água tratada. Este número representa aproximadamente 5.8 trilhões de litros de água. Tal montante poderia ser suficiente para abastecer a cidade de São Paulo (SP) por aproximadamente sete anos e meio. (TREVIZAN, 2015).

Dados obtidos no ano de 2017 pela Agência Nacional de Águas (ANA), revelam que o país não apresentou melhoria na redução da perda de água, uma vez que o índice de perda de água ficou em torno de 38 %. Na Figura 1.2 é mostrado um gráfico onde são apresentados os índices de perda de água por estado, é possível observar que o estado do Amapá apresenta o maior índice (70,49%) enquanto o estado de Goiás apresentou menor índice (30,23%) (RIBEIRO, 2018).

Figura 1.2 - Índice de perda de água por estado.



Fonte: “Brasil joga pelo ralo 38% da água boa.” - Reportagem de Ana Paula Ribeiro para O Globo (24 de março de 2018)

Perdas em sistemas de distribuição de água correspondem ao volume de água não contabilizados e podem ser classificados em perdas reais ou perdas aparentes. Perdas aparentes são as perdas não físicas de água, onde existe incoerência na água consumida, mas não

propriamente mensurada, podendo existir devido ao consumo não autorizado, imprecisão no medidor de água do cliente ou até mesmo erros de manipulação dos dados por parte da concessionária fornecedora de água. Enquanto as perdas reais são oriundas de vazamentos no sistema de distribuição, são as perdas físicas de água. Estas perdas acabam inflacionando os custos da produção de água e a exploração desnecessária do recurso hídrico natural, uma vez que a água é extraída, tratada, porém não chega ao consumidor (AWWA, 2009).

1.2 Técnicas para detecção de vazamentos

Com o objetivo de evitar prejuízos causados por vazamentos, podendo este ser de recursos naturais como financeiros, empresas e centros de pesquisas estão focando no desenvolvimento de métodos capazes de detectar vazamentos com precisão e agilidade. Dentre esses métodos, existem os métodos acústicos e os métodos não acústicos (FUCHS, 1991).

Algumas das técnicas não-acústicas mais comuns utilizadas são: termografia infravermelha, gás-tracejante e o radar penetrador de solo. A câmera de termografia consegue captar a radiação infravermelha emitida por um objeto, dessa forma, é possível detectar contrastes térmicos na superfície do pavimento devido à presença de vazamentos de água. A vantagem da utilização desta metodologia está associada ao fato de que grandes distâncias de tubulação podem ser avaliadas em menos tempo, quando comparado a outros métodos de detecção de vazamento. Entretanto, tal método apresenta como desvantagens o fato do equipamento ser relativamente caro, exige experiência por parte do operador para sua utilização, não apresenta boa precisão e está limitado as condições climáticas (FAHMY *et al.*, 2009; HUNAIDI *et al.*, 2006).

Já para a aplicação do gás-tracejante, drena-se a água da seção da tubulação onde existe a suspeita de vazamento, em seguida, um gás não tóxico e mais leve que o ar (Hélio ou Hidrogênio) é injetado no segmento da tubulação. O gás irá escapar através da abertura causada pelo vazamento, e por ser mais leve que o ar, permeando até a superfície, atravessando o solo. O vazamento por onde sai o gás é então detectado com o auxílio de um detector de gás que irá escanear a superfície do solo seguindo o trajeto da tubulação. Algumas das desvantagens da utilização deste método é o alto custo do processo, a demanda de tempo exigida, a limitação quanto a profundidade da tubulação e o fator de não apresentar boa precisão (HUNAIDI *et al.*, 2006).

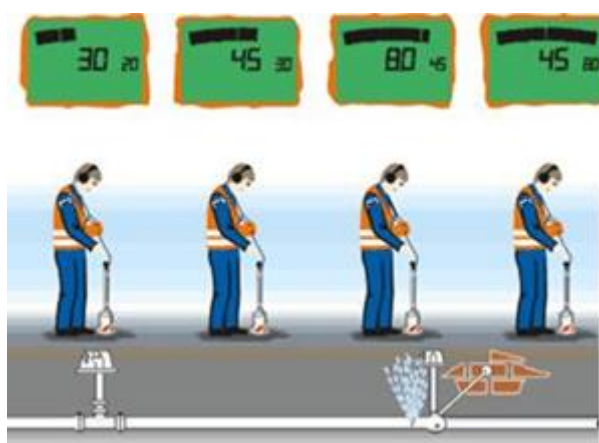
O radar penetrador de solo pode ser utilizado na localização de vazamentos em tubulações subterrâneas de água, ora detectando espaços vazios no solo ao redor do tubo

(gerados devido à presença de vazamento), ora detectando seções das tubulações que aparentem estar enterradas mais fundas do que realmente estão. Esse método se baseia na emissão e reflexão de ondas no solo, fazendo uso do tempo de atraso existente entre a onda transmitida e a onda refletida, assim possibilitando determinar a profundidade do objeto refletido. Ao realizar uma varredura na superfície onde está enterrada o tubo, na presença de um vazamento, uma imagem é gerada no radar originada através das alterações dielétricas do solo sob a presença de água. Uma das principais desvantagens deste método é a difícil interpretação dos dados adquiridos (HUNAIDI *et al.*, 2006).

As técnicas acústicas utilizam a resposta vibro-acústica gerada pela presença do vazamento em tubulações para detectar sua presença e estimar sua localização. Algumas das técnicas acústicas mais usualmente utilizadas são: geofone, haste de escuta e o correlacionador (método de correlação).

O geofone, mostrado na Figura 1.3, é um instrumento de alta sensibilidade dotado de um sensor que capta o som produzido pelo vazamento. Os componentes deste equipamento são: amplificador, sensor e fones de ouvido. É bastante utilizado em campo por ser um equipamento de fácil manuseio, de baixo custo, porém tem como limitação o fato da necessidade de percorrer todo o trajeto da tubulação para determinar a posição do vazamento, estão suscetíveis a interferências de ruídos de fundo e o sucesso da técnica também depende da experiência do usuário (HUNAIDI *et al.*, 2006).

Figura 1.3- Ilustração da localização de vazamento utilizando geofone.



Fonte: <https://sanesoluti.com.br/wp-content/uploads/2015/07/Geofone-Digital-Display.png>

A haste de escuta, mostrada na Figura 1.4, é um instrumento menos sensível que o geofone, e nada mais é do que uma haste de metal com comprimento de aproximadamente 1,0

a 1,5 metros com uma escuta em uma das pontas. Ela possui basicamente as mesmas desvantagens que o geofone (HUNAIDI *et al.*, 2006).

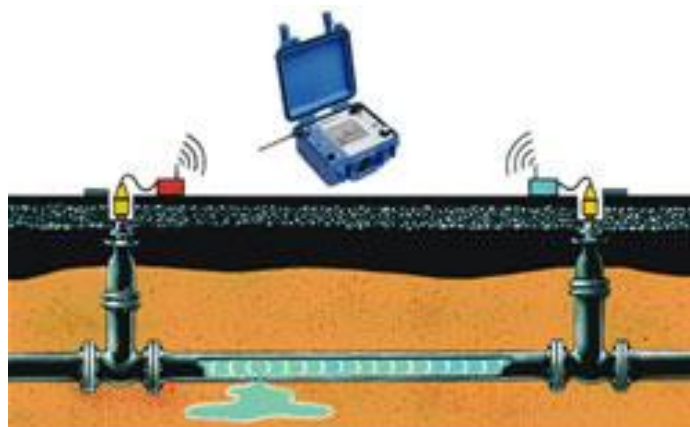
Figura 1.4- Utilização da haste de escuta para a detecção de vazamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O correlacionador, mostrado na Figura 1.5, possui o funcionamento baseado na metodologia investigada nesse trabalho, é um dos equipamentos mais “sofisticados” utilizado para estimar a localização de vazamentos em dutos enterrados. Essa metodologia se baseia na utilização de dois sensores, instalados estrategicamente na tubulação, em pontos opostos ao local onde existe a suspeita de vazamento. A vibração da tubulação, provocada pela presença de um vazamento, é medida pelos sensores e então enviados a um dispositivo eletrônico, que realizará o cálculo do tempo de atraso existente entre os sinais e por meio deste atraso, é possível determinar a localização do vazamento (HUNAIDI *et al.*, 2006).

Figura 1.5- Correlacionador acústico para detecção de vazamentos.



Fonte: http://www.sondeq.com.br/imagens/produtos/controle_correl_03.jpg

A Tabela 1.1 mostra de forma sintetizada, outras técnicas conhecidas e também utilizadas para a detecção de vazamentos.

Tabela 1.1 – Métodos utilizados na detecção de vazamento em tubulações subterrâneas.

Método	Aplicação	Limitações
Sensor no interior da Tubulação	Sensor transita dentro da tubulação e detecta o vazamento internamente (BEN-MANSOUR; HABIB, 2012).	Alto custo;
Sistema Sahara	Sensor acústico é conectado a um cabo que transita dentro da tubulação e detecta a presença de vazamento. Uma vez que o sensor localiza um vazamento, um sinal pré-definido usado para localizar a posição é emitido e utilizando um equipamento de rastreamento sobre a superfície, é possível localizar a fissura na tubulação (BEN-MANSOUR; HABIB, 2012).	- Alto custo; - Utilizado em tubulações não-metálicas de grande diâmetro.
<i>Smart Ball</i>	Uma bola, com um circuito eletrônico em seu interior, emite pulsos elétricos utilizados para detectar sua posição em receptores fixados na tubulação quando a trinca for localizada (BEN-MANSOUR; HABIB, 2012).	- Alto custo; - Utilizado em tubulações de até 300 mm de diâmetro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

1.3 Revisão da Literatura

A presença de vazamento em uma tubulação gera vibração que se propaga ao longo da extensão do tubo. Estudos sobre a teoria envolvida na propagação desta vibração, tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores há pelo menos 70 anos, (SCUSSEL *et al.*, 2019).

A propagação de ondas em tubulações preenchidas por fluido está relacionada a padrões modais de duas dimensões, compostas por números modais circunferenciais n e ondas associadas s relacionadas para cada modo, teoricamente, existem infinitas ondas s para cada modo n . Muggleton *et al.* (2004) investigou teoricamente e experimentalmente a física envolvida na propagação do ruído de vazamento e observou que a onda responsável por transmitir a energia do ruído de vazamento é predominantemente transmitida, em frequências abaixo da frequência do anel, através da onda *fluid-borne* ($n=0$ e $s=1$), onde existe um forte interação entre a água e a parede do tubo. Informações quanto a velocidade de propagação e a atenuação dessa onda, podem ser obtidos através da parte real e a parte imaginária, respectivamente, do número de onda desta onda.

Pinnington e Briscoe (1994) realizaram um estudo para o desenvolvimento de um sensor para medição de ondas axissimétricas e desenvolveram um equacionamento para representar o movimento axissimétrico da onda em uma tubulação preenchida por fluido. Dando continuidade, Gao *et al.* (2004) utilizou esta modelagem para propor um modelo que buscasse representar o comportamento de um tubo, entretanto, esse modelo não considera os efeitos do solo.

Brennan *et al.* (2018) investigou os efeitos do solo na propagação do ruído de vazamento e concluiu que existe influência do tipo de solo na velocidade de propagação e na atenuação desta onda conforme se propaga ao longo da tubulação. Dessa forma, propôs uma reformulação da modelagem proposta por Gao *et al.* (2004), inserindo propriedades do solo que delimita a tubulação. Assim, conclui-se que para uma boa estimativa da localização do vazamento, utilizando o método de correlação cruzada (metodologia utilizada neste trabalho) além de uma estimativa precisa do tempo de atraso entre os ruídos de vazamento, também é necessário um valor coerente estimativa da velocidade de propagação com que o ruído de vazamento se propaga ao longo da tubulação. Uma vez que, correlacionadores comerciais encontrados no mercado fazem uso de valores tabelados que nem sempre condizem com o real valor da velocidade na seção da tubulação (BRENNAN *et al.*, 2018).

Como mencionado anteriormente, a velocidade de propagação do ruído de vazamento pode ser obtida através da parte real do número de onda, entretanto, a metodologia proposta por Muggleton *et al.* (2004) para obter experimentalmente o número de onda e assim determinar o valor da velocidade de propagação é de difícil aplicação em situações práticas. Dessa forma, Almeida *et al.* (2017), propôs uma metodologia para estimar experimentalmente a velocidade de propagação em tubulações plásticas. Tal metodologia consiste em excitar a tubulação com um atuador eletromecânico em um dos pontos de acesso, onde estão localizados os sensores e determinar o tempo gasto que a onda leva para percorrer a distância entre os pontos de acesso. A partir dos valores da distância entre os pontos de acesso e o tempo gasto para a onda percorrer tal distância, torna-se possível estimar a velocidade de propagação do ruído de vazamento.

1.4 Escopo da Pesquisa

Esta pesquisa de doutorado faz parte de um projeto PITE (Programa Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica) uma parceria entre FAPESP/SABESP, cujo número de processo é 2013/50412-3, que visa o desenvolvimento de um correlacionador acústico de baixo custo, a ser desenvolvido no país e que apresentará características inovadoras na área de

detecção de vazamentos.

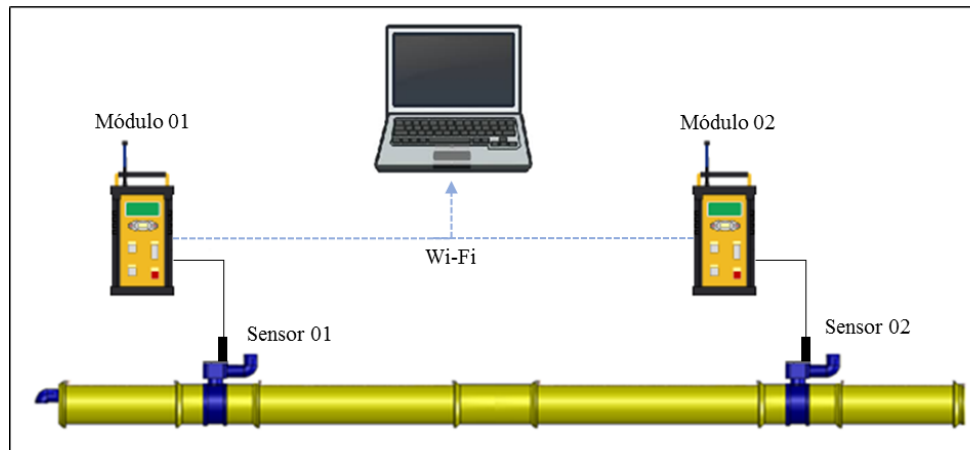
Um dos maiores problemas existentes nos correlacionadores usados atualmente no Brasil são: o valor do equipamento e a falta de precisão na estimativa da velocidade com que o ruído de vazamento se propaga, pois, esta é obtida através do uso de tabelas comerciais padrões, o que significa uma diferença considerável entre o valor estimado e o valor referente à localização do vazamento. Outro aspecto que vale ser ressaltado é o baixo nível de escolaridade por parte dos operadores do correlacionador. Desta forma o equipamento além de realizar a estimativa da velocidade de propagação deve também possuir uma interface simples.

Portanto, de maneira geral, esse projeto PITE, através da investigação, por meio de revisão bibliográfica, simulações computacionais, experimentos em laboratório e em campo, tem como objetivo principal o desenvolvimento de um equipamento capaz de localizar vazamentos com boa precisão utilizando processamento de sinais efetivos (*software*) e componentes de baixo custo (*hardware*). Entretanto, essa tese de doutorado visa apresentar uma investigação sistemática de ferramentas que possam ser utilizadas em campo para estimar a velocidade com que o ruído de vazamento se propaga ao longo da tubulação enterrada, diminuindo assim, o erro envolvido em sua localização. Essa metodologia se inclui em uma das melhorias apresentadas no correlacionador de sinais a ser desenvolvido no projeto PITE.

1.5 Proposta de Construção do Protótipo

Esta pesquisa de doutorado faz parte de um dos pontos do projeto PITE mencionado anteriormente, cujo número do processo é 2013/50412-3, que consiste numa parceria entre UNESP/SABESP/FAPESP, com o objetivo de desenvolver um correlacionador vibro-acústico de baixo custo que atenda às necessidades da SABESP em termos de detecção de vazamento. Portanto, o correlacionador precisa ser efetivo na detecção de vazamento com boa precisão, uma interface gráfica amigável e de fácil manuseio. Com o desenvolvimento de uma programação robusta para análise e processamento de sinais, e utilizando componentes eletrônicos encontrados no mercado e de baixo-custo. Na Figura 1.6, é mostrada uma esquemática do protótipo do correlacionador. Ressalta-se, entretanto, que o sistema desenvolvido é detalhado no capítulo 5.

Figura 1.6- Esquemática do protótipo do correlacionador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, o operador deve instalar dois sensores (acelerômetros) nos pontos de acesso que delimitam a seção da tubulação em análise, onde exista a suspeita de vazamento. Em seguida, o usuário fornecerá ao *software* (programa desenvolvido) os parâmetros da tubulação, tais como a distância entre os pontos de acesso, dimensões e material do tubo e o tipo de solo onde o tubo está enterrado. Após esse procedimento, o operador dará a ordem, através deste mesmo *software*, para o início da aquisição dos ruídos de vazamento. Dois dispositivos eletrônicos conectados aos sensores receberão tal comando, via Wi-Fi, e iniciarão o procedimento de captura dos sinais medidos pelos acelerômetros. Após a aquisição e a análise desses dados o *software* então, calcula a distância de um dos pontos de acesso até o vazamento.

1.6 Objetivos

Os objetivos desta tese de doutorado são:

- Caracterizar sinais vibro-acústicos de vazamento utilizando uma seção do campo de prova da SABESP;
- Investigar o uso do geofone, que é um transdutor, como atuador para excitar a tubulação subterrânea de água para em pontos conhecidos, visando o cálculo da estimativa da velocidade de propagação da onda;
- Desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo estimado da velocidade de propagação do ruído de vazamento na tubulação.

1.7 Contribuições

As contribuições desta tese de doutorado são:

- Determinar as características vibro-acústicas de uma tubulação subterrânea de água no campo de provas da SABESP em São Paulo (SP);
- Demonstrar que o geofone pode ser utilizado, em modo reverso, como um atuador para medir a velocidade da onda em uma tubulação subterrânea de água;
- Participação no desenvolvimento de um correlacionador acústico utilizando componentes de baixo custo.

1.8 Tópicos da Tese

No Capítulo 1 é apresentada a proposta deste trabalho e uma pequena revisão bibliográfica visando a contextualização. De maneira breve foram comentados alguns dos métodos utilizados para a detecção de vazamento, a ideia de concepção para a construção do protótipo, bem como os objetivos e contribuições científicas deste trabalho.

No Capítulo 2, é apresentado o método de correlação cruzada para a detecção de vazamento com uma e o método utilizado para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento. Será descrito o equacionamento teórico envolvido na temática e simulações computacionais a fim de exemplificar ao leitor os principais aspectos relacionados a tal metodologia de detecção de vazamento. Também serão comentados alguns fatores que influenciam na estimativa da localização de vazamento.

No Capítulo 3, é apresentada a modelagem do impacto produzido por um geofone quando configurado como atuador, bem como, os testes de bancada realizados para validação da modelagem desenvolvida e a simulação computacional onde serão combinados os modelos do impacto com a modelagem da tubulação desenvolvida por Gao *et al.*(2004), para a aplicação da metodologia da estimativa da velocidade de propagação.

O capítulo 4 tem como objetivo apresentar os resultados obtidos experimentalmente, que foram realizados em um campo de prova da SABESP utilizado para simular condições de vazamentos reais. Os experimentos tiveram como enfoque, a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento e também a estimativa da localização do vazamento em uma das seções da tubulação do campo de prova.

No capítulo 5, é detalhado a maneira como fora desenvolvido o protótipo do correlacionador, comentando sobre o protótipo e suas versões, bem como, sobre o

desenvolvimento do hardware, *software* e o desenvolvimento de um invólucro, que será utilizado na segunda versão para alojar o atuador e o sensor, com intuito de utilizá-lo para realizar a estimativa da velocidade de propagação e também a estimativa da localização de vazamento.

No capítulo 6, serão apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 02 – VISÃO GERAL SOBRE MÉTODO DE CORRELAÇÃO PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTO

2.1 Introdução

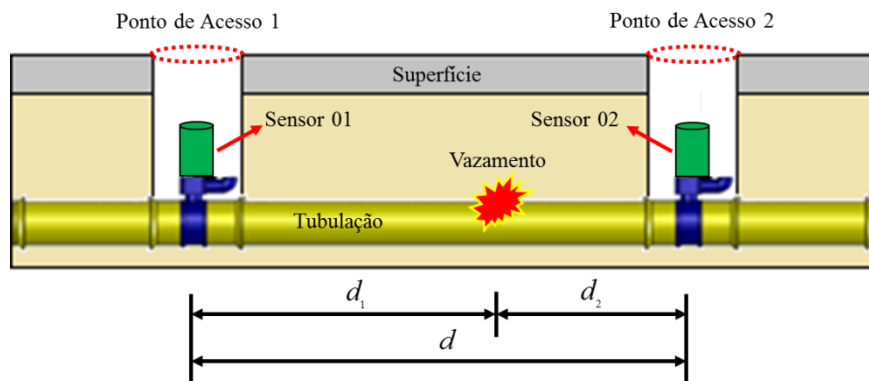
Existem várias técnicas utilizadas para detecção de vazamentos (FUCHS, 1991). Pode-se classificá-las, entretanto, de maneira mais geral como invasivas e não-invasivas. As técnicas invasivas, como exemplo mais recente a *smart-ball* (BEM-MANSOUR; HABIB, 2012) não agrada as companhias de saneamento, visto que, pode-se inserir “contaminantes” na rede de distribuição de água tratada. Para os métodos não invasivos destacam-se a haste de escuta e os correlacionadores de ruído de vazamento (HUNAIDI, 2000). O projeto ao qual este trabalho está vinculado tem como objetivo desenvolver um correlacionador nacional, bem como, incorporar novas tecnologias ao mesmo. Esta tese tem como um dos objetivos investigar e desenvolver novas técnicas de estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento, que é um dos principais fatores para a assertividade da localização do vazamento quando utilizada a técnica da correlação cruzada. Portanto, para um melhor entendimento do problema, faz-se necessário introduzir os conceitos principais de processamento de sinais da técnica de correlação cruzada e evidenciar aspectos quanto a limitação de sua utilização, principalmente em tubulações plásticas. Dessa maneira, será utilizado um modelo analítico desenvolvido por Gao et. al (2004) e Brennan et. al (2018), para contextualizar o problema, introduzir a técnica de correlação cruzada juntamente com seu processamento de sinais, elucidar a física do problema e investigar os principais fatores que afetam o uso da correlação cruzada no contexto exposto. Tudo isso, em um ambiente controlado (simulações) auxiliando no entendimento do problema.

2.2 Técnica da Correlação Cruzada na Detecção De Vazamentos

Como mencionado anteriormente, técnicas acústicas utilizam a resposta vibro-acústica gerada pelo vazamento para estimar a sua localização. Neste segmento, uma técnica reconhecida por sua eficácia e bastante utilizada é a técnica de correlação. O método se baseia na instalação de sensores vibro-acústicos (acelerômetros, *pick-up* de velocidade e/ou hidrofone) em pontos de acesso que delimitam a seção da tubulação onde existe a suspeita de vazamento, de forma que os sensores possam coletar a resposta vibro-acústica da tubulação enterrada (GAO *et al.*, 2004).

A Figura 2.1 mostra a esquemática de uma tubulação com os sensores instalados em pontos de acesso, sendo d_1 e d_2 , 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 2.1 - Esquemática de uma tubulação com vazamento, bem como os sensores vibratório-acústicos são conectados aos pontos de medida, geralmente hidrantes.



Fonte: Adaptado de Almeida *et al.* (2015).

Sabe-se que a excitação causada pela interação fluido-estrutura devido à presença do vazamento se propaga ao longo da tubulação enterrada. Considerando que a energia do vazamento, também chamada de ruído do vazamento, se propague de forma não-dispersiva, ou seja, com velocidade constante e independente da frequência, é possível então determinar o valor referente a distância do sensor 01 (d_1) até o vazamento, utilizando a equação clássica da velocidade média, que pode ser reescrita como:

$$d_1 = \frac{d - cT_o}{2}, \quad (2.1)$$

onde T_0 corresponde ao valor referente à diferença de tempo na chegada do ruído de vazamento entre os sensores 01 e 02, e c é a velocidade de propagação do ruído de vazamento. O atraso de sinal é obtido via correlação cruzada, que é uma medida de similaridade entre os dois sinais medidos. A velocidade de propagação do ruído, geralmente, é obtida de tabelas padrões de correlacionadores de sinais (ALMEIDA et al, 2015) ou via cálculo de equações analíticas que determinam a velocidade de propagação com base nas características do material do tubo (GAO et al., 2004). Ressalta-se que para uma boa estimativa da localização do vazamento, se faz necessário a utilização de uma boa estimativa do atraso de sinal e da velocidade de propagação mais próximo do valor real (ALMEIDA et al., 2015).

Existem fatores que podem influenciar na estimativa do método de correlação, tais como característica geométricas e materiais do tubo e as propriedades do solo onde a tubulação está enterrada. O tipo de material e dimensão do tubo estão diretamente relacionados com os efeitos de atenuação do ruído de vazamento, e a velocidade com que o mesmo se propaga ao longo da mesma (HUNAIDI, 2000). Em tubulações de plástico, a distância total percorrida pelo ruído de vazamento é muito menor quando comparada a tubulações metálicas. Isto se deve à elevada atenuação entre o fluido e a parede do tubo. Com relação ao diâmetro do tubo, quão maior o diâmetro, maior será a atenuação do sinal (HUNAIDI, 2000). Pesquisas recentes comprovaram que o tipo de solo também pode influenciar no valor correspondente à velocidade de propagação do ruído de vazamento e a atenuação desta onda ao longo da tubulação (BRENNAN et al., 2017).

As características do ruído de vazamento também dependem do tamanho e do tipo de vazamento. Rupturas ou fissuras causadas por corrosão nas paredes da tubulação, geram ruídos de vazamento mais forte e com frequências mais altas, quando comparado à vazamentos em articulações ou válvulas. É errôneo pensar que quão maior o vazamento, maior será a intensidade do sinal, a intensidade do sinal está diretamente relacionada à pressão da água existente na tubulação e a forma com que a fissura ocorre. Quanto maior for a pressão da água na tubulação, maior será o ruído de vazamento, em sistemas onde a pressão é inferior a 15 psi, torna-se difícil detectar vazamento (HUNAIDI, 2000).

Hunaidi (1999) investigou, através da realização de experimentos, as características acústicas do ruído de vazamento em tubulações de plástico, utilizando hidrofones (sensores que medem a pressão sonora) e acelerômetros. Notou-se que, quando utilizado hidrofones, a energia do ruído de vazamento ficou concentrada em frequências abaixo de 50 Hz, entretanto, com a utilização de acelerômetros, a faixa de frequência contendo o ruído de vazamento situou-se em

uma faixa de 50 a 150 Hz. Em frequências diferentes desta faixa, a amplitude do sinal era muito baixa e similar ao ruído de fundo, o que leva a concluir que a faixa de frequência onde a energia do vazamento está localizada depende do tipo de sensor utilizado. Tal fato fora também evidenciado por Gao *et al.* (2005) e Almeida *et al.* (2014)

2.3 Modelo Teórico de Vazamentos em Dutos Subterrâneos

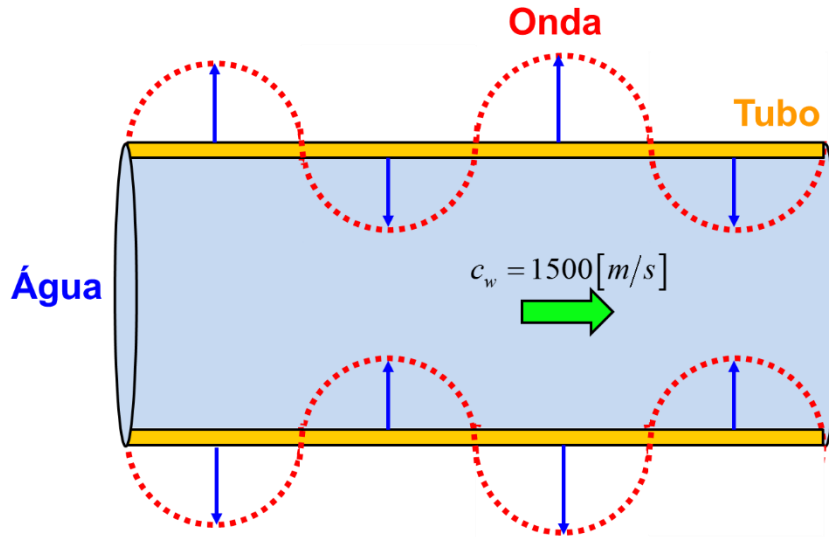
A propagação de ondas em tubulações preenchidas por fluído está relacionada a padrões modais de duas dimensões, compostas por números modais circunferenciais n e ondas associadas s relacionadas para cada modo, teoricamente, existem infinitas ondas s para cada modo n , entretanto, a maneira de como cada par modal (modo n e onda s) é excitado depende da frequência e distribuição espacial da excitação. Estudos comprovaram que, a energia de vazamento costuma ser encontrada em frequências abaixo da frequência do anel do tubo (quando o comprimento de onda se iguala ao comprimento do diâmetro do tubo) (MUGGLETON *et al.*, 2004).

Nesta faixa de frequência, apenas quatro tipos de ondas são responsáveis por grande parte da transferência de energia. Sendo três tipos de ondas axissimétricas relacionadas ao modo $n=0$ e uma onda flexão de viga com o modo $n=1$. Para o modo $n=0$, duas das três ondas são ondas planas, onde primeira onda $s=1$ corresponde a onda *fluid-borne* (será utilizado o mesmo termo em inglês encontrado na literatura, de forma a evitar o surgimento de um termo traduzido que não corresponda com o real significado da expressão) que surge através da movimentação do fluído no interior da tubulação, a segunda, $s=2$ está relacionada à onda compressional na parede do tubo e a terceira onda $s=0$ a onda torcional, onde não é acoplado a vibração por parte da parede do tubo e do movimento do fluído. Para o modo $n=1$ é caracterizado como movimentos laterais do tubo, não sendo utilizado em estudos de detecção de vazamento devido ao fato da energia estar mais concentrado na parede do tubo, não acoplando com o fluído. Estudos sobre o assunto, comprovaram que a energia do vazamento é predominantemente transmitido através da onda $s=1$, sendo assim considerada como uma onda plana e não-dispersiva (MUGGLETON *et al.*, 2002).

O modo como a onda originada pelo vazamento se propaga ao longo da tubulação é conhecida como “*breathing mode*”, recebe esse nome devido ao fato de que a onda ao percorrer a tubulação faz com que diâmetro do tubo ora aumente ora diminua. Na Figura 2.2 é mostrada essa forma de propagação ao longo de um tubo, ressalta-se que dependendo do tipo de material que é feito o tubo, sua rigidez, está diretamente relacionada com o valor da velocidade de

propagação, ou seja, materiais metálicos, por serem mais rígidos, apresentarão valores de velocidade de propagação maior do que quando comparados com tubos feitos de materiais plásticos.

Figura 2.2 – Forma de como uma onda originada por um vazamento se propaga ao longo de uma seção de tubulação.



Fonte: Adaptado de Almeida *et al.* (2015).

Gao *et al.* (2004) propõem um modelo analítico capaz de descrever o comportamento de um tubo fazendo uso de um modelo analítico proposto por Pinnington e Briscoe (1994), de um tubo no vácuo preenchido com fluido, desconsiderando os efeitos do solo e considerando apenas os efeitos do tubo. Para frequências abaixo da frequência do anel, que se referem a onda *fluid-borne* responsável pela propagação do ruído de vazamento, há um número de onda (*wavenumber*) k dado por:

$$k^2 = k_w^2 \left(1 + \frac{2B_w a}{Eh + i\eta Eh} \right), \quad (2.2)$$

onde k_w corresponde ao número de onda do fluido livre e η é o fator de perda da parede do tubo, E é o módulo de *Young* do material que é feito o tubo, a é o raio do tubo, h a espessura da parede do tubo e B_w é o módulo de *Bulk* de elasticidade do fluido. Pinnington e Briscoe (1994) também propuseram um equacionamento que representa a pressão acústica, sendo representado por:

$$p(x) = P_0(\omega) e^{-ikx}, \quad (2.3)$$

onde x corresponde a distância entre o vazamento e o sensor, $P_0(\omega)$ a amplitude da pressão acústica para $x=0$ e k representando o número de onda complexo para a onda *fluid-borne*. A parte real desse número de onda para representar a velocidade de propagação, é dada por:

$$\text{Re}\{k\} = \frac{\omega}{c}, \quad (2.4)$$

onde ω corresponde a frequência em rad/s e c representando a velocidade de propagação do ruído gerado pela presença do vazamento. A partir da Eq. 2.3, Gao *et al.* (2004) propôs uma função resposta em frequência que compreende a seção da tubulação entre o vazamento e o ponto de acesso, sendo essa definida por:

$$H(\omega, x) = e^{-i\omega x/c} e^{-\omega \beta x}, \quad (2.5)$$

onde x representa a distância entre o vazamento ao ponto de instalação do sensor, i simbolizando número complexo, β é o fator de atenuação da parede do tubo (GAO *et al.*, 2004).

A velocidade de propagação do ruído gerado pelo vazamento, pode ser teoricamente calculado utilizando a seguinte expressão:

$$c = c_w \left(1 + \frac{2B_w a}{Eh} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.6)$$

onde c_w corresponde a velocidade de onda do fluido livre, ou seja, não existe condições de contorno delimitando o fluido, como por exemplo o tubo. Já o fator de atenuação da parede do tubo β pode ser obtido através da equação:

$$\beta = \frac{1}{c_f} \frac{\frac{\eta B_w a}{Eh}}{\left(1 + \left(\frac{2B_w a}{Eh} \right) \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (2.7)$$

Gao *et al* (2004) propõem um equacionamento onde a densidade espectral cruzada, entre os sinais de vazamento $x_1(t)$ e $x_2(t)$ pode ser obtida através da seguinte formulação:

$$S_{x_1x_2}(\omega) = S_{xx}(\omega) \Psi(\omega) e^{i\omega T_0}, \quad (2.8)$$

onde, $S_{xx}(\omega)$ equivale a auto densidade espectral do ruído de vazamento $x(t)$; $\Psi(\omega)$ denota o comportamento da tubulação dada as propriedades do sistema, podendo ser representado da seguinte forma:

$$\Psi(\omega) = |H_1^*(\omega, l_1) \cdot H_2(\omega, l_2)| = e^{-\omega\beta(d_2+d_1)}, \quad (2.9)$$

onde $H_1^*(\omega, l_1)$ denota o conjugado da função resposta em frequência para $l=d_1$ e $H_2(\omega, l_2)$ denota função resposta em frequência para $l=d_2$.

Como mencionado anteriormente, a fase da densidade espectral cruzada entre os dois sinais está diretamente relacionada com o tempo de atraso dos sinais. Para o caso de vazamentos em dutos subterrâneos, a fase possuiu um comportamento linear, onde seu gradiente está relacionado com o tempo de atraso entre os sinais, como pode ser visto na equação que segue:

$$\varphi_{x_1x_2}(\omega) = \text{Arg}\{S_{x_1x_2}(\omega)\} = \omega \cdot T_0, \quad (2.10)$$

Para um melhor entendimento físico do problema, utilizar-se-á um problema já investigado por Almeida et al (2014), no qual se referem aos valores experimentais de seu trabalho, onde tais valores estão dispostos na tabela 2.1.

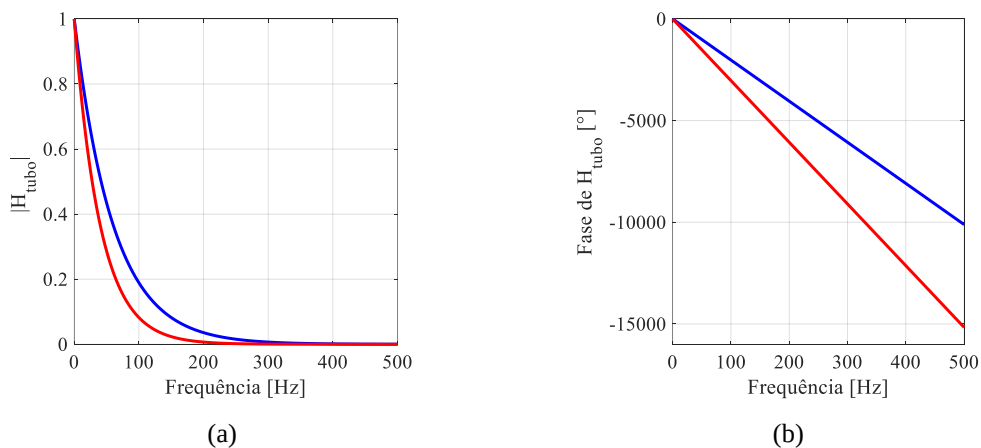
Tabela 2.1 - Parâmetros da tubulação utilizados para o estudo de caso.

Dados	Valor	Unidade
Frequência de Amostragem [F_a]	8192	Hz
Tempo de Aquisição [T]	60	s
Fator de perda da parede do tubo [η]	0.1	---
Raio do Tubo [a]	75	mm
Espessura da parede do tubo [h]	9.85	mm
Módulo de Young do material do tubo [E]	$2 \cdot 10^9$	N/m^2
Módulo de Bulk do fluido [B_w]	$2.2 \cdot 10^9$	N/m^2
Distância 01 [d_1]	20	m
Distância 02 [d_2]	30	m
Velocidade de onda do fluido [c_w]	1500	m/s
Velocidade da onda [c]	356	m/s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 2.3 é mostrado a função resposta em frequência (FRF) que descreve o comportamento da seção da tubulação proposto por Gao et al (2004) através da equação 2.5.

Figura 2.3 – Função resposta em frequência que descreve o comportamento da tubulação; (a) Módulo de $H(\omega)$; (b) Fase de $H(\omega)$. — $H_1(\omega, d_1)$; — $H_2(\omega, d_2)$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

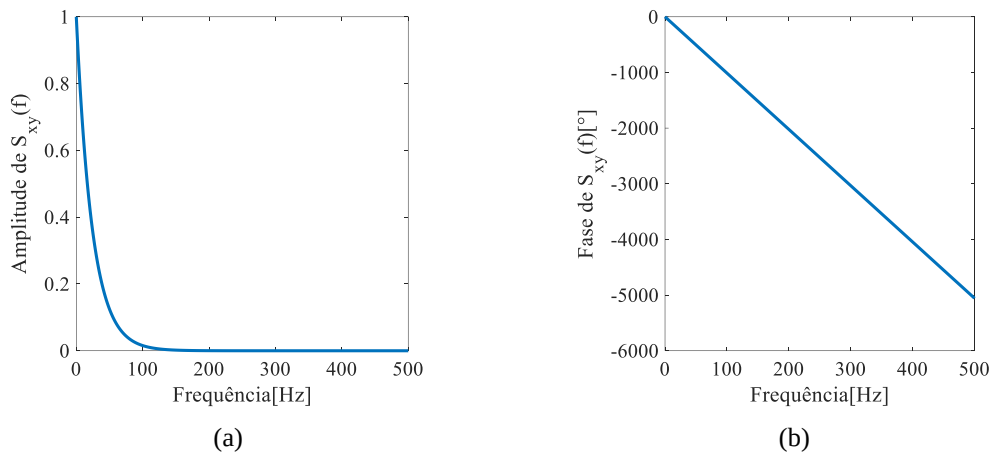
Pode-se observar que o comportamento da FRF é análogo a um filtro passa-baixa, uma vez que o comportamento da tubulação depende da medida da atenuação da parede do tubo β

e da distância entre os sensores d . Vale ressaltar que essa característica é devido ao tipo de medida (pressão acústica que está relacionada com o deslocamento), sendo que para outros tipos de medidas (velocidade ou aceleração), o comportamento se assemelharia com um filtro passa-banda (ALMEIDA *et al.*, 2014).

Imaginando um sistema com grande nível de atenuação e/ou os pontos de medida estiverem distantes da fonte de vazamento, somente sinal com baixa amplitude e frequência chegarão aos sensores, impossibilitando assim a realização de uma boa estimativa da localização do vazamento, pelo fato do sinal estar no mesmo nível do ruído de fundo.

Na Figura 2.4 são mostrados os gráficos correspondentes a densidade espectral cruzada entre os sinais de vazamento obtidos ao se utilizar dos parâmetros descritos na tabela 2.1 associados a Eq. 2.8.

Figura 2.4 – Densidade espectral cruzada dos sinais de vazamento; (a) Módulo de $S_{x_1x_2}(\omega)$; (b) Fase de $S_{x_1x_2}(\omega)$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O módulo da densidade espectral cruzada $S_{x_1x_2}(\omega)$ apresenta um comportamento similar a FRF, no qual se comporta como um filtro passa-baixa devido ao parâmetro $\Psi(\omega)$. Já a fase da densidade espectral apresenta um comportamento similar ao de uma reta, como mostra a Eq. 2.10. Vale ressaltar que o tempo correspondente ao atraso entre os sinais é determinado através do gradiente de inclinação da reta da fase (*unwrapped phase*) da densidade espectral cruzada. Grosseiramente falando, esse gradiente corresponde ao cálculo do atraso de sinal no domínio da frequência. Portanto, quanto mais estreita for a faixa de frequência utilizada para estimar seu gradiente, mais difícil será obter uma estimativa robusta do atraso de sinal, como já mencionado anteriormente.

2.4 Correlação Cruzada em Problemas de Detecção de Vazamentos

A correlação cruzada é uma ferramenta de análise e processamento de sinais que corresponde a uma medida de similaridade entre dois sinais sendo utilizado em diversos problemas de engenharia. Quando os sinais possuem um atraso entre si, como no caso de detecção de vazamentos, o pico de similaridade ocorre exatamente no tempo de atraso entre eles e por esse motivo, é utilizado em problemas de localização de vazamentos em dutos enterrados.

Quando dois sinais randômicos ergódicos e de valor médio igual a zero são correlacionados, a função de correlação cruzada do ponto de vista do domínio do tempo pode ser expressa como (BENDAT; PIERSOL, 2010).

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(\tau)x_2(\tau + T_0)] \quad (2.11)$$

sendo τ o vetor atraso, T_0 valor correspondente ao tempo de atraso entre os sinais, $E[\]$ esperança matemática e $x_1(t)$ e $x_2(t)$, dois sinais randômicos adquiridos em pontos distintos, como os mostrados na Figura 2.1 para os sensores 01 e 02. Como já mencionado, quando os sinais são similares, a função correlação cruzada tem valor máximo, ou seja, tem seu pico no atraso de sinal quando $\tau = T_0$. Se as distâncias entre os sensores e o vazamento forem iguais ($d_1 = d_2$) então o atraso de sinal será nulo ($T_0 = 0$). Entretanto, se a distância entre os sensores e o vazamento forem diferentes ($d_1 \neq d_2$) então o atraso de sinal não será nulo ($T_0 \neq 0$). Em alguns casos, é recomendado expressar a função de correlação cruzada em uma forma normalizada conhecida como coeficiente de correlação $\rho_{x_1x_2}(\tau)$, onde a escala tende de -1 a +1, sendo definida por (BENDAT; PIERSOL, 2010).

$$\rho_{x_1x_2}(\tau) = \frac{R_{x_1x_2}(\tau)}{\sqrt{R_{x_1x_1}(0) \cdot R_{x_2x_2}(0)}} \quad (2.12)$$

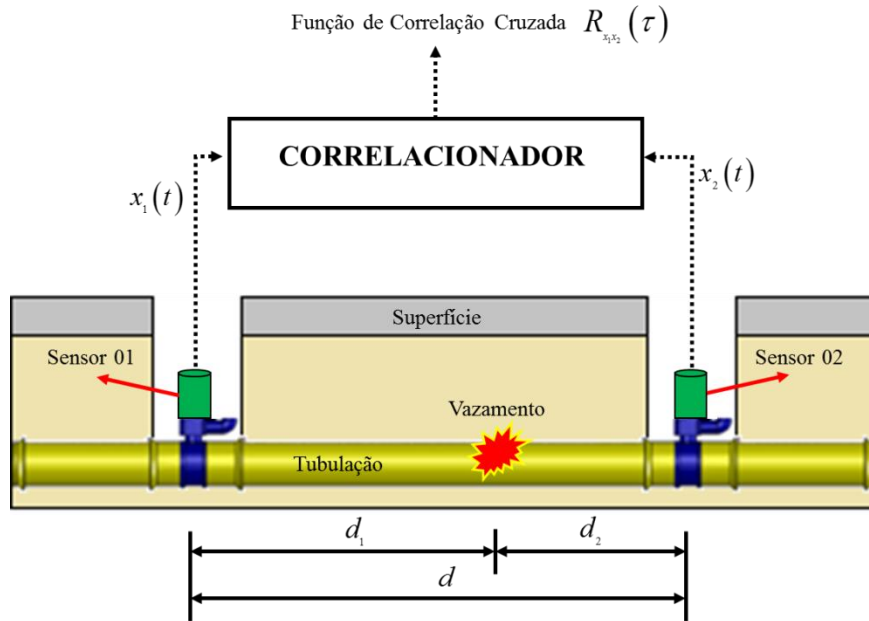
onde $R_{x_1x_1}(0)$ e $R_{x_2x_2}(0)$ são os valores da função de autocorrelação para os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$, respectivamente, quando $\tau = 0$.

Uma outra maneira de determinar a correlação cruzada é via a transformada inversa de Fourier da densidade espectral cruzada entre dois sinais.

$$R_{x_1x_2}(\tau) = F^{-1} \{ S_{x_1x_2}(\omega) \} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_1x_2}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.13)$$

onde $S_{x_1x_2}(\omega)$ é a Densidade Espectral Cruzada (CPSD – *Cross-Spectral Density Function*) entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$, e $F^{-1}\{ \}$ a transformada inversa de Fourier. A Figura 2.5 ilustra de forma esquemática, o problema de detecção de vazamentos, enfatizando o local de medida do sinal gerado pelo vazamento (hidrantes), distâncias entre os pontos de medida e o vazamento (d_1 e d_2), e cálculo da correlação cruzada utilizando um correlacionador de sinais.

Figura 2.5 - Ilustração esquemática de uma tubulação com vazamento, enfatizando o posicionamento dos sensores vibro-acústicos e cálculo da correlação cruzada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O atraso do sinal pode ser calculado de duas maneiras: uma no domínio da frequência e outra no domínio do tempo. Já foi mencionado o cálculo no domínio da frequência, que se dá via cálculo do gradiente da fase. Já no domínio do tempo, a correlação cruzada é utilizada para o cálculo do atraso do sinal, uma vez que o pico apresentado nesta função corresponderá ao tempo de atraso existente entre os dois sinais (SHIN; HAMMOND, 2008).

A correlação cruzada pode, então, ser obtida através da transformada inversa de *Fourier* da Densidade Espectral Cruzada (CPSD) dada pela Eq. 2.14 do modelo desenvolvido por Gao *et al.* (2004). Sabe-se que a multiplicação no domínio da frequência é convolução no tempo, ou vice-versa. Portanto a correlação cruzada é dada por:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = F^{-1}\{S_{x_1x_2}(\omega)\} = R_{xx}(\tau) \otimes \psi(\tau) \otimes \delta(\tau + T_0), \quad (2.14)$$

onde $R_{xx}(\tau)$ é a auto-correlação do ruído de vazamento; $\psi(\tau)$ denota o comportamento da tubulação; $\delta(\tau)$ representa a função delta de *Dirac*; $\otimes$ denota convolução. A variável $\psi(\tau)$, que é a representação no domínio do tempo do termo $\Psi(\omega)$, é dado por (GAO *et al.*, 2004).

$$\psi(\tau) = F^{-1}\{\Psi(\omega)\} = \frac{\beta d}{\pi[(\beta d)^2 + \tau^2]}, \quad (2.15)$$

Na formulação proposta por Gao *et al.* (2004), admitiu-se que o ruído gerado pelo vazamento é do tipo ruído branco, ou seja, teoricamente possui uma resposta espectral constante ao longo da frequência. Isso implica que a Densidade Espectral da Energia (*PSD – Power Spectral Density*) $S_{xx}(\omega)$ também possui um valor constante, aqui representado por S_0 .

O filtro passa-faixa é uma função de grande importância na estimativa da localização de vazamento, sendo este utilizado para atenuar sinais que estejam fora da faixa de frequência de interesse, ou seja, a faixa de frequência onde a energia do sinal de vazamento não está localizada. Considerando a resposta em frequência de um filtro passa-faixa ideal $G(\omega)$ onde:

$$\begin{aligned} G(\omega) &= 1 & \omega_0 \leq |\omega| < \omega_1 \\ G(\omega) &= 0 & \text{caso contrário} \end{aligned}, \quad (2.16)$$

e assumindo que, $S_{xx}(\omega) = S_0$, como já mencionado, a equação 2.14, pode ser reescrita como:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = S_0 \cdot \psi(\tau) \otimes g(\tau) \otimes \delta(\tau + T_0), \quad (2.17)$$

onde o filtro passa-faixa pode ser obtido através da transformada inversa de Fourier de $G(\omega)$ e é dado por:

$$g(\tau) = F^{-1}\{G(\omega)\} = \frac{\Delta\omega}{\pi} \frac{\sin(\Delta\omega\tau/2) \cos(\omega_c\tau)}{\Delta\omega\tau/2}, \quad (2.18)$$

onde $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$ representa a faixa de frequência do filtro passa-faixa, ω_1 é a frequência de corte superior do filtro e ω_0 é a frequência de corte inferior do filtro. Reescrevendo a função de correlação cruzada demonstrada na equação 2.17, obtêm-se:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \frac{S_0 e^{-\omega_0 \beta d}}{\pi \sqrt{(\beta d)^2 + (\tau + T_0)^2}} \left[\cos(\omega_0(\tau + T_0) + \theta) - e^{-\Delta \omega \beta d} \cos(\omega_1(\tau + T_0) + \theta) \right], \quad (2.19)$$

onde $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(\tau + T_0)}{(\beta d)} \right)$.

Seguindo uma análise similar ao demonstrado acima, a autocorrelação do sinal de vazamento, $R_{xx}(\tau)$ é dada por:

$$R_{xx}(\tau) = S_0 \cdot \phi(\tau) \otimes g(\tau), \quad (2.20)$$

onde:

$$\phi(\tau) = F^{-1} \{ |H(\omega, l)|^2 \} = \frac{2\beta l}{\pi \sqrt{(2\beta l)^2 + \tau^2}}, \quad (2.21)$$

Reescrevendo a equação 2.19 tem-se:

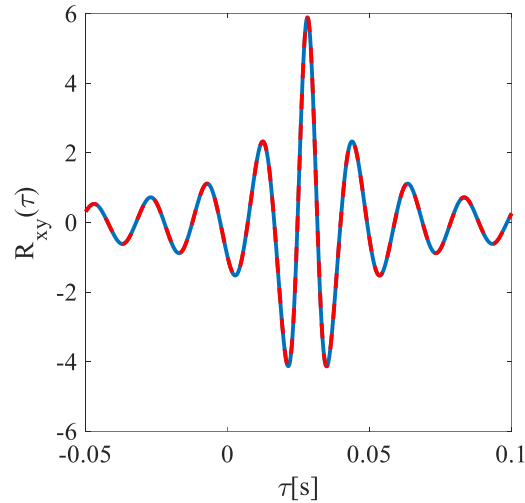
$$R_{xx}(\tau) = \frac{S_0 e^{-2\omega_0 \beta l}}{\pi \sqrt{(2\beta l)^2 + (\tau)^2}} \left[\cos(\omega_0 \tau + \theta) - e^{-2\Delta \omega \beta l} \cos(\omega_1 \tau + \theta) \right], \quad (2.22)$$

Então o coeficiente de correlação cruzada por ser determinado por:

$$\rho_{x_1x_2}(\tau) = \frac{2\beta \sqrt{d_1 d_2}}{\sqrt{(\beta d)^2 + (\tau + T_0)^2}} \frac{\cos(\omega_0(\tau + T_0) + \theta) - e^{-\Delta \omega \beta d} \cos(\omega_1(\tau + T_0) + \theta)}{\left(1 - e^{-2\Delta \omega \beta d_1}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - e^{-2\Delta \omega \beta d_2}\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (2.23)$$

Para o estudo de caso mostrado nesta seção foram utilizados parâmetros descritos por Almeida et al (2014), já descritos na tabela 2.1 é mostrado na seção anterior. Existem duas maneiras para demonstrar a função de correlação cruzada: a primeira se faz através da transformada inversa de Fourier do equacionamento correspondente a densidade espectral cruzada e a segunda é através da equação apresentada na Eq. 2.22. A Figura 2.6 mostra os resultados gráficos das duas maneiras descritas para a obtenção da função de correlação cruzada.

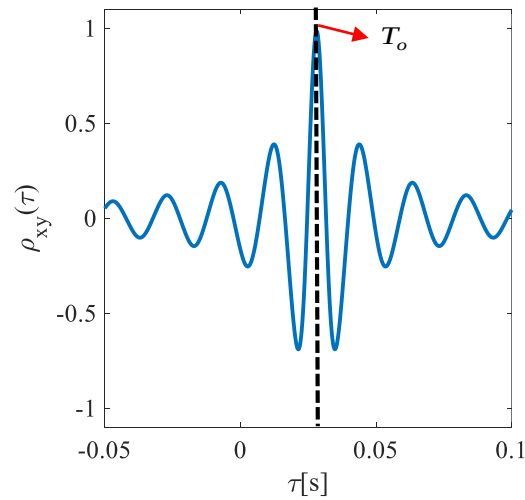
Figura 2.6 – Comparativo entre a correlação teórica com a transformada inversa de Fourier da densidade espectral teórica. — $F^{-1}\{S_{x_1x_2}(\omega)\}$; - - - $R_{x_1x_2}(\tau)$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mencionado anteriormente, costuma-se apresentar os resultados da função de correlação cruzada em uma forma normalizada, que fora descrita pela Eq. 2.23.

Figura 2.7 – Coeficiente de correlação cruzada teórica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos por esta análise estão dispostos na tabela 2.2. Por se tratar de uma simulação computacional, os parâmetros do sistema são previamente conhecidos, o que possibilita comprovar que os resultados apresentaram resultados satisfatórios.

Tabela 2.2 – Resultados obtidos pela análise do equacionamento teórico.

Resultados obtidos:	Tempo de Atraso [ms]	Distância [m]	
		d_1	d_2
Fase de $S_{x_1x_2}(\omega)$	28.09	19.99	30.00
Correlação Cruzada	28.08	20.00	29.99

Fonte: Elaborado pelo autor.

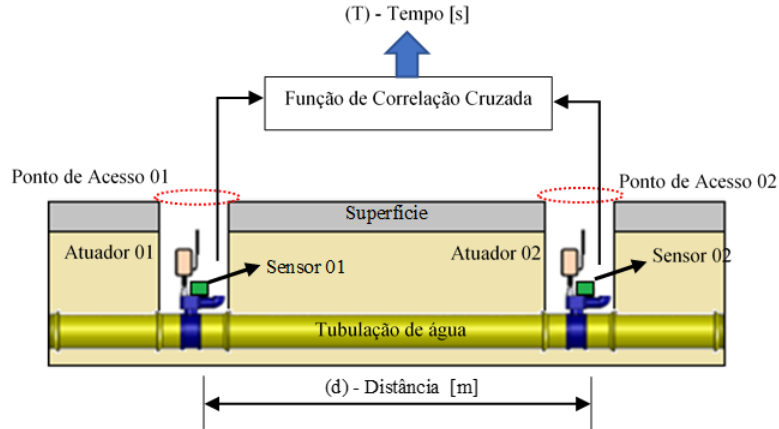
2.5 Método para Medição da Velocidade de Propagação do Ruído de Vazamento

A velocidade de propagação no qual a onda percorre a tubulação pode ser obtida através da parte real do número de onda, como já mostrado na Eq.2.4. Pesquisadores na área de detecção de vazamento buscaram alternativas para medir a velocidade de propagação através da realização de experimentos em laboratório, cujo objetivo era determinação do número de onda, através da medição da pressão interna do tubo utilizando hidrofones conectados ao longo da seção da tubulação. Entretanto, tal metodologia não é de fácil aplicação em situações reais de detecção de vazamento (MUGGLETON et al, 2002).

Almeida *et al.* (2015) propôs um método, robusto e ao mesmo tempo simples, para a realização da estimativa da velocidade de propagação. Tal método consiste em excitar o tubo com um atuador eletromecânico nos pontos de acesso, onde estão localizados os sensores. A Figura 2.8 mostra o esquemático de como esta técnica é utilizada. Basicamente, excita-se a tubulação em um ponto de medida, por exemplo, ponto de medida do atuador 01, onde a excitação se propaga da esquerda para direita. Sabendo-se a distância entre os sensores e o atraso de sinal entre os sinais medidos, pode-se então estimar a velocidade com que a excitação se propaga. Da mesma maneira, faz-se para o ponto do atuador 02, mas nesse caso, a excitação gerada pelo atuador se propaga da direita para esquerda. Logo, obtêm-se duas funções do coeficiente de correlação cruzada. Almeida *et al.* (2015) propõem calcular o envelope de cada uma destas funções para então realizar a multiplicação de tais envelopes, fornecendo assim um valor estimado para a velocidade de propagação do ruído de vazamento.

A metodologia aplicada neste trabalho é similar a proposta por Almeida *et al.* (2015), entretanto, não se fará uso do cálculo da multiplicação de envelopes, e sim, o cálculo da média dos resultados apresentados por ambas as funções de coeficiente de correlação cruzada.

Figura 2.8 – Esquemática de um sistema de tubulação para a realização da estimativa da velocidade de propagação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A vantagem da utilização deste método se dá pelo fato de poder se utilizar do mesmo, sob a presença de vazamento. Entretanto, deve-se salientar que existe a possibilidade de o ruído de vazamento sobrepujar o sinal de vibração gerado pelo atuador, consequentemente, o tempo de atraso usado na estimativa pode ser afetado pela presença de vazamento. Conhecendo a distância entre os dois pontos de acesso d e caso exista coerência entre os sinais medidos, a função de correlação-cruzada poderá ser utilizada, com o intuito de se obter um valor correspondente ao tempo total gasto que o sinal leva para percorrer a seção da tubulação T_0 , tornando possível realizar a estimativa da velocidade de propagação através da seguinte equação:

$$c = \frac{d}{T_0}. \quad (2.24)$$

Como já mencionado e repetido aqui por conveniência, após a obtenção da primeira estimativa, utiliza-se o atuador instalado no outro ponto de acesso para excitar a tubulação e repete-se o procedimento descrito anteriormente para se obter uma outra estimativa para a velocidade de propagação. O método proposto nesse trabalho assemelha-se ao trabalho de Almeida *et al.* (2015), mas com algumas particularidades que o diferem do estudo, o qual foi desenvolvido pelos referidos autores. Esse novo método será abordado no capítulo seguinte.

Segue-se, entretanto, com a investigação de fatores que podem afetar a estimativa da localização de vazamentos em dutos enterrados.

2.5.1 Efeito da estimativa da velocidade na localização do vazamento

Nos últimos anos, a determinação do tempo de atraso tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores do ramo de detecção de vazamento. Porém, para a localização de um vazamento ao longo de uma tubulação é necessário utilizar os valores precisos não somente do tempo de atraso, como também do valor correspondente a velocidade de propagação do ruído de vazamento da velocidade de propagação na seção de tubulação em análise.

A velocidade de propagação é uma variável que depende do tipo de material e da geometria do tubo e também da interação solo-fluído-estrutura, por exemplo, em materiais metálicos a velocidade de propagação é maior quando comparada a tubulações plásticas (BRENNAN *et al.*, 2017).

Muggleton *et. al* (2013) explica que a velocidade de propagação do ruído de vazamento é governada pela velocidade da onda no tubo entre o fluído e a estrutura, conforme já evidenciado pela Eq. 2.2. De forma simplificada, Brennan *et. al* (2017) representou o número de onda (k) através da seguinte equação, onde relaciona as rigidezes dinâmicas da água K_w , tubo K_t e do solo K_s :

$$k = k_w \left(\frac{1 + K_w}{K_t + K_s} \right)^{1/2}, \quad (2.25)$$

Com este equacionamento, Brennan *et. al* (2018) faz uma aproximação da parte real do número da onda que é mostrada abaixo:

$$\text{Re}\{k\} = k_w \left(1 + \frac{\frac{2B_w}{Eh/a}}{1 + \frac{2G_s}{Eh/a}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.26)$$

sendo B_w o módulo de *Bulk* da água, e G_s o módulo de cisalhamento do solo onde a tubulação está enterrada. Essa equação se difere da Eq. (2.6) pelo módulo de cisalhamento, ou seja, para esse modelo, leva-se em consideração os efeitos do solo na tubulação. Isso é importante para solos mais compactos ou argilosos, como os encontrados no Brasil. Entretanto, os efeitos do solo em tubulações em solos arenosos, como é no caso da Inglaterra, esse termo pode ser

negligenciado, que é o modelo proposto por Gao et al (2004). Brennan et al (2018) propõem então que a velocidade de propagação do ruído de vazamento pode ser calculado da seguinte maneira:

$$c = c_w \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{Eh}{2B_w a} + \frac{G_s}{B_w}}} \right)^{1/2}. \quad (2.27)$$

Brennan et. al (2017) realiza algumas observações quando considera-se o solo no modelo da tubulação, quanto a velocidade de propagação do ruído de vazamento e sobre a atenuação da parede do tubo sobre o ruído. A rigidez do tubo e do solo influenciam diretamente a velocidade de propagação do ruído de vazamento na tubulação, ou seja, quanto mais rígidos, maior a velocidade de propagação. Com relação a atenuação, esta aumenta com a frequência sendo que uma pequena parcela desta atenuação se deve a parede do tubo, enquanto grande parte da atenuação em altas frequências, dá-se pela radiação do ruído de vazamento no solo. Por esta razão, a onda não transita por longas distâncias e as medições de vibração na tubulação tendem a se concentrar em baixas frequências.

Com a utilização de um valor incorreto da velocidade de propagação na equação 2.1, irá se produzir um erro correspondente na estimativa da distância d_1 (ALMEIDA *et al.*, 2015).

O erro pode ser determinado assumindo como distância medida d_{1m} , e assumindo a velocidade de propagação medida como sendo c_m (este valor pode ser obtido através de medições ou retirado de tabelas), logo a equação 2.1 pode ser reescrita como:

$$d_{1m} = \frac{(d - c_m T_0)}{2}. \quad (2.28)$$

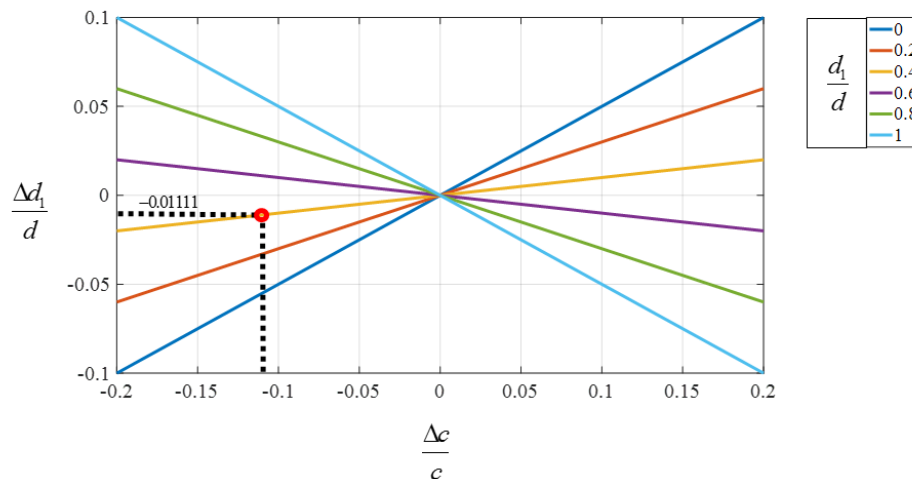
Combinando ambas as equações 2.1 e 2.28 e assumindo que as diferenças entre os valores medidos e os valores reais são descritos como $\Delta c = c_m - c$ e $\Delta d_1 = d_{1m} - d_1$, tem-se como resultado:

$$\frac{\Delta d_1}{d} = \left(\frac{1}{2} - \frac{d_1}{d} \right) \frac{\Delta c}{c}. \quad (2.29)$$

Almeida *et al.* (2015) apresentam como conclusões de sua análise, que caso o vazamento esteja no meio entre os pontos de acesso, o tempo de atraso entre os sinais é zero. Dessa forma, o erro da estimativa da velocidade de propagação não produz erro na localização do vazamento, entretanto, conforme a posição do vazamento se aproxima de algum dos pontos de medição, então o erro na medição da velocidade de propagação tende a apresentar um efeito aumentado.

Na Figura 2.8 é mostrado um gráfico para exemplificar o efeito da estimativa da velocidade de propagação na localização do vazamento. Admitindo uma seção de tubulação fictícia, d_1 é 20 metros e d é igual a 50 metros, assim, pode-se obter um valor aproximado para d_1/d de valor igual a 0.4. Nesta mesma seção, a velocidade de propagação do ruído de vazamento é 540 m/s, entretanto, ao configurar os parâmetros da tubulação em um correlacionador, a velocidade de propagação utilizada é de 480 m/s, ou seja, um erro de aproximadamente 11%. A partir do gráfico mostrado na Fig. 2.9, é possível então obter um valor referente à $\Delta d_1/d$ de valor igual a -0.011 (erro percentual da localização do vazamento de 1.11%), que resulta em um valor de Δd_1 igual a -0.56. Tal valor implica na diferença entre o valor real da posição do vazamento e o valor estimado da localização do vazamento por meio dos parâmetros utilizados.

Figura 2.9 – Exemplificação do efeito da estimativa da velocidade na localização do vazamento;



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.6 Fatores que Influenciam o Formato da Função de Correlação Cruzada na Detecção de Vazamentos

Neste estudo, serão discutidos resultados obtidos através de simulações computacionais com o objetivo de ilustrar fatores que influenciam o formato da função de correlação cruzada aplicada na temática sobre detecção de vazamento, tais como a faixa de frequência utilizada para filtrar os sinais e o fenômeno de reflexão na seção da tubulação em análise.

2.6.1 Faixa de frequência de filtragem dos sinais de vazamento

Como mencionado anteriormente, na análise dos ruídos de vazamento, o filtro passa-faixa é utilizado para atenuar ruídos indesejados, ou seja, para a análise da correlação cruzada exclui-se ruídos espúrios fora da faixa de frequência onde o sinal de vazamento está concentrada (GAO, 2004). Brennan *et al.* (2017), através de uma análise teórica, mostrou os efeitos da faixa de frequência na análise dos sinais de vazamento, ao reescrever a Eq. 2.17, desprezando os efeitos de atenuação por parte da tubulação, assim obtendo então a função de correlação cruzada através da transformada inversa de Fourier ao considerar o filtro passa-faixa como um caso ideal, onde seu formato se assemelha a uma janela quadrada com um atraso:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \frac{\Delta\omega}{\pi} \frac{\sin(\Delta\omega(\tau - T_0)/2)}{\Delta\omega(\tau - T_0)/2} \cos(\omega_c(\tau - T_0)), \quad (2.30)$$

sendo $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$ a faixa de frequência onde a energia do vazamento está contida e a frequência de central é dada por $\omega_c = (\omega_1 + \omega_0)/2$. A forma não-dimensional da Eq.(2.32) é então dado por:

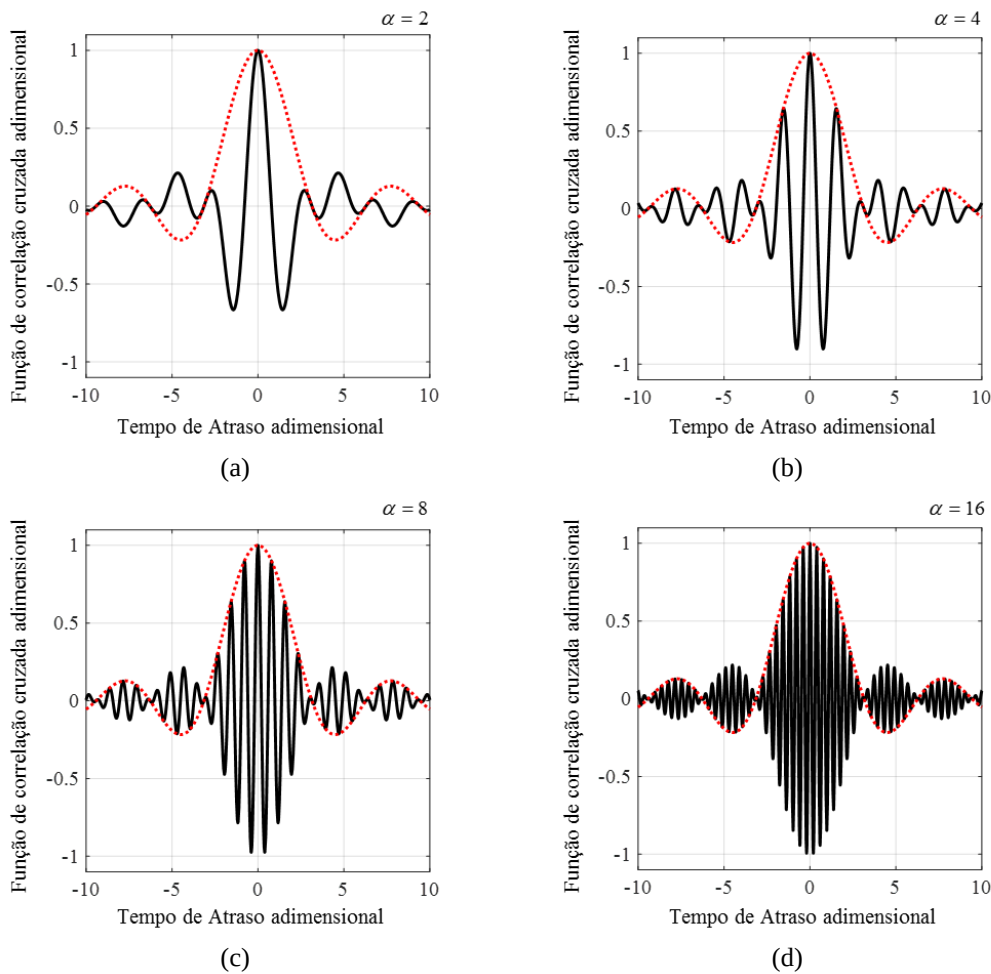
$$\hat{R}_{x_1x_2}(\hat{\tau}) = \frac{R_{x_1x_2}(\tau)}{\Delta\omega/\pi} = \frac{\sin(\hat{\tau})}{\hat{\tau}} \cos(\alpha\hat{\tau}), \quad (2.31)$$

onde $\hat{\tau} = \Delta\omega(\tau - T_0)/2$ e $\alpha = 2\omega_c/\Delta\omega$.

Nas Figuras 2.10(a), (b), (c) e (d) são mostradas as funções de correlação cruzada dada pela Eq. 2.31 com α igual a 2, 4, 8 e 16, respectivamente. Também é plotado o envelope da função de correlação cruzada $\sin(\hat{\tau})/\hat{\tau}$. Através da metodologia proposta por Brennan *et al.* (2017), é possível observar que a faixa de frequência de filtragem exerce influência na largura do pico principal da função de correlação cruzada e também, que conforme for diminuído a diferença entre a faixa de frequência utilizada na filtragem, maior será a incidência de lóbulos

laterais na função de correlação cruzada, indicando que se a faixa de frequência for muito estreita, pode dificultar a identificação do maior pico da correlação referente ao tempo de atraso entre os sinais de vazamento. Tais conclusões são evidenciadas na Figura 2.10, onde são mostrados resultados obtidos da função de correlação cruzada descrita pela Eq. 2.31 para diferentes valores de α .

Figura 2.10 – Exemplos de funções de correlação cruzada normalizada com tempo de atraso T_0 igual a zero com diferentes valores de α ; (a) Valor de $\alpha=2$; (b) Valor de $\alpha=4$; (c) Valor de $\alpha=8$; (d) Valor de $\alpha=16$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

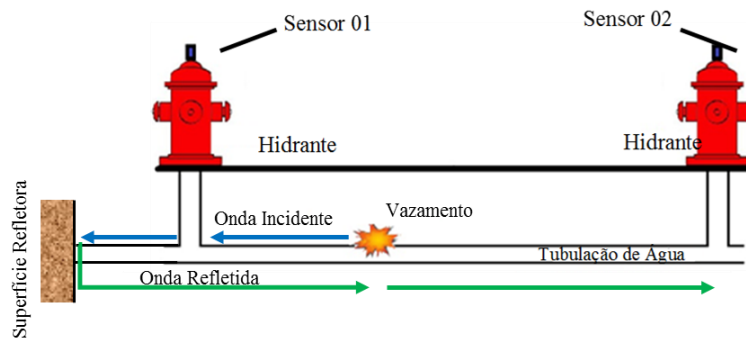
2.6.2 Fenômeno de Reflexão

No estudo de detecção de vazamentos, as ondas geradas pelo mesmo acabam frequentemente sendo refletidas devido a algumas características existentes na seção da tubulação, onde está sendo realizada a análise, tais como a presença de válvulas e junções do

tubo. A presença de reflexões é indesejável para a detecção de vazamentos, uma vez que as reflexões podem introduzir picos na função de correlação cruzada (dependendo da intensidade da reflexão), o que pode dificultar a interpretação do resultado no momento ao qual se deseja estimar o tempo de atraso resultante do ruído de vazamento (GAO et al, 2009).

O fenômeno de reflexão pode ser entendido como a mudança da direção de propagação da energia, onde se baseia no retorno da energia incidente em direção à região de onde ela é oriunda, após entrar em contato com uma superfície refletora. A reflexão de onda ocorre quando uma onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio de propagação mantendo as características da onda incidente. Na Figura 2.11, mostra-se um esquema de uma seção de tubulação sobre o efeito de reflexão (GAO *et al.*, 2009).

Figura 2.11 – Exemplo do fenômeno de reflexão em uma seção da tubulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

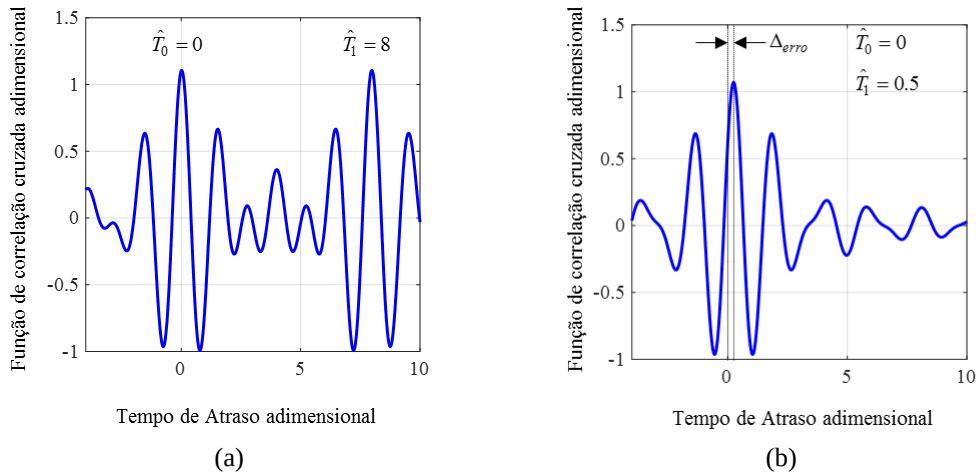
A função de correlação cruzada entre sinais de vazamento adquiridos em uma seção de tubulação sob a presença de reflexões apresentará dois valores correspondentes ao tempo de atraso (isso para o caso mais extremo), enquanto um deles se refere ao tempo de atraso adquirido pelo ruído de vazamento, o outro corresponderá a um valor de tempo de atraso obtido através da onda de reflexão (BRENNAN *et al.*, 2017).

Brennan *et al.* (2017) apresentou resultados obtidos através de análises teóricas, onde estabeleceu uma relação, que ele chamou de regra de ouro (*rule of thumb*) para evitar imprecisão na realização da estimativa do tempo de atraso, onde em termos dimensionais, a diferença de atraso entre os dois picos ΔT deverá ser maior que $2/\Delta f$, sendo Δf correspondente à faixa de frequência de filtragem em Hz. O estudo se dá utilizando uma modelagem bem parecida com aquela mostrada na seção anterior. Já em termos adimensionais, a diferença do tempo de atraso adimensional $\Delta \hat{T}$ que corresponde a $\hat{T}_1 - \hat{T}_0$ deverá ser maior que π/α .

Na Figura 2.12 é mostrado os resultados gráficos obtidos para a função de correlação cruzada adimensional, admitindo valor de α é igual a 4, como fora utilizado por Brennan *et al.*

(2017), para dois casos diferentes, o primeiro caso $\Delta \hat{T}$ é igual a 8, e para o segundo caso $\Delta \hat{T}$ é igual a 0.5. Pela Fig. 2.11(a) é possível evidenciar os dois picos correspondentes ao tempo de atraso, enquanto para a Fig. 2.11(b) apenas um pico se faz presente, e este não corresponde ao valor real do tempo de atraso de valor igual a 0.23 (BRENNAN et al, 2017).

Figura 2.12 – Efeito da função da correlação cruzada sob efeito de dois tempos de atraso devido a presença de reflexão; (a) Caso 1; (b) Caso 2.



Fonte: Brennan et al. (2017).

2.7 Conclusão

Neste capítulo foi detalhado um dos principais métodos utilizados em problemas de detecção de vazamento em dutos subterrâneos, o método acústico de correlação. Fora realizada também uma revisão da literatura com objetivo contextualizar tal técnica (correlação cruzada) em problemas envolvendo detecção de vazamentos utilizando modelos amplamente utilizados no entendimento físico de tal problema. Mostrou-se a importância da estimativa correta da variável correspondente a velocidade de propagação da velocidade com que o ruído de vazamento se propaga na tubulação, bem como, foi introduzida uma solução para obter tal valor. Por fim, fora discutido brevemente a respeito de dois aspectos que influenciam no formato da função de correlação cruzada. O primeiro foi a respeito da faixa de frequência de filtragem dos sinais, utilizado antes do cálculo da correlação cruzada. O segundo aspecto abordou o fenômeno de reflexão, que gera picos não relacionados ao vazamento, podendo acarretar em erros na estimativa do atraso de sinais, por consequência, erros na estimativa da velocidade de propagação da velocidade do ruído de vazamento quando utilizadas técnicas que usam a correlação cruzada para estimá-la.

CAPÍTULO 03 - INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO COMO FONTE DE EXCITAÇÃO EXTERNA PARA ESTIMAR A VELOCIDADE DE RUÍDO DE VAZAMENTO

3.1 Introdução

Como visto no capítulo anterior, a técnica vibro-acústica de detecção de vazamentos via correlação cruzada utiliza o atraso de sinal (T_0) e a velocidade de propagação de ruído do vazamento (c) para estimar a distância do vazamento para um dos dois sensores conectados à tubulação. Esse trabalho tem como principal objetivo investigar técnicas para estimar a velocidade de propagação do ruído de vazamento “in situ”, ou seja, em situações reais em campo previamente o cálculo da correlação cruzada. Esse método prevê diminuir a dependência das estimativas das velocidades de propagação do ruído de vazamento, geralmente, obtidas de tabelas padrões ou equações analíticas, como mencionado no capítulo anterior, que podem resultar em erros na estimativa da posição do vazamento.

Para o método proposto e investigado nesse capítulo, utilizar-se-á uma fonte de excitação externa, localizada em uma posição conhecida, no caso, em um dos pontos de acesso a tubulação onde os sensores estão conectados. Sabendo a origem da excitação e a distância entre os sensores, pode-se então calcular (estimar) a velocidade de propagação do ruído de vazamento. A fonte externa aqui estudada para excitar a estrutura (tubo enterrado) é do tipo impacto. Isto porque pretende-se utilizar um geofone, que é um dispositivo para medir velocidade comumente encontrado para medir atividades sísmicas e também em problemas envolvendo detecção de vazamento.

De maneira simplificada, o geofone é um ímã cilíndrico suportado por molas (rigidez) e “encapsulado” por uma bobina. Quando existe um movimento relativo entre o ímã e a bobina, então uma voltagem é gerada, sendo esta proporcional a velocidade do solo/estrutura ao qual o geofone está acoplado. Entretanto, da mesma maneira que o geofone pode ser um sensor, ele também pode ser um atuador quando uma determinada voltagem é fornecida fazendo com que o ímã se movimente dentro do encapsulamento.

Este capítulo tem como objetivo investigar a utilização do geofone como dispositivo de impacto para gerar vibração, considerando o tempo de contato entre o atuador e a estrutura a

ser excitada. Será realizada uma modelagem que busque representar o impacto produzido pelo geofone, testes de bancada para validar a modelagem desenvolvida e por fim, utilizando-se o modelo desenvolvido por Gao *et al.*, simular um caso onde o impacto gerado pelo geofone é utilizado para medir a velocidade de propagação da onda, a qual a energia do vazamento é transmitida.

3.2 Estudo do Impacto Produzido por um Geofone

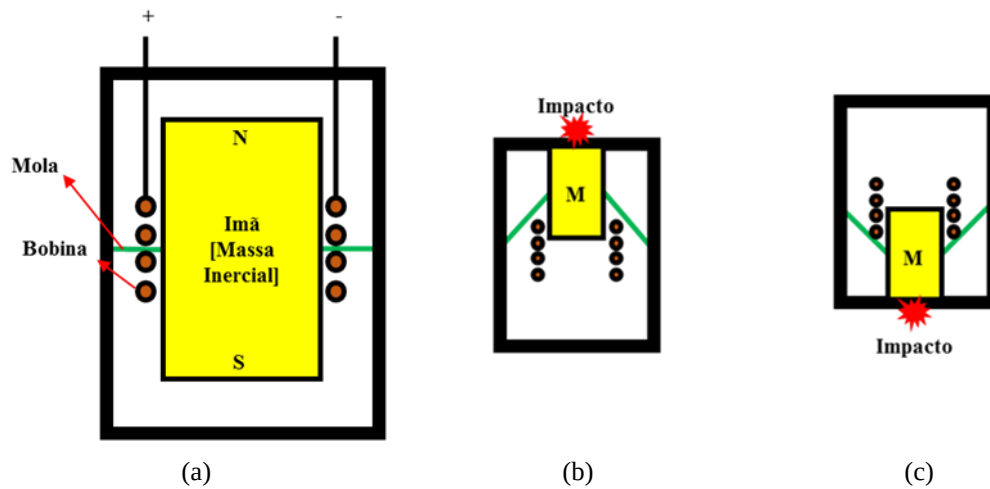
Geofones são sensores passivos analógicos capazes de converter o movimento relativo entre um ímã e uma bobina ao qual o ímã é envolvido, em voltagem. Basicamente, em seu interior, existe um cilindro de massa magnética (ímã) suspenso por molas e rodeado por uma bobina para gerar sinal elétrico. Tal sensor é bastante utilizado para medições de atividades sísmicas. 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 comerciais do tipo eletromecânico (alguns milhares de reais), como por exemplo *shakers*.

3.2.1 Geofone operando como atuador

Para que um geofone opere de forma inversa, isto é, como um atuador, deve-se aplicar um sinal de excitação (voltagem) 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. 3.1.

A Figura 3.1(a) mostra o esquema geral do geofone, onde o ímã é suspenso por uma mola e rodeado por uma bobina. Ao aplicar-se um sinal de excitação, a bobina é energizada e devido ao princípio de atração/repulsão eletromagnética, faz com que o ímã (massa inercial) se desloque no interior do geofone, provocando impactos na parte superior e inferior do geofone, como é mostrado nas Fig. 3.1(b) e 3.1(c).

Figura 3.1 – Utilização de um geofone como atuador; (a) Estrutura interna de um geofone; (b) Impacto na parte superior; (c) Impacto na parte inferior.

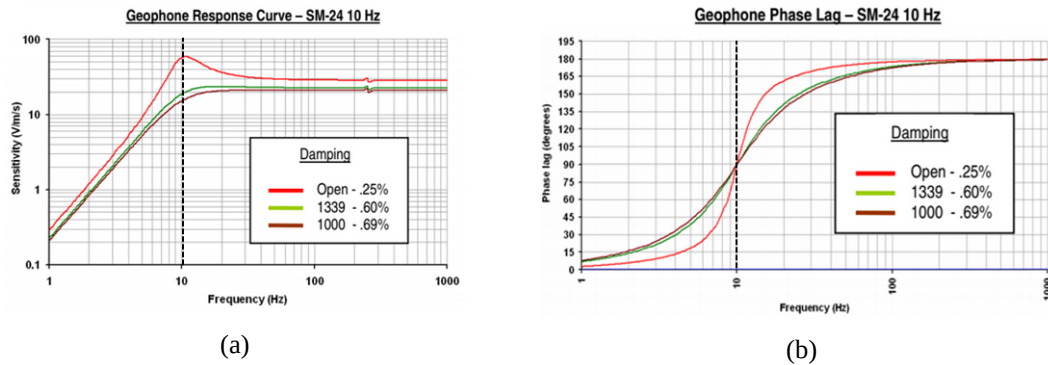


Fonte: Elaborado pelo autor.

Testes preliminares realizados em laboratório constataram que para fazer com que o geofone (Sensor *Nederland* SM-24 UB 10 Hz 375 Ω) vibre com impacto é necessária uma voltagem de aproximadamente 18 volts ao excitá-lo com um sinal do tipo senoidal de frequência qualquer. 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. Isto porque pouca energia é necessária para obter uma elevada resposta na referida frequência.

Dados obtidos através do catálogo do fabricante do geofone (e também comprovada em laboratório), indicaram que o sensor possui uma frequência de ressonância de 10 Hz, como pode ser vista no módulo e na fase da Função de Resposta em Frequência (FRF) do geofone disponibilizado pelo fabricante e mostrado nas Figuras 3.2(a) e Fig. 3.2(b), respectivamente. Quando utilizado um sinal periódico de frequência única (*single frequency*) ajustado com a frequência de 10Hz, a voltagem necessária para excitar o geofone decai significativamente para aproximadamente 4 volts.

Figura 3.2 – Função resposta em frequência do geofone; (a) Amplitude; (b) Fase.



Fonte: Datasheet fornecido pelo fabricante.

Portanto, com o intuito de reduzir a energia necessária para obter tais níveis de vibração, o geofone foi excitado em sua faixa de ressonância, que é em torno de 10 Hz.

3.2.2 Procedimento Experimental

Para verificar a efetividade e caracterizar o geofone como atuador, já que a princípio este transdutor é utilizado com sensor. Foi feito um estudo de bancada onde pôde-se obter um ambiente controlado. Portanto, este estudo é baseado na análise do impacto produzido pelo geofone, onde tem-se como objetivo principal desenvolver um modelo analítico do impacto gerado que se aproxime dos resultados experimentais. Dessa maneira, pode-se determinar o padrão de comportamento apresentado pelo geofone, quando esse é configurado como atuador para diferentes “configurações” de impacto, ou seja, diferentes maneiras como o impacto pode ser induzido via geofone. Os equipamentos utilizados para a realização do seguinte experimento foram:

- Computador com o software MATLAB instalado;
- Amplificador de sinais (Amplificador de Potência Crown XLS 1000)
- Dispositivo para medir a corrente (banco com resistores feito no laboratório);
- Célula de carga (PCB – LW49650);
- Acelerômetro (PCB-LW55764);
- Geofone (Sensor Nederland SM-24 UB 10 Hz 375 Ω);
- Sistema de aquisição Siemens LMS SCADA;
- Cabos, conexões e adaptadores BNC.

Para todos os sinais medidos descritos nesta seção, foram capturados 60 segundos de dados, utilizando uma frequência de amostragem de 8192 Hz. Na Figura 3.3, são mostradas algumas imagens dos componentes utilizados neste experimento e também da montagem dos

sensores e o geofone (atuador). Na Figura 3.3(a) é mostrado o sistema de aquisição de sinais Siemens LMS SCADA, o amplificador analógico de sinais Crown XLS-1000 é mostrado na Fig. 3.3(b), o dispositivo utilizado para medir a corrente que percorre o sistema está disposto na Fig.3.3(c) e a Fig.3.3(d) mostra a montagem dos sensores para a realização do experimento descrito nessa seção.

Figura 3.3 – Componentes utilizados no experimento; (a) Sistema de Aquisição LMS SCADA; (b) Amplificador de Sinais; (c) Dispositivo para medir corrente; (d) Instalação dos sensores.



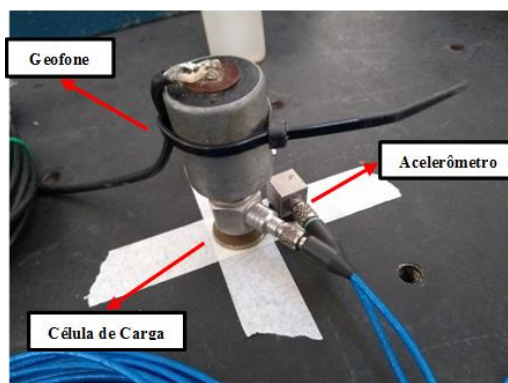
(a)



(b)



(c)

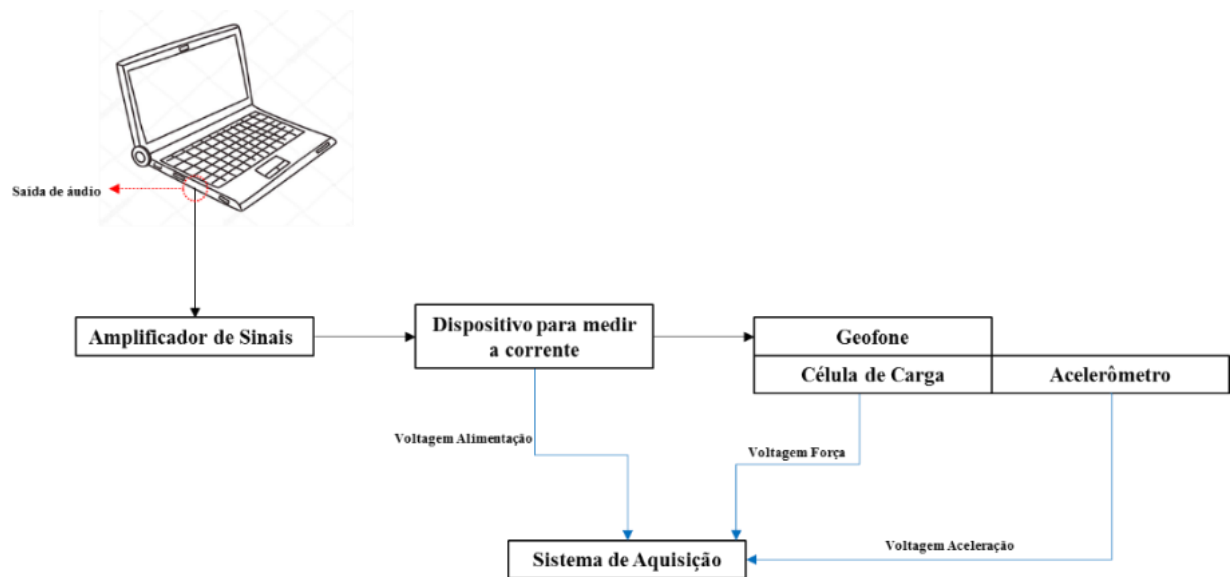


(d)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.4 mostra uma esquemática (diagrama de blocos) da montagem feita para a realização do experimento.

Figura 3.4 – Esquemática do experimento realizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O experimento realizado consistiu em enviar um sinal, gerado pelo software MATLAB, através da saída de áudio do computador para um amplificador de sinais. Esse sinal após a amplificação, passou por um instrumento utilizado para medir a corrente que percorre pelo sistema. Em seguida o sinal foi enviado para excitar o geofone conectado a uma célula de carga. A célula de carga, que está colada em uma mesa rígida, é utilizada para medir o impacto gerado pelo geofone. Coloca-se também ao lado da célula de carga um acelerômetro, também colado à mesa, para medir a resposta da mesa a excitação (impacto) gerado pelo geofone.

3.2.3 Resultados

O resultados mostrados nesta seção tiveram como enfoque o desenvolvimento de um modelo que consiga representar o impacto produzido pelo geofone, assim, a análise fora concentrada sob o estudo da força produzida por tal impacto, dessa forma, foram utilizados os sinais obtidos pela célula de carga e não os sinais mensurados pelo acelerômetro referentes a vibração provocada pelo impacto sendo propagada na mesa inercial de testes.

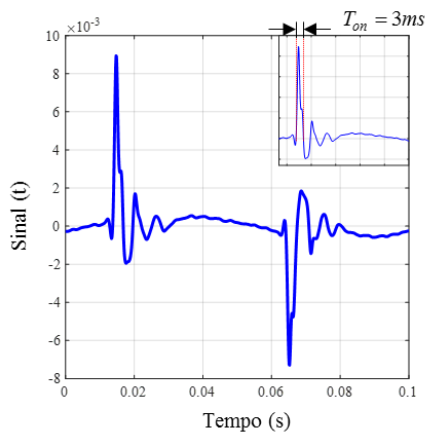
A Figura 3.5(a) mostra o sinal medido pela célula de carga onde está conectado o geofone, quando o mesmo é excitado utilizando um sinal do tipo senoidal, cuja frequência fundamental é de 10 Hz. Fora necessário a aplicação de um filtro passa-faixa (1 a 500 Hz) no sinal medido pela célula de carga, afim de eliminar a presença de ruídos ou interferências presentes em altas frequências, que não são de interesse na análise que está sendo realizada.

A força produzida pelo impacto proporcionado pelo geofone, devido ao deslocamento da massa inercial em seu interior, ao ser excitado por um sinal do tipo senoidal (neste estudo

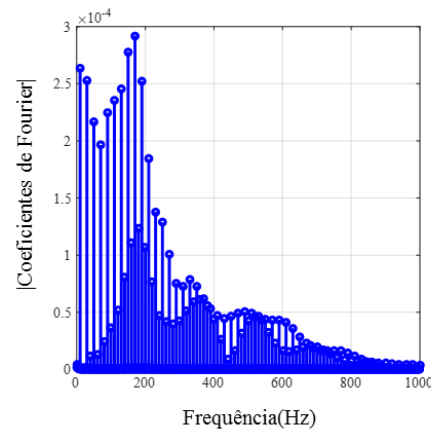
foi utilizada uma frequência de 10 Hz) tem seu comportamento semelhante a um sinal do tipo trem de pulso, com pulsos positivos e negativos, que acompanham os ciclos do sinal senoidal de excitação, como mostra a Figura 3.5(a). A Figura 3.5(b) mostra os coeficientes da série de Fourier para a força produzida pelos impactos provocados pelo geofone e medidos via célula de carga.

De forma a obter uma aproximação com o sinal experimental quanto ao comportamento do impacto produzido pelo geofone, foi elaborado um modelo baseado em trem de pulsos. Sua representação no domínio do tempo é mostrada na Fig. 3.5(c) e a amplitude do coeficiente da série de Fourier representando esse sinal é mostrado na Fig. 3.5(d). Como pode ser observado através da Fig. 3.5(c) nota-se uma alternância de picos positivos e negativos, tal fato está relacionado com o sinal de excitação (no caso, um sinal senoidal) onde faz com que o deslocamento da massa inercial (imã) se desloque ora para cima e ora para baixo, seguindo o sinal de excitação senoidal. Através das análises feitas sobre os resultados gráficos obtidos, pode-se constatar que módulo do coeficiente da série de Fourier decai para seu menor valor quando a frequência atinge $1/T_{on}$, em frequências múltiplas a esta citada também é observado o mesmo fenômeno.

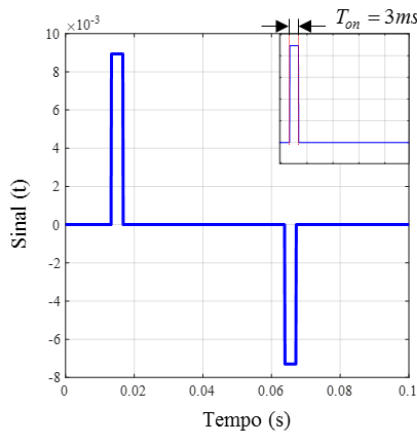
Figura 3.5 – Análise de uma sinal senoidal de 10 Hz excitando um geofone; (a) Sinal medido no domínio do tempo; (b) Módulo do coeficiente de Fourier do sinal experimental; (c) Sinal simulado no domínio do tempo; (d) Módulo do coeficiente de Fourier do sinal simulado.



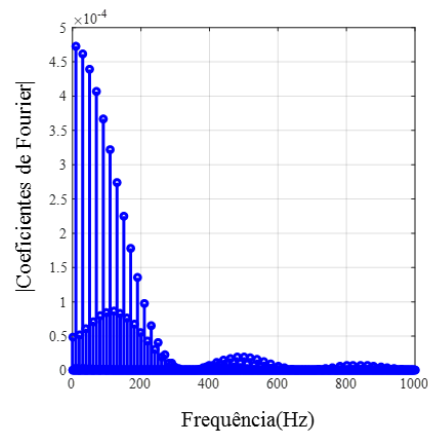
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pelo autor.

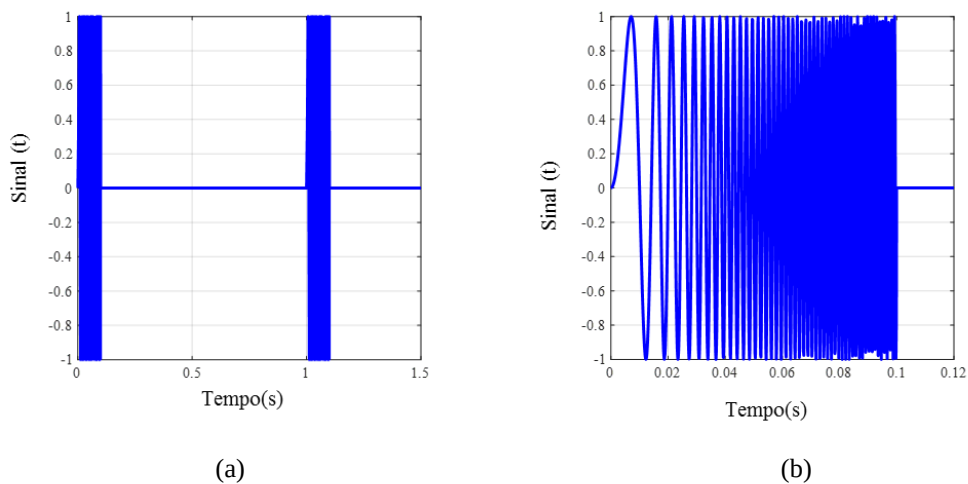
Como mencionado anteriormente, o impacto gerado pelo geofone pode ser alcançado de diferentes maneiras. A primeira foi mencionada anteriormente, onde um sinal periódico com frequência fundamental coincidindo com a frequência natural do geofone, que é de 10Hz, foi utilizado. Uma segunda maneira de se obter o impacto é gerando um sinal do tipo chirp “varrendo” rapidamente uma faixa de frequência pré-estabelecida, onde englobe (faixa de frequência) a frequência natural do geofone. A proposta inicial consistia em excitá-lo (geofone) em uma faixa de frequência que abrangesse de 0 a 2000 Hz em um período de 1 segundo, fazendo com que o geofone realizasse impactos à medida que o sinal de excitação passasse pela frequência de 10 Hz. Entretanto, essa “configuração” não se mostrou efetiva e optou-se por redefinir a maneira que o chirp é gerado. Dessa maneira, foi proposto a concepção de um sinal chirp que atinge de 0 a 1000 Hz em 0.1 segundos, com período de repouso de 0.9 segundos com repetição de 1 segundo.

A faixa de frequência utilizada por este novo sinal se baseia no fato que a energia do vazamento se encontra abaixo de 1000 Hz (GAO et al, 2005), não sendo necessário excitar em faixas de frequência maiores do que essa. No capítulo subsequente, onde serão apresentados os resultados experimentais obtidos no campo de provas, pode-se constatar que a faixa de frequência onde a energia de vazamento pode ser encontrada, está na faixa entre 250 a 650 Hz, como mencionado, está abaixo de 1000 Hz.

Essa divisão entre o tempo de acionamento e desligamento foi resultado de uma proposta inicial, que consistia em manter o período de repetição dos impactos de 1 segundo, porém, com um tempo de acionamento curto (0,1 segundo) quando comparado ao tempo de desligamento do atuador (0,9). Testes em laboratório, onde foram analisados os impactos produzidos pelo geofone quando excitado por esse tipo de sinal, constataram que houve uma diminuição da interferência gerada pelos pulsos durante suas repetições, ou seja, após o chirp existe um tempo de resposta para que o ímã retorne a posição de repouso, como um sistema de um grau de liberdade. Dessa maneira, evita-se que o sinal gerado anterior interfira no impacto seguinte.

A Figura 3.6 mostra o sinal do tipo chirp gerado utilizado para excitar o geofone, onde na Fig. 3.6(a) é mostrado o sinal onde a abcissa cobre o intervalo de tempo de 0 a 1.5 segundos, evidenciando o período de repetição do sinal, enquanto na Fig.3.6(b) é mostrada a abcissa cobrindo o intervalo de tempo de 0 a 0.12 segundos evidenciando a variação do sinal do tipo chirp que inicia em 0 e atinge 1000 Hz em 0.1 segundos.

Figura 3.6 – Sinal criado para excitar o geofone baseado em um sinal do tipo chirp com período de repetição de 1 segundo e tempo de acionamento do chirp de 0.1 segundos; (a) Repetição do sinal com período de 1 segundo; (b) Tempo de funcionamento do chirp onde este varia de 0 a 1000 Hz em 0.1 segundos .

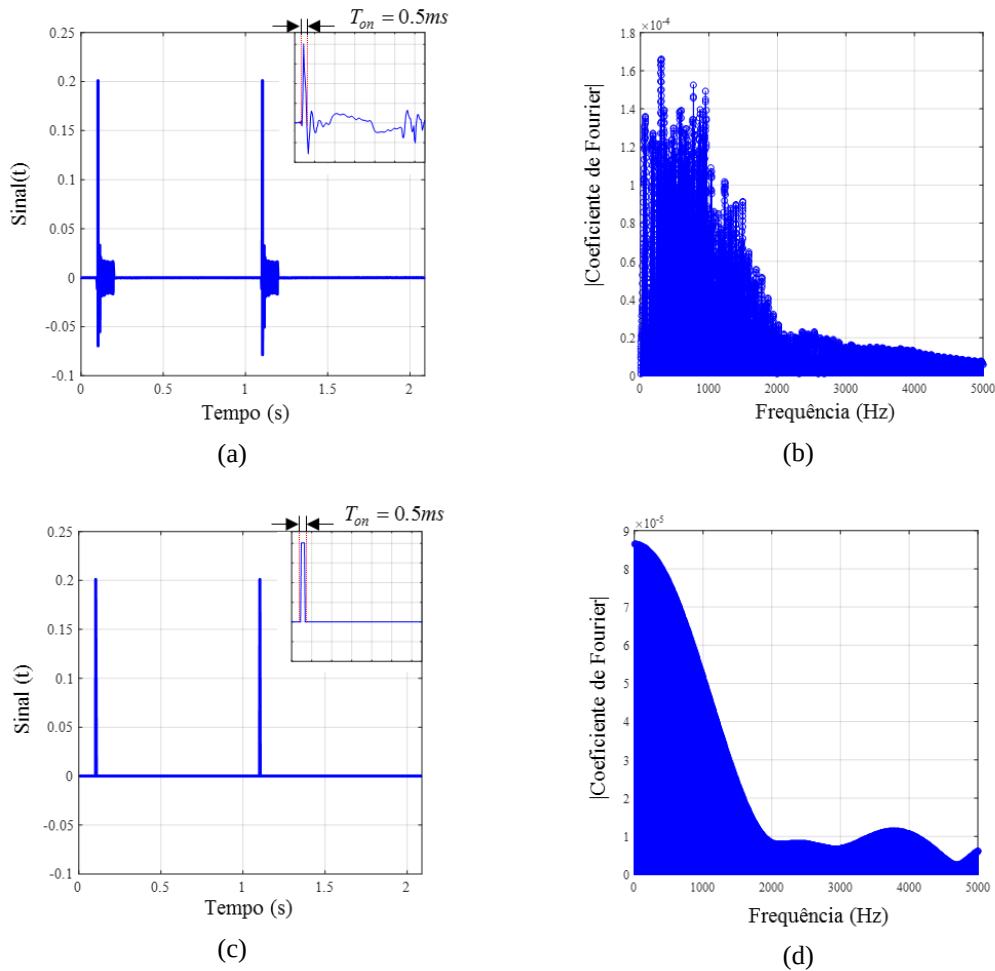


Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma como foram feitas as análises mostradas utilizando o sinal senoidal para excitar o geofone, também são realizadas as mesmas análises para a excitação do tipo chirp no geofone mencionada anteriormente. O sinal medido pela célula de carga é mostrado na Figura 3.7(a). A representação do módulo do coeficiente de série de Fourier deste sinal é apresentado na Fig. 3.7(b). O modelo que busca a aproximação com o sinal experimental no

domínio do tempo está disposto na Fig. 3.7(c) e a amplitude do coeficiente da série de Fourier representando esse sinal é mostrado na Fig.3.7(d).

Figura 3.7 – Análise de uma sinal de tipo chirp excitando um geofone; (a) Sinal medido no domínio do tempo; (b) Módulo do coeficiente de Fourier do sinal experimental; (c) Sinal simulado no domínio do tempo; (d) Módulo do coeficiente de Fourier do sinal simulado.



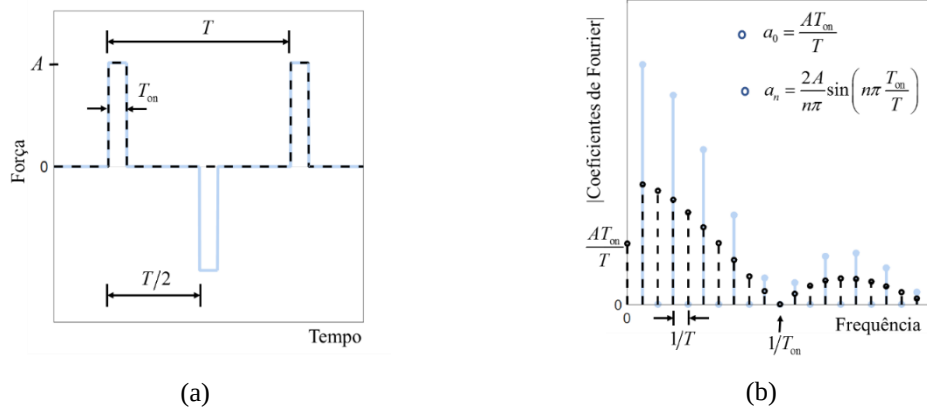
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 Discussão dos Resultados

De forma a representar a força produzida pelo impacto na base do geofone de uma maneira simplificada, é possível realizar uma analogia com um sinal simulado do tipo trem de pulsos, onde esse apresenta um período de repetição T e um tempo de acionamento T_{on} . Na Fig. 3.8 são representados dois gráficos adimensionais onde são retratadas características do sinal do trem de pulso, nos domínios do tempo e a amplitude do coeficientes da série de Fourier. Ainda na Fig. 3.8 são comparados dois tipos de sinais, em linha preta tracejada, corresponde a um trem de pulso com ciclos apenas positivos, enquanto a linha sólida azul refere-se a um ciclo

“senoidal” (variação positivo\negativo) do sinal de trem de pulso. Aqui é considerado que o tempo de acionamento é o mesmo para os pulsos gerados, facilitando a interpretação do problema. Nota-se que a amplitude dos coeficientes da série de Fourier para sinal trem de pulso somente positivo, estão discretizados em intervalos de $1/T$ (frequência fundamental do sinal), porém de amplitude menor quando comparados com o sinal do tipo trem de pulso “senoidal”. O sinal de trem de pulso “senoidal” é discretizado em harmônicas ímpares multiplicadas pela frequência fundamental. Uma característica de ambos os sinais de trem de pulso é o decaimento da amplitude do coeficiente da série de Fourier até atingir seu menor valor quando a frequência corresponde a $1/T_{on}$.

Figura 3.8 – Análise de um trem de pulsos para investigar o impacto produzido por um geofone; (a) Domínio do tempo; (b) Coeficientes de Fourier.

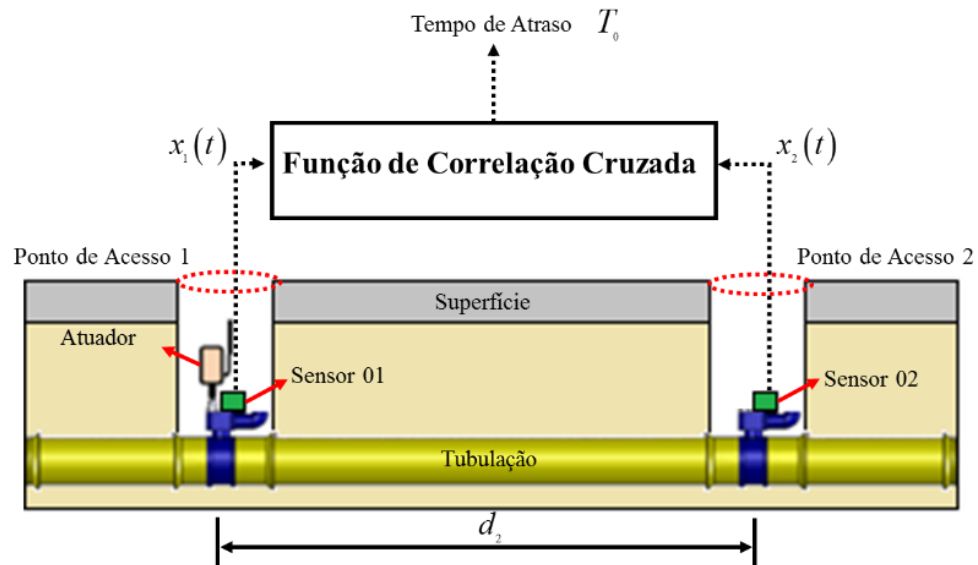


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Simulação do Impacto Produzido pelo Geofone no Modelo do Tubo

Com o intuito de analisar o comportamento do impacto produzido pelo geofone na tubulação para a estimativa da velocidade de propagação, fora realizada uma simulação computacional utilizando o modelo proposto de Gao *et al.* (2004) associado com a metodologia proposta por Almeida *et al.* (2015) para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento. Entretanto, ao invés de utilizar um sinal de vazamento, será utilizado os sinais simulados (impacto) como aqueles gerados pelo atuador, conforme descrito nas seções anteriores. A esquemática do sistema da tubulação do sistema é ilustrada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Esquemática de um sistema de tubulação para a realização da estimativa da velocidade de propagação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros utilizados na elaboração do modelo da tubulação proposta por Gao *et al.* (2004) são detalhados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros da tubulação utilizados para o estudo de caso.

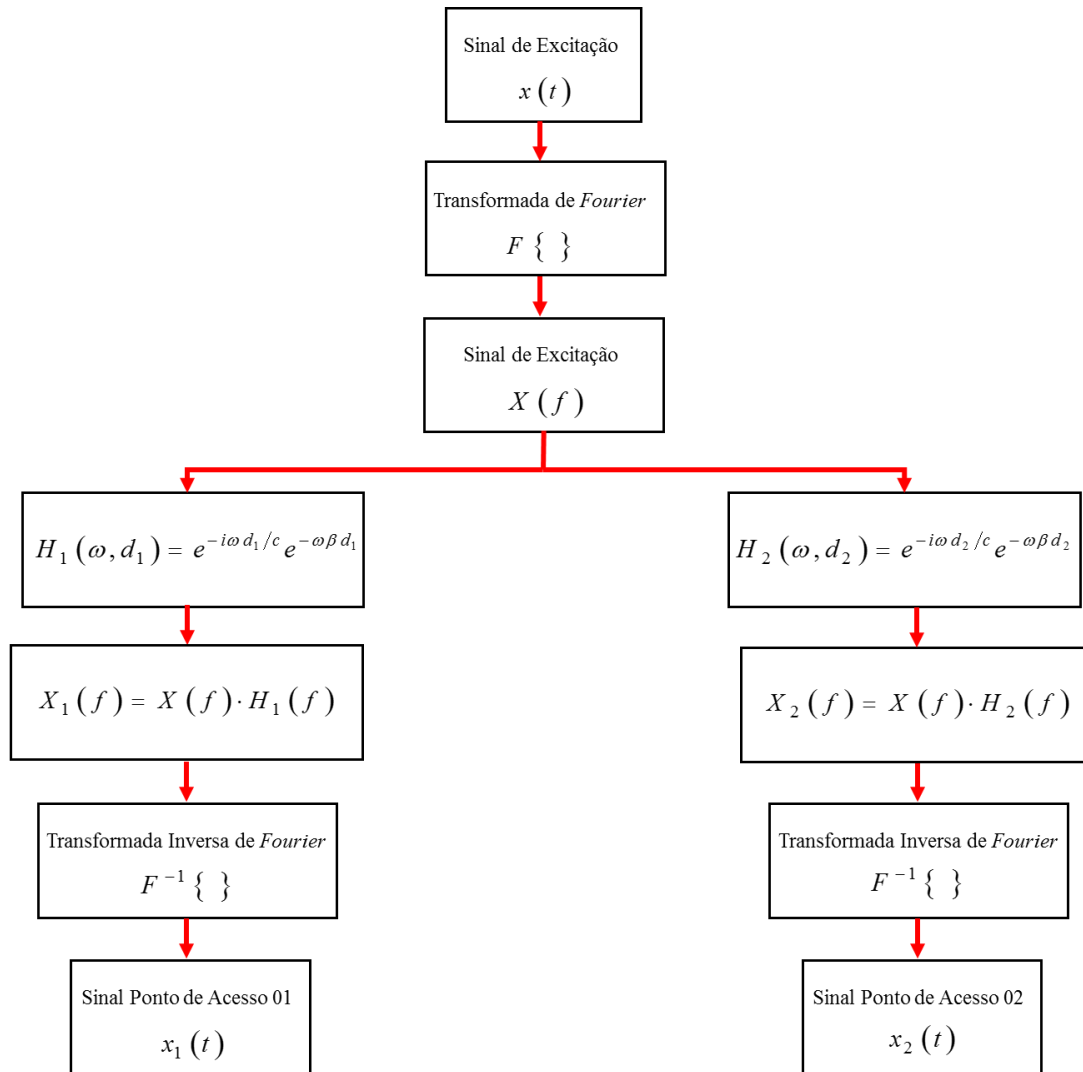
Dados	Valor	Unidade
Frequência de Amostragem [F_a]	8192	Hz
Tempo de Aquisição [T]	10	s
Fator de perda da parede do tubo [η]	0.1	---
Raio do Tubo [a]	35.8	mm
Espessura da parede do tubo [h]	3.4	mm
Módulo de Young do material do tubo [E]	$2 \cdot 10^9$	N/m^2
Módulo de Bulk do fluído [B_w]	$2.25 \cdot 10^9$	N/m^2
Módulo de Cisalhamento [G_s]	$1.8 \cdot 10^8$	N/m^2
Distância 01 [d_1]	0	m
Distância 02 [d_2]	7	m
Velocidade de propagação do fluído livre [c_w]	1500	m/s
Velocidade de propagação da onda [c]	495	m/s

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Fig. 3.10 mostra uma esquemática evidenciando os procedimentos adotados no domínio da frequência para a criação dos sinais correspondentes as medições dos pontos de acesso 01 e 02. O procedimento também foi checado no domínio do tempo utilizando resposta ao impulso e convolução, entretanto, o processamento é mais demorado daquele utilizado no domínio da frequência.

Seguindo o esquema apresentado na Fig. 3.10, o sinal temporal do impacto gerado pelo geofone é transformado para o domínio da frequência através da Transformada de Fourier para em seguida ser multiplicado pelo modelo da tubulação (Resposta em Frequência). O primeiro modelo do tubo $H_1(\omega)$, o valor da distância d_1 é zero, por ser neste ponto de acesso onde o geofone está realizando o impacto, já o segundo modelo do tubo $H_2(\omega)$ que representa o ponto de acesso na outra extremidade da seção da tubulação em análise, a distância corresponderá a distância entre os pontos de acesso. Após a multiplicação do sinal de excitação pelos modelos da tubulação, dois novos sinais serão gerados no domínio da frequência, $X_1(f)$ e $X_2(f)$, correspondentes as medições dos pontos de acesso 01 e 02. Assim, aplica-se a transformada inversa de Fourier para transformar esses sinais para o domínio do tempo.

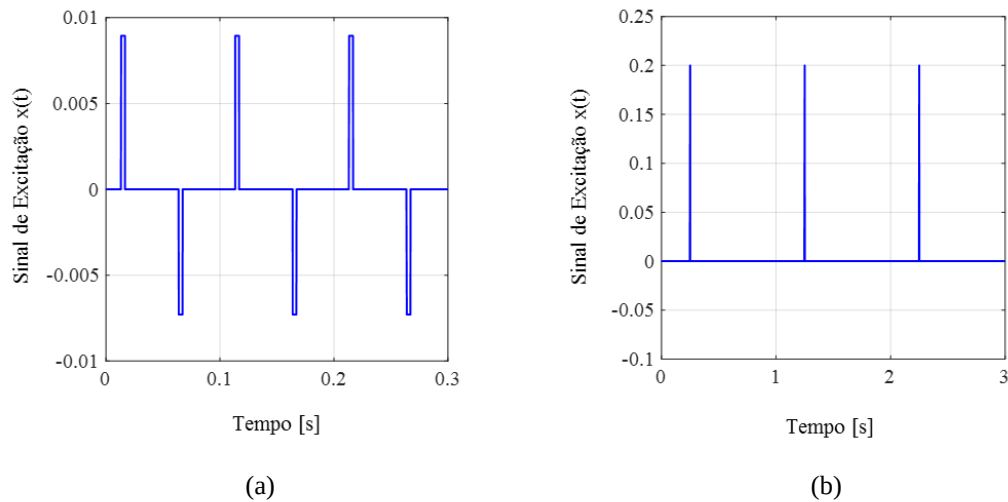
Figura 3.10 – Esquemática dos procedimentos adotados para gerar os sinais dos pontos de acesso 01 e 02.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o primeiro caso a ser exemplificado nesta seção, será utilizado o sinal do tipo senoidal como fonte de excitação do geofone. Como visto na seção anterior, o impacto produzido pelo geofone, quando excitado por tal sinal, assemelha-se a um sinal do tipo trem de pulso, com ciclos positivo e negativo, novamente mostrado na Figura 3.11(a). Já o segundo caso, a que se refere à utilização do sinal do tipo chirp, que atinge de 0 a 1000 Hz em 0.1 segundos, com período de repetição de 1 segundo, assemelha-se a um trem de pulsos com período de repetição de 1 segundo, como mostra a Figura 3.11(b).

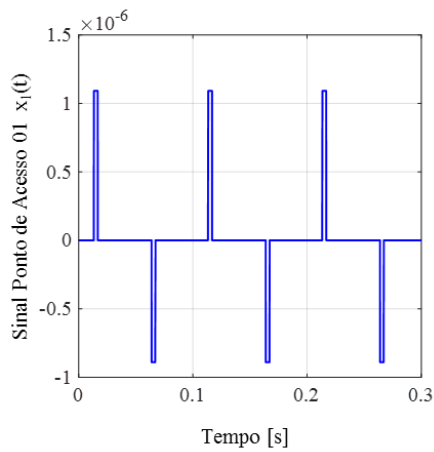
Figura 3.11 – Sinais no domínio do tempo utilizados nesta simulação, representando o impacto proporcionado pelo geofone para dois diferentes tipos de sinal de excitação; (a) Caso 01 – Sinal Senoidal; (b) Caso 02 – Sinal Chirp.



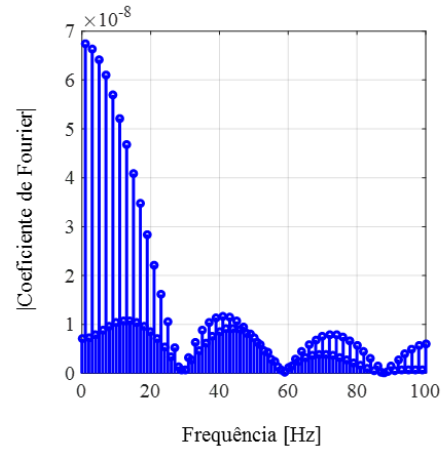
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Fig.3.12 mostra os resultados gráficos obtidos para o caso 1. Nas Fig.3.12(a) e 3.12(c) são mostrados os sinais correspondentes as medições nos pontos de acesso 1 e 2 no domínio do tempo, enquanto nas Fig.3.12(b) e 3.12(d) são mostrados os coeficientes de Fourier desses sinais. Nas Fig.3.12(e) é mostrado o resultado gráfico obtidos para a estimativa do tempo de atraso entre os sinais através da fase da densidade espectral, onde fora obtido um valor de 14.14ms. Seu comportamento se deu de forma linear, porém com leves ondulações ao longo da reta, tais ondulações possivelmente estão associadas com a alteração da fase entre os sinais, uma vez que, ambos os sinais são periódicos e com alterações de pulsos positivo e negativo. A Fig.3.12(f) mostra o resultado gráfico obtido através da função de correlação cruzada entre os sinais, cujo resultado foi de 14.16ms. Vale informar, que ambos os sinais foram filtrados de 100 a 600 Hz. Por se tratar de sinais periódicos e com alterações dos pulsos (positivo/negativo), pode-se observar no gráfico da correlação uma intercalação entre um pico positivo e outro negativo. O que não acontece para um sinal de excitação do tipo chirp, pois este apresenta apenas pulsos positivos.

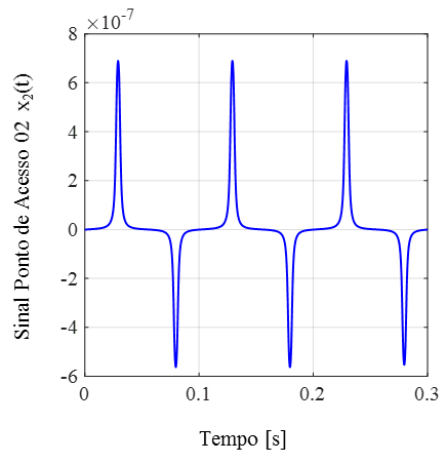
Figura 3.12 – Resultados gráficos obtidos para o Caso 01; (a) Sinal no domínio do tempo do ponto de acesso 1; (b) Coeficiente da série de Fourier para o sinal do ponto de acesso 1; (c) Sinal no domínio do tempo do ponto de acesso 2; (d) Coeficiente da série de Fourier para o sinal do ponto de acesso 2; (e) Fase da Densidade Espectral Cruzada; (f) Coeficiente de Correlação Cruzada.



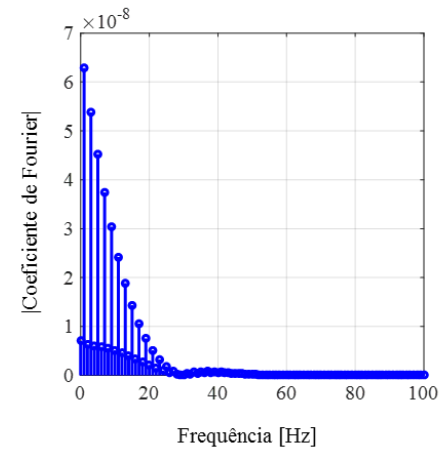
(a)



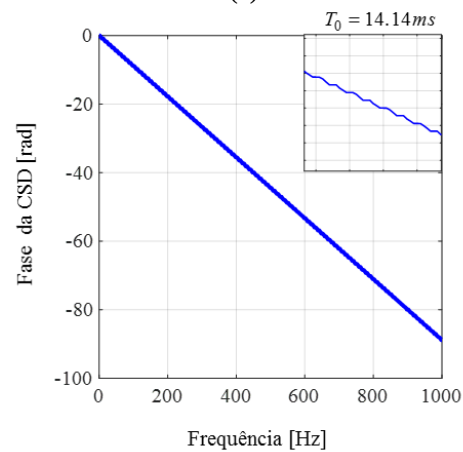
(b)



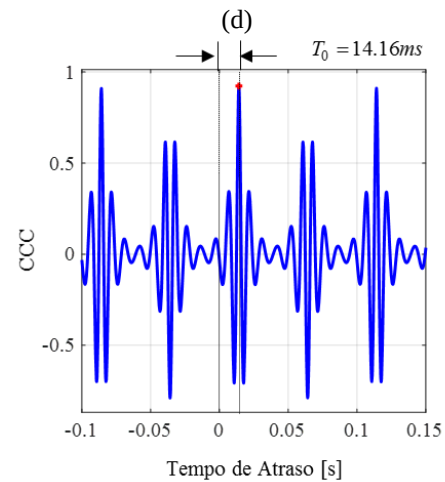
(c)



(d)



(e)



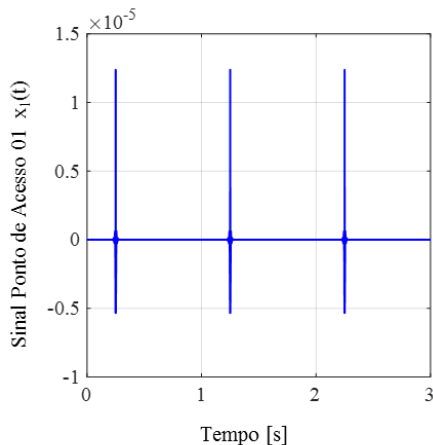
(f)

Fonte: Elaborado pelo autor.

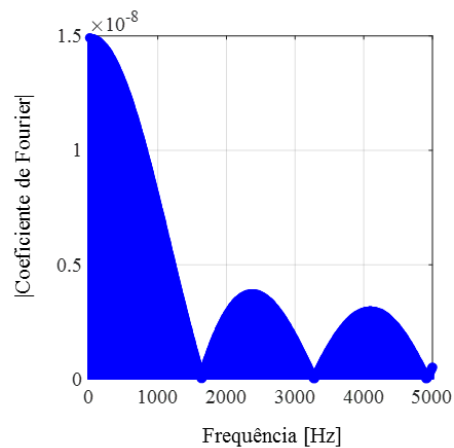
Da mesma forma, são apresentados na Figura 3.13, os resultados para o sinal de impacto do geofone equivalente ao sinal do tipo chirp. Em relação aos resultados gráficos obtidos para a estimativa do tempo de atraso entre os sinais, vide Fig.3.13(e) e 3.13(f), tais resultados apresentaram os mesmos valores de tempo de atraso do caso anterior, porém com algumas diferenças no formato gráfico. A fase da densidade espectral cruzada, forneceu como resposta um tempo de atraso de 14.14ms, entretanto as ondulações em sua extensão foram suavizadas e praticamente não aparecem. Já a função de correlação cruzada, apontou como uma diferença de tempo entre os sinais de 14.16ms, porém o período de repetição entre os picos da correlação aumentou, o que acaba facilitando a visualização do pico característico ao tempo de atraso entre os sinais em análise.

Assim, pode-se concluir que ambos os casos apresentaram resultados próximos quanto a estimativa do tempo de atraso entre os sinais, entretanto, o segundo caso se destaca por apresentar um resultado gráfico mais simples e de fácil visualização do tempo de atraso.

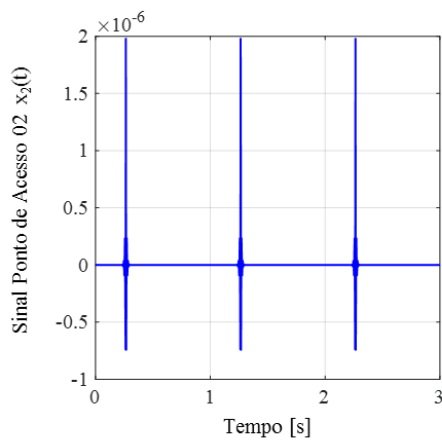
Figura 3.13 – Resultados gráficos obtidos para o Caso 02; (a) Sinal no domínio do tempo do ponto de acesso 1; (b) Coeficiente da série de Fourier para o sinal do ponto de acesso 1; (c) Sinal no domínio do tempo do ponto de acesso 2; (d) Coeficiente da série de Fourier para o sinal do ponto de acesso 2; (e) Fase da Densidade Espectral Cruzada; (f) Coeficiente de Correlação Cruzada.



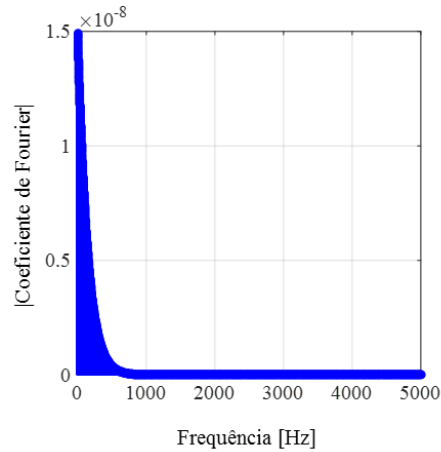
(a)



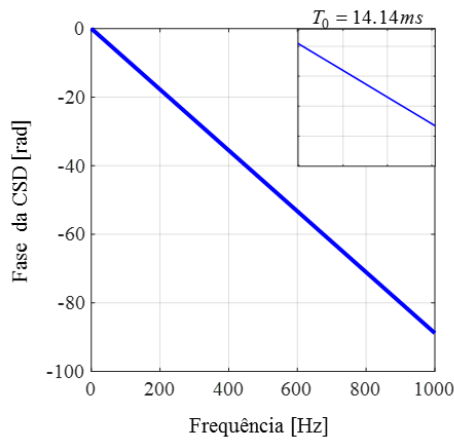
(b)



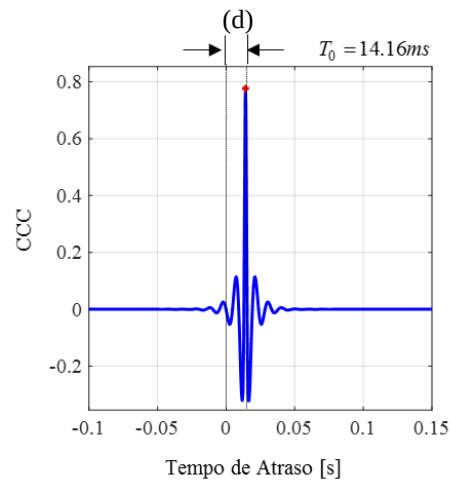
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Conclusão

Neste capítulo, foi realizada uma investigação sobre o uso do geofone como atuador para gerar vibração. Iniciou-se o estudo analisando o impacto produzido por um geofone quando configurado para operar de modo reverso, agindo então como um atuador. Foi realizado um experimento que consistia em analisar a força produzida através do impacto produzido pelo geofone, quando excitado por dois tipos de sinais, um senoidal e o outro sinal do tipo chirp. Em seguida foi proposto um modelo que representasse o impacto produzido pelo geofone, com o objetivo de buscar uma aproximação com o resultado experimental, possibilitando assim realizar análises, buscando determinar um padrão de comportamento apresentado pelo geofone, quando esse agindo como atuador. Por fim, foi realizada uma simulação computacional, onde fora utilizada a metodologia proposta por Almeida (2015), baseada na utilização de impactos na tubulação para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento, associada ao modelo da tubulação proposto por Gao *et al.* (2004), fazendo uso dos modelos desenvolvidos

referentes ao impacto do geofone como fonte de excitação em um dos pontos de acesso. Com a realização desta simulação, ambos os sinais apresentaram o mesmo resultado de tempo de atraso, entretanto foi possível constatar que o sinal do tipo chirp apresentou resultados gráficos mais simples e de fácil entendimento para a determinação do tempo de atraso entre os sinais. No capítulo seguinte serão mostrados resultados obtidos experimentalmente em um campo de prova, onde foi utilizado o geofone como atuador para estimar a velocidade de propagação do ruído de vazamento em uma seção de tubulação subterrânea de água.

CAPÍTULO 04 - DESCRIÇÃO DO CAMPO DE PROVA E EXPERIMENTOS REALIZADOS

4.1 Introdução

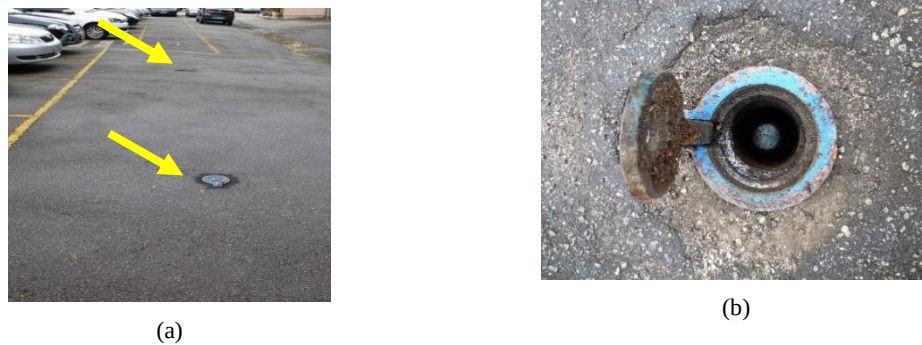
Serão apresentados neste capítulo os resultados obtidos experimentalmente realizados em um campo de prova construído para testar e validar métodos acústicos. O campo de prova mencionado é utilizado para simular condições de vazamentos reais em um ambiente controlado. Este (campo de prova) também é descrito nesse capítulo. Entretanto, este capítulo tem como principal objeto o estudo da estimativa da velocidade do ruído de vazamento ao longo de uma seção de uma tubulação de plástico do tipo PVC enterrada, compatível com aquelas encontradas em situações reais no país.

Para o cálculo da velocidade, foi utilizado dois tipos diferentes métodos de excitação. O primeiro método utilizou a vibração produzida por impactos gerados por um atuador instalado em um dos pontos de acesso da seção da tubulação em análise. O segundo método utilizou como fonte de excitação a vibração produzida por um vazamento (externo) localizado fora da seção da tubulação em análise. A localização do vazamento interno também foi investigada utilizando a estimativa da velocidade juntamente com o atraso de sinal. Além dos tipos diferentes de metodologias de excitação, foi utilizado dois tipos de atuadores. Um deles é o geofone descrito no Capítulo 3 que fora caracterizado e o outro, para validar as medidas do geofone, é um atuador eletromecânico comercial comumente utilizado em ensaios vibro-acústico.

4.2 Descrição do Campo de Prova e Caracterização

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) é uma empresa brasileira que detém a concessão dos serviços públicos, responsáveis pelo abastecimento de água e de coleta de esgotos em 363 dos 645 municípios do estado de São Paulo, atendendo cerca de 28 milhões de pessoas. Os experimentos foram realizados em uma parte do campo de provas da SABESP em São Paulo (SP), utilizado para realização de testes em equipamentos de detecção de vazamento e treinamento de pessoal, vide a Figura 4.1. A Figura 4.1(a) mostra uma visão geral do campo de prova, pontos de acesso, bem como, a superfície de massa asfáltica. A Figura 4.1(b) mostra em detalhes, um dos pontos de acesso utilizado para medir a vibração do tubo enterrado.

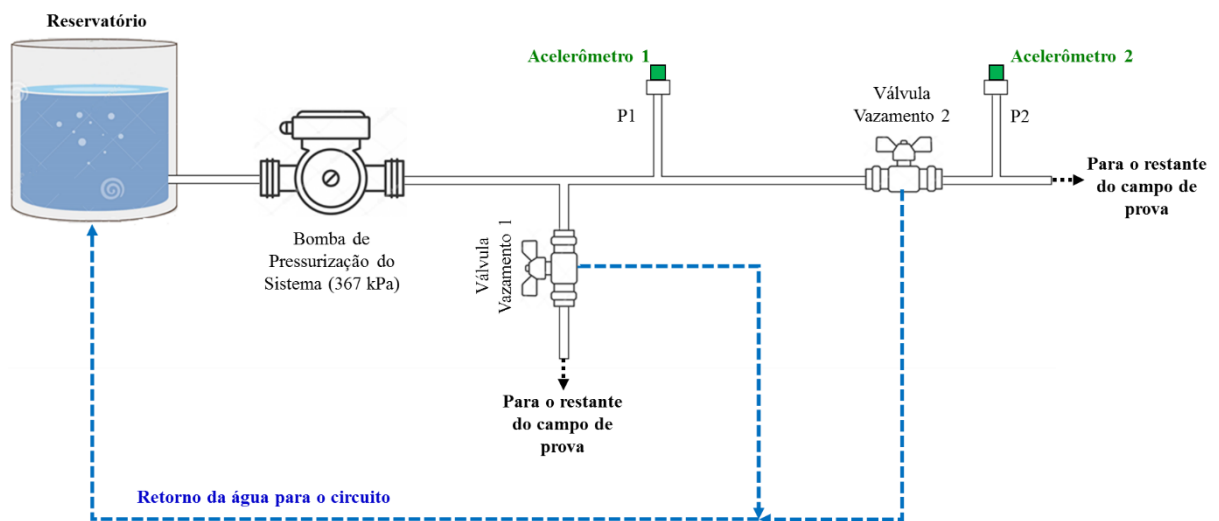
Figura 4.1 – Fotografias tiradas dentro das instalações da SABESP; (a) Tampas onde são encontrados os pontos de acesso; (b) Ponto de acesso à tubulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor visualização do campo de prova, é mostrado um diagrama esquemático do campo de prova na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Esquemático do campo de prova que simula vazamentos em um ambiente controlado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma bomba centrífuga é utilizada para pressurizar o sistema, ou seja, o campo de prova não é conectado as tubulações de água da companhia. A bomba utiliza água proveniente em um reservatório responsável por alimentar o campo de prova. Os vazamentos são gerados através da abertura de válvulas (torneiras), onde a água é desviada por um ramal e retorna para um reservatório que é utilizado para alimentar o sistema de tubulação, como pode ser observado na Fig. 4.2. A seção do campo de prova onde os experimentos foram realizados é feita de material plástico do tipo PVC e está enterrado a aproximadamente 0,5 metros de profundidade. Os pontos de medida são conectados por tubos com 25 cm de comprimento. As características

geométricas e construtivas da tubulação utilizada no campo de prova são apresentados na tabela 4.1.

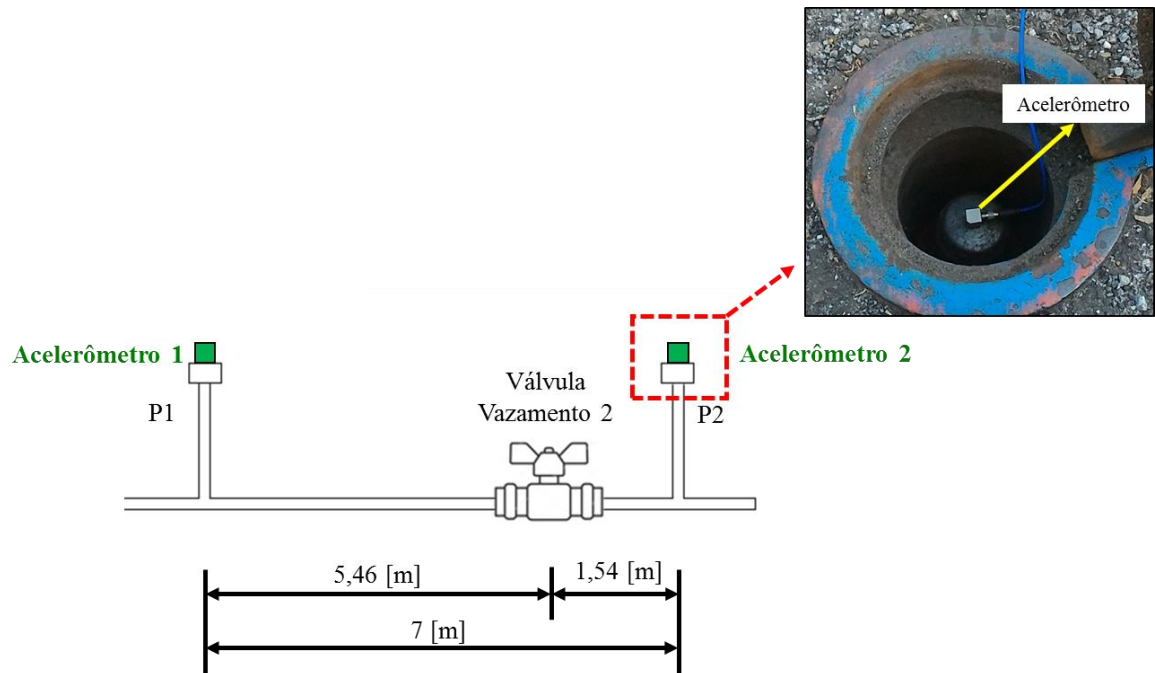
Tabela 4.1 – Propriedades da seção da tubulação.

Dados	Valor	Unidade
Raio do Tubo [a]	35.8	mm
Espessura da parede do tubo [h]	3.4	mm
Módulo de Young do material do tubo [E]	$2 \cdot 10^9$	N/m^2
Módulo de Bulk do fluído [B_w]	$2.25 \cdot 10^9$	N/m^2
Módulo de Cisalhamento [G_s]	$1.8 \cdot 10^8$	N/m^2
Velocidade de onda do fluído [c_w]	1500	m/s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uma melhor compreensão do funcionamento da técnica de correlação-cruzada e como as medidas foram tomadas, será feito uma simulação de vazamento real utilizando o campo de prova descrito anteriormente. Foi escolhido dois pontos de medição distantes 7 metros entre si, sendo que o vazamento está 1,54m distante de um dos pontos de medida. A Figura 4.3 mostra o esquemático da medição realizada, enfatizando as distâncias mencionadas anteriormente. Para a aquisição de sinais foi utilizado um sistema de aquisição da SIEMENS modelo SCADA XS com uma frequência de amostragem de 8192 Hz, com tempo de aquisição de 60 segundos. Os acelerômetros utilizados foram acelerômetros ICP® da PCB Piezotronics, modelo 333B30 com sensibilidade de ($\pm 10\%$) 100 mV/g (10.2 mV/(m/s²)).

Figura 4.3 – Esquemático do campo de prova que simula vazamentos em um ambiente controlado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.4(a) mostra o sistema de aquisição, enquanto a Fig.4.4(b) mostra a instalação de um acelerômetro em um ponto de acesso.

Figura 4.4 – Fotografias de componentes utilizados na realização do experimento em campo; (a) Sistema de aquisição Siemens LMS SCADA XS; (b) Acelerômetro PCB modelo 333B30 instalado em um ponto de acesso.



(a)

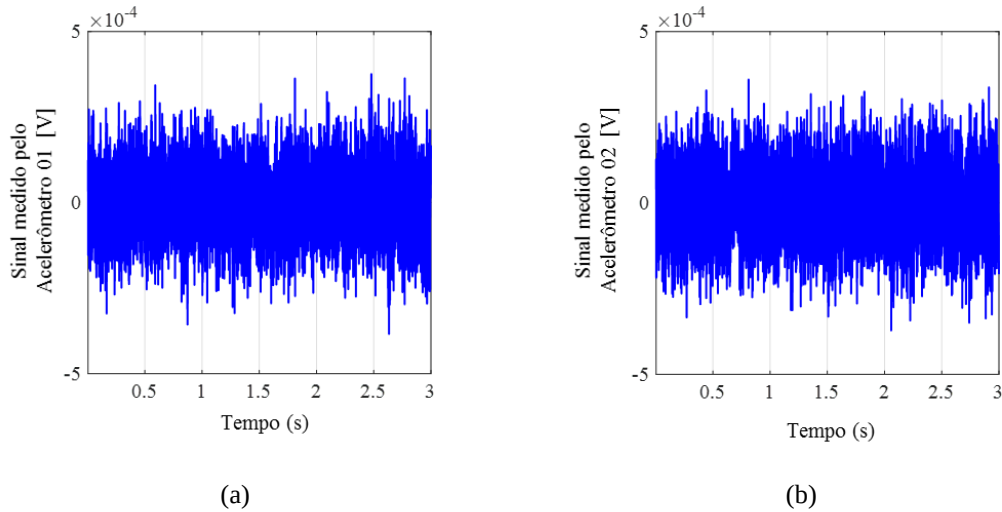


(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O sinal temporal adquirido pelos acelerômetros nos pontos 1 e 2 são mostrados na Figura 4.5(a) e 4.5(b), respectivamente.

Figura 4.5 – Sinal temporal obtido na medição do ruído de vazamento 02; (a) Sinal medido com o acelerômetro 01 instalado no ponto de acesso 01 ;(b) Sinal medido com o acelerômetro 02 instalado no ponto de acesso 02.

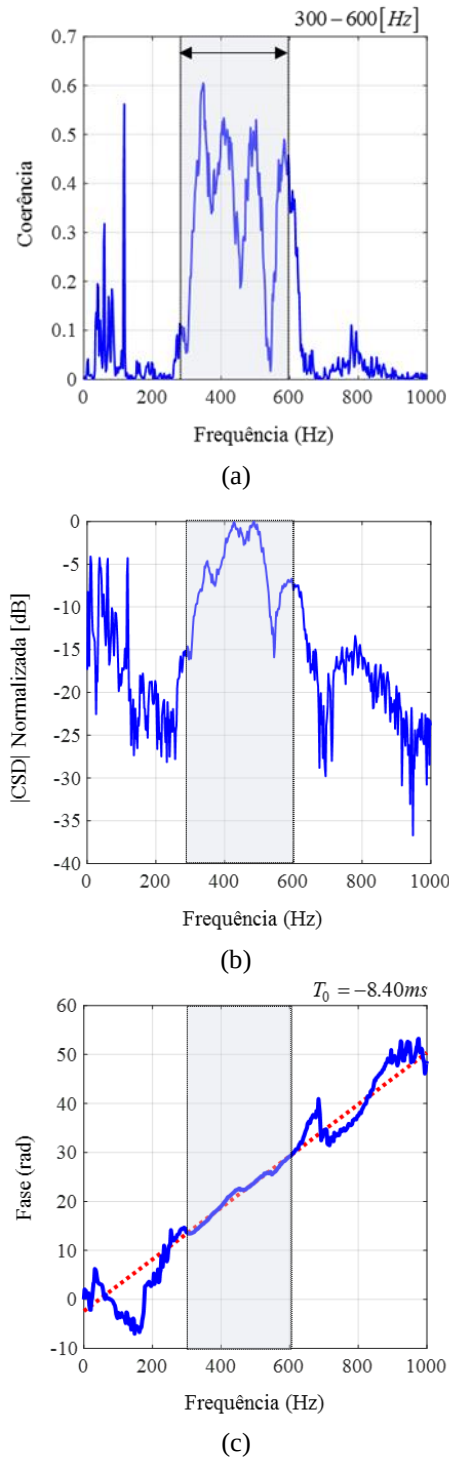


Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de atraso entre dois sinais pode ser estimado de duas maneiras ou no domínio do tempo ou no domínio da frequência. No domínio do tempo, a função de correlação-cruzada é utilizada para calcular o tempo de atraso, uma vez que o pico desta função corresponde ao tempo de atraso entre dois sinais (SHIN; HAMMOND, 2008). No domínio da frequência o tempo de atraso é obtido através do gradiente de inclinação da fase da densidade espectral cruzada.

A Figura 4.6 mostra os resultados gráficos obtidos na análise realizada para a localização do vazamento entre os pontos de acesso. Para a determinação da densidade espectral entre os sinais, fora utilizado um janelamento do tipo *Hanning* com 50% de sobrepasso (*overlap*) e com 4096 pontos da FFT (*Fast Fourier Transform*). Isto resulta em uma resolução da frequência de 2 Hz e uma resolução no domínio do tempo de 0.122 ms. O tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral cruzada para a faixa de frequência de 300 a 600 Hz foi de -8.40 ms, vide Fig. 4.6(c).

Figura 4.6 – Resultados obtidos na medição do ruído de vazamento 02 localizado entre os pontos de acesso; (a) Coerência; (b) Módulo da CSD Normalizado; (c) Fase da CSD. — Sinal Medido; - - - Reta estimada.

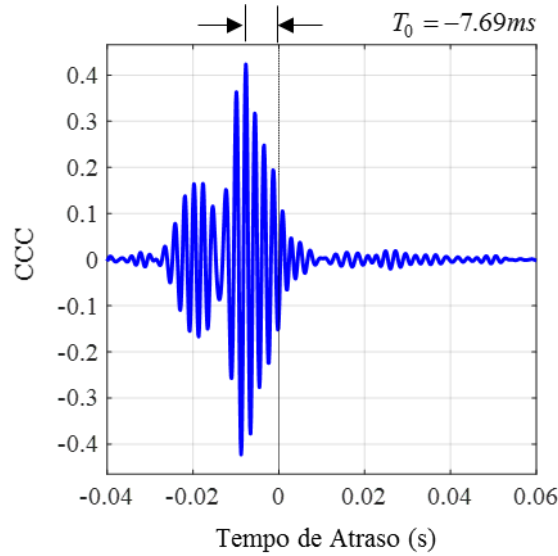


Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação cruzada calculado após a aplicação de um filtro passa-faixa de 300 a 600 Hz (faixa de frequência onde a fase da densidade espectral cruzada entre os sinais medidos apresentou comportamento linear, ou seja, é nesta faixa onde a energia do vazamento

está concentrada) nos sinais medidos no domínio do tempo, é mostrado na Fig. 4.7, onde o tempo estimado fora de -7.69 ms.

Figura 4.7 – Coeficiente de correlação cruzada calculado entre os sinais medidos quando um vazamento está presente entre os pontos de acesso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Note que para esta análise, os valores correspondentes ao tempo de atraso são negativos, o que indica que o vazamento está mais próximo ao acelerômetro 2, que está instalado no ponto de acesso 02, quando comparado com o acelerômetro 1 que se encontra no ponto de acesso 01.

Como mencionado, um vazamento foi gerado entre os pontos de acesso (vazamento 02) como mostra a Fig. 4.3. A função de correlação-cruzada dos sinais medidos foi então implementada, fornecendo então um tempo de atraso T_0 . O próximo passo então é a estimativa da localização do vazamento fazendo uso da Eq. 2.1, esta por comodidade é novamente mostrada abaixo:

$$d_1 = \frac{d - cT_0}{2} \quad (4.1)$$

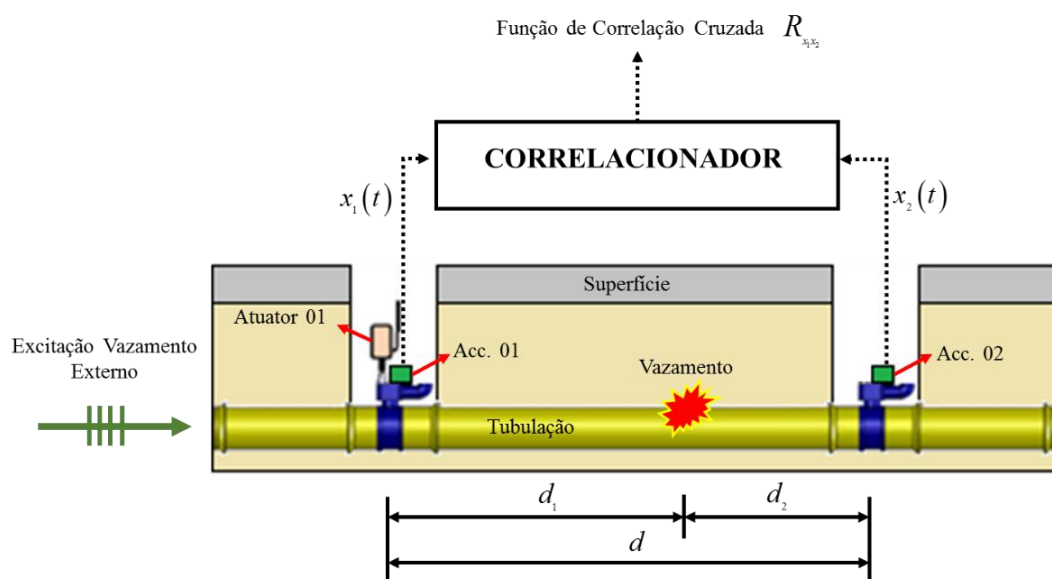
Como pode-se notar, a variável c , que representa a velocidade de propagação do ruído de vazamento, ainda não é conhecida, dessa forma, faz-se necessário estimar tal valor. Entretanto, conhecendo as distâncias entre os pontos de acesso e a posição do vazamento é possível estimar um valor para a velocidade de propagação do ruído de vazamento fazendo uso da Eq. 4.1. Ao utilizar o valor de tempo de atraso obtido pela fase da densidade espectral cruzada cujo valor é -8.40ms, a distância entre o ponto de acesso 01 até o vazamento igual a 5.46m, a velocidade de propagação do ruído de vazamento corresponderá a 467 m/s. Da mesma

forma, ao utilizar o resultado do tempo de atraso obtido pelo coeficiente de correlação cruzada, cujo valor foi de -7.69ms, o valor da velocidade de propagação corresponderá a 510 m/s. Dessa forma, acredita-se que o valor da velocidade estará nesta faixa de valores, calculando a média entre os dois resultados obtidos o valor da velocidade de propagação obtido é de 488.5 (± 21.5) m/s.

4.3 Procedimento Experimental Utilizado na Investigação da Estimativa da Velocidade do Ruído de Vazamento

Como mencionado anteriormente, a técnica da estimativa da velocidade do ruído de vazamento consiste na utilização de atuadores e sensores instalados na tubulação nos pontos de acesso. Na Fig. 4.8 é mostrado um esquemático da montagem experimental da técnica proposta no qual uma seção da tubulação é delimitada por dois pontos de acesso (ponto de acesso 01 e ponto de acesso 02). Os sensores utilizados durante os experimentos foram acelerômetros e por isso muda-se aqui a legenda “sensor” para “Acc”, visando facilitar o entendimento dos procedimentos adotados. O atuador utilizado como fonte externa de excitação é mostrado no ponto de acesso 01. Também é mostrada a excitação proveniente de um vazamento localizado fora da seção da tubulação, enfatizando assim os dois mecanismos utilizados como fonte externa para excitar a tubulação.

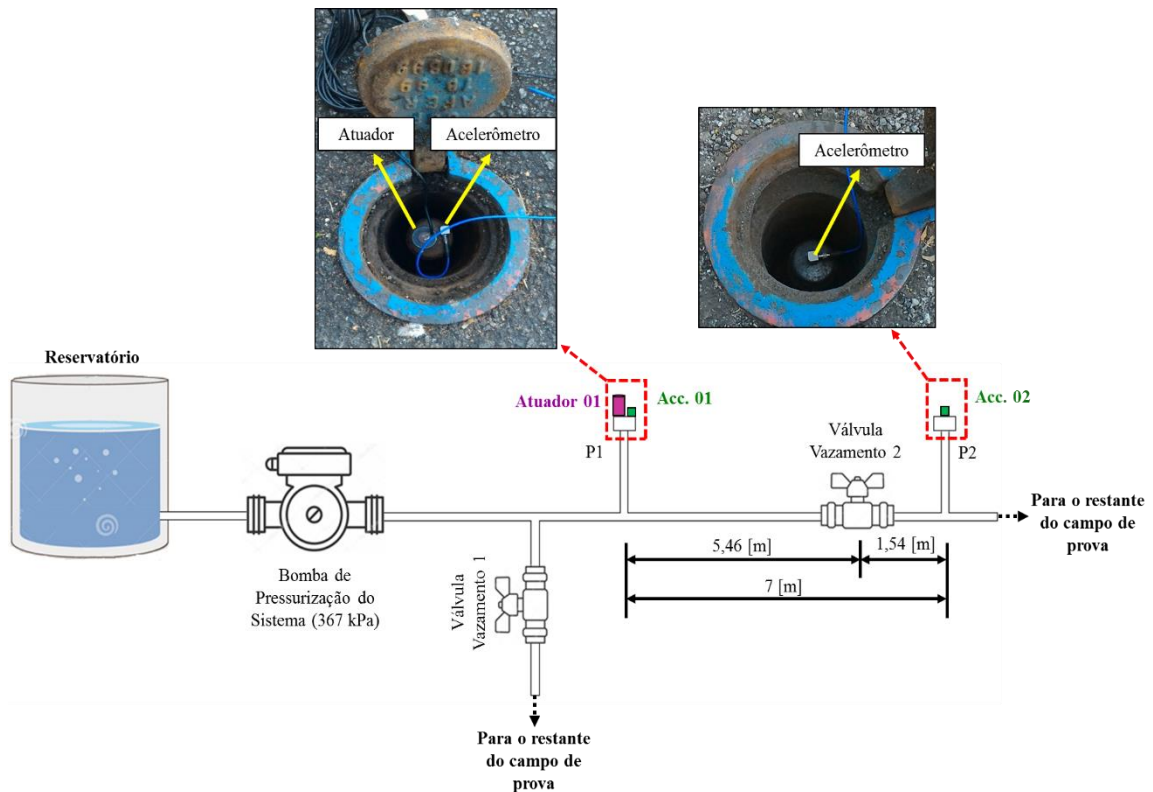
Figura 4.8 – Esquema de uma tubulação preparada para detecção de vazamentos utilizando sinais vibro-acústicos com vazamento entre os dois sensores. Também é mostrado um atuador no ponto de acesso 01 para a medição da velocidade.



Fonte: Adaptado de Almeida (2017).

A Fig. 4.9 mostra um diagrama esquemático de como foi feita implementação da metodologia proposta, aplicada ao campo de provas da SABESP.

Figura 4.9 – Esquemático da seção campo de prova da SABESP onde serão realizados os experimentos.

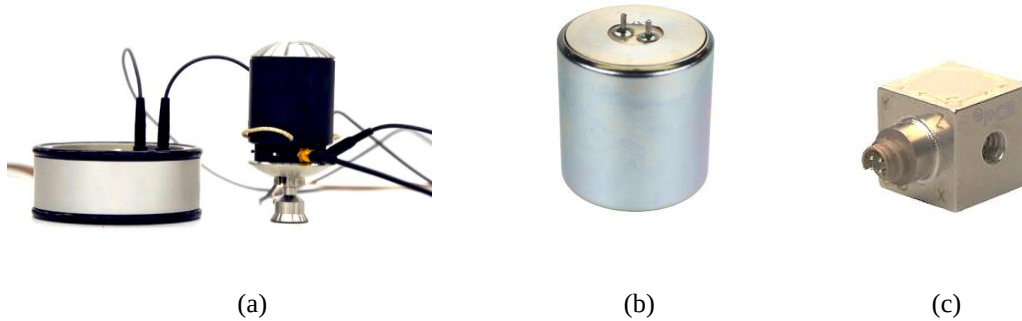


Fonte: Elaborado pelo autor.

Parte da metodologia proposta por Almeida *et al.* (2015) foi utilizada para a obtenção da velocidade de propagação do ruído de vazamento na seção da tubulação P1-P2. O primeiro método aplicado, foi a utilização de um vazamento fora da seção da tubulação como fonte de vibração (vazamento 01). O segundo método utilizou a vibração provocada pelo atuador para excitar a tubulação. Foram utilizados dois tipos diferentes de atuadores: um atuador comercial (*Integral Shaker – LMS Qsources Excitation Hardware*) e o segundo foi um sensor do tipo geofone configurado de modo reverso, de forma a gerar impactos quando a massa inercial em seu interior colidir com seu invólucro. A Figura 4.10 mostra os atuadores e sensores utilizados.

De maneira geral, a excitação vibratória produzida pela fonte externa (atuador) irá se propagar do ponto de acesso P1 para o ponto de acesso P2, e em ambos os pontos de acesso foram utilizados acelerômetros (PCB – 333B30) para fazer a coleta das medições.

Figura 4.10 – Componentes utilizados; (a) Integral Shaker – LMS Qsources Excitation Hardware; (b) Geofone; (c) Acelerômetro PCB.



Fonte: (a) <https://pbs.twimg.com/media/Cjxq5WYUoAA3d8W.jpg> - Acesso em: 13/09/2017

(b) <http://geospace.com> - Acesso em: 13/09/2017

(c) <http://www.pcb.com> - Acesso em: 13/09/2017

Na Fig. 4.11 são mostradas algumas fotografias tiradas do experimento.

Figura 4.11– Fotografia do experimento realizado para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento; (a) Atuador LMS instalado no ponto de acesso juntamente com um acelerômetro PCB; (b) Geofone instalado juntamente com um acelerômetro no ponto de acesso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi realizada a função de correlação-cruzada dos sinais medidos para calcular o tempo de atraso gasto T_0 para a onda percorrer a trajetória da seção da tubulação. Combinando este resultado, juntamente com a distância entre os pontos de acesso d , a velocidade de propagação do ruído de vazamento pode então ser calculada através da seguinte equação:

$$c = \frac{d}{T_0} \quad (4.2)$$

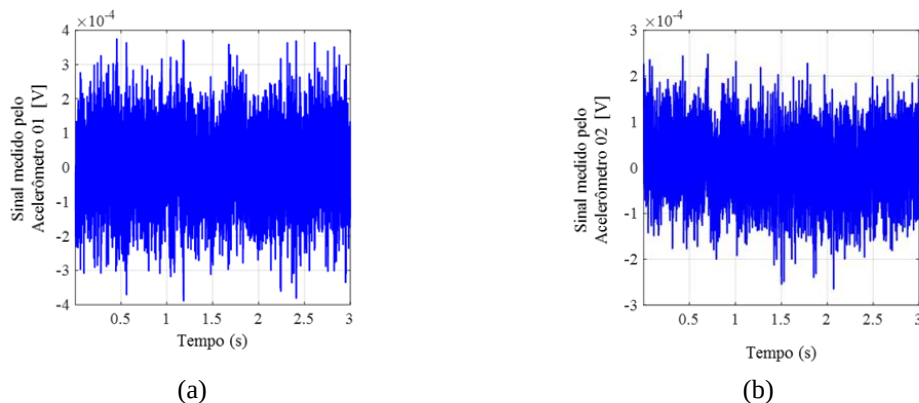
Para a determinação da densidade espectral entre os sinais, foi utilizado um janelamento do tipo *Hanning* com 50% de sobrepasso (*overlap*) e com 4096 pontos da FFT (*Fast Fourier Transform*). Isto resulta em uma resolução da frequência de 2 Hz e uma resolução no domínio do tempo de 0.122 ms. Para cada medição mostrada nesta seção, foi utilizada uma faixa de frequência diferente, devido ao fato de que a frequência onde a energia do impacto/vazamento se concentra é diferente de caso a caso.

4.3.1 Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado um vazamento localizado fora da seção da tubulação como fonte excitadora

Foi utilizado os mesmos componentes descritos na seção anterior, porém por comodidade serão novamente citados aqui. Para a aquisição de sinais o sistema de aquisição da SIEMENS modelo SCADA XS com uma frequência de amostragem de 8192 Hz, com tempo de aquisição de 60 segundos. Os acelerômetros utilizados foram acelerômetros ICP® da PCB Piezotronics, modelo 333B30 com sensibilidade de ($\pm 10\%$) 100 mV/g ($10.2 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$).

A Figura 4.12 mostra os sinais capturados pelos acelerômetros quando utilizado um vazamento fora da seção da tubulação como fonte excitadora para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento. O sinal temporal adquirido pelos acelerômetros nos pontos 1 e 2 são mostrados na Figura 4.12(a) e 4.12(b), respectivamente.

Figura 4.12 – Sinal temporal obtido quando utilizado o vazamento 01 localizado fora da seção da tubulação em análise; (a) Sinal medido com o acelerômetro 01 instalado no ponto de acesso 01 ;(b) Sinal medido com o acelerômetro 02 instalado no ponto de acesso 02.

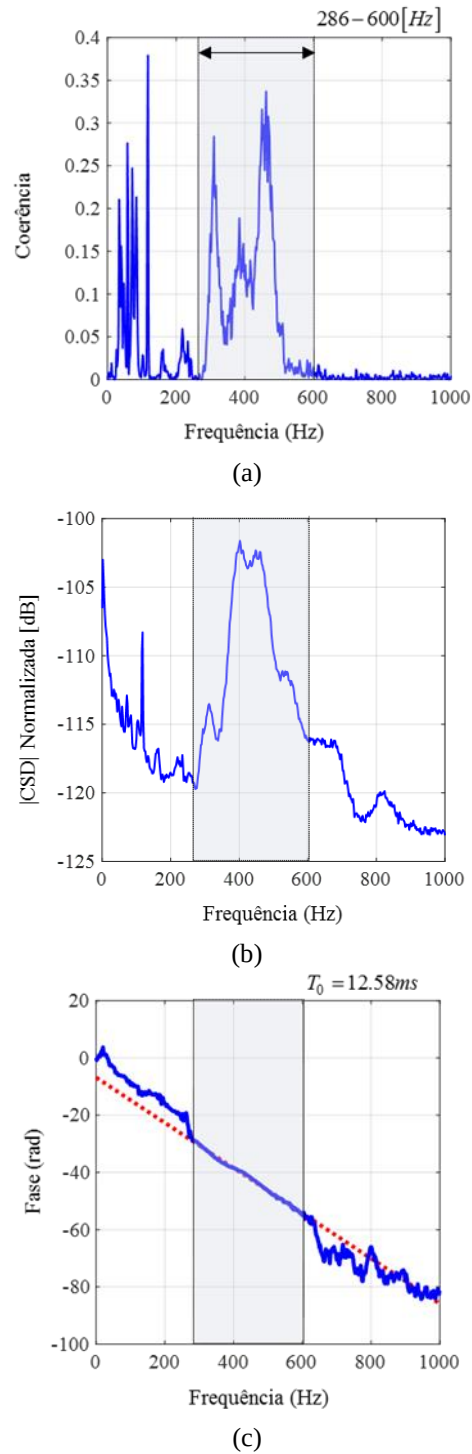


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.13 mostra os resultados gráficos obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado um vazamento externo como fonte de excitação. O tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral

cruzada para a faixa de frequência de 286 a 600 Hz foi de 12.58 ms, que equivale a uma velocidade de 556 m/s, vide Fig. 4.13(c).

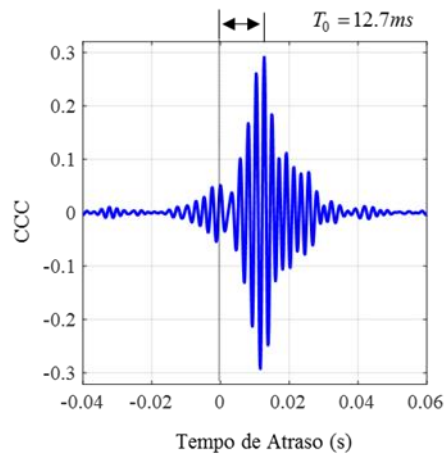
Figura 4.13 – Resultados obtidos na medição do ruído de vazamento 01 localizado fora da seção da tubulação acesso; (a) Coerência; (b) Módulo da CSD Normalizado; (c) Fase da CSD; — Sinal Medido; Reta estimada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação cruzada após a aplicação do filtro passa-faixa (286 a 600 Hz) nos sinais no domínio do tempo pode ser visto na Fig. 4.14. O tempo de atraso calculado foi de 12.70 ms que corresponde a uma velocidade de propagação de 551 m/s.

Figura 4.14 – Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais medidos quando um vazamento externo é utilizado como fonte de excitação.

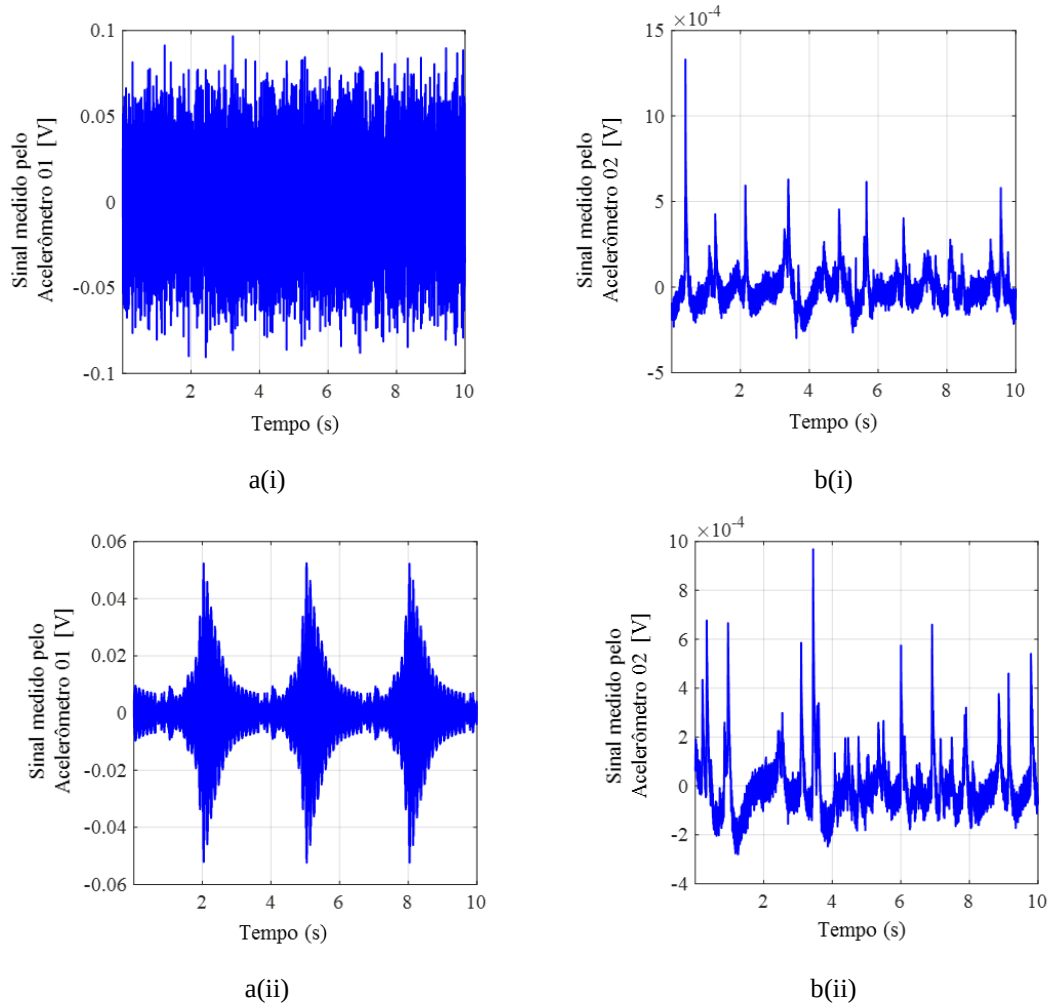


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado um atuador comercial para impactar a tubulação

O atuador comercial (*Integral Shaker – LMS Qsources Excitation Hardware*) foi utilizado realizar impactos a tubulação, onde duas medições foram realizadas com diferentes tipos de sinal de excitação. O primeiro sinal utilizado foi um sinal do tipo chirp (de 10 a 2000 Hz em 5 segundos) sendo repetido periodicamente, o segundo sinal utilizado foi um sinal do tipo randômico. A Figura 4.15 mostra os sinais capturados pelos acelerômetros quando utilizado o atuador da LMS para impactar a tubulação. O sinal temporal adquirido pelos acelerômetros nos pontos 1 e 2 são mostrados na Figura 4.15(a) e 4.15(b), respectivamente.

Figura 4.15 – Sinal temporal obtido quando utilizado um atuador comercial LMS para impactar a tubulação. A legendas ‘i’ e ‘ii’ correspondem aos sinais medidos quando utilizado um sinal de excitação do tipo randômico e chirp para excitar o atuador, respectivamente; (a) Sinal medido com o acelerômetro 01 instalado no ponto de acesso 01 ;(b) Sinal medido com o acelerômetro 02 instalado no ponto de acesso 02.

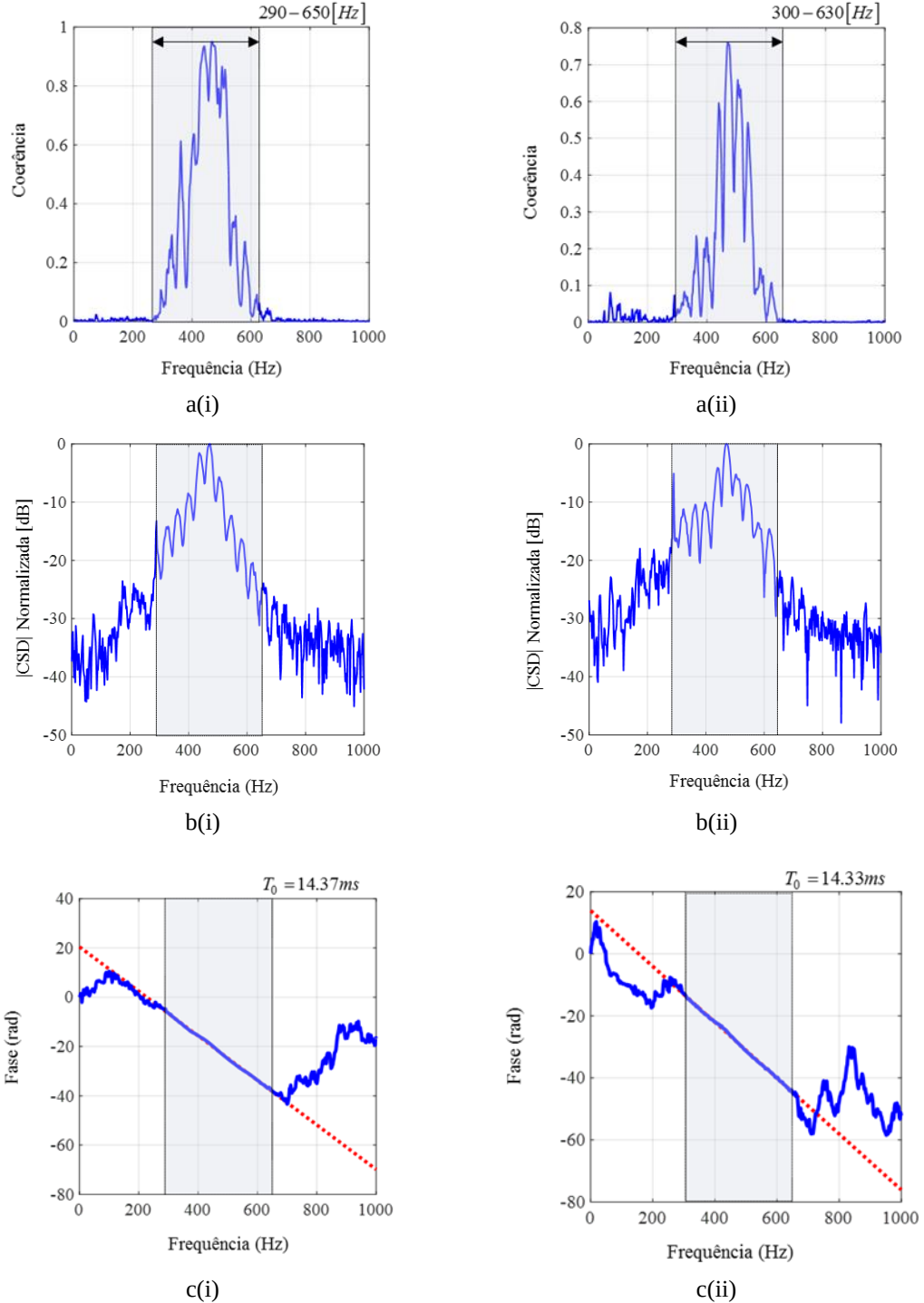


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.16 (i) mostra os resultados obtidos no domínio da frequência para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado um atuador comercial LMS sendo excitado por um sinal do tipo randômico. O tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral cruzada para a faixa de frequência de 290 a 650 Hz foi de 14.37 ms, que equivale a uma velocidade de 487 m/s, vide Fig. 4.16c (i).

A Figura 4.16 (ii) mostra os resultados gráficos obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado um atuador comercial LMS sendo excitado por um sinal do tipo chirp. O tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral cruzada para a faixa de frequência de 300 a 630 Hz foi de 14.33 ms, que equivale a uma velocidade de 488 m/s, vide Fig. 4.16c (ii).

Figura 4.16 – Resultados obtidos quando utilizado um atuador comercial LMS para impactar a tubulação no ponto de acesso 01 sob a excitação de um sinal do tipo randômico. A legendas ‘i’ e ‘ii’ correspondem aos sinais medidos quando utilizado um sinal de excitação do tipo randômico e chirp para excitar o atuador, respectivamente; (a) Coerência; (b) Módulo da CSD Normalizado; (c) Fase da CSD; — Sinal Medido; - - - Reta estimada.



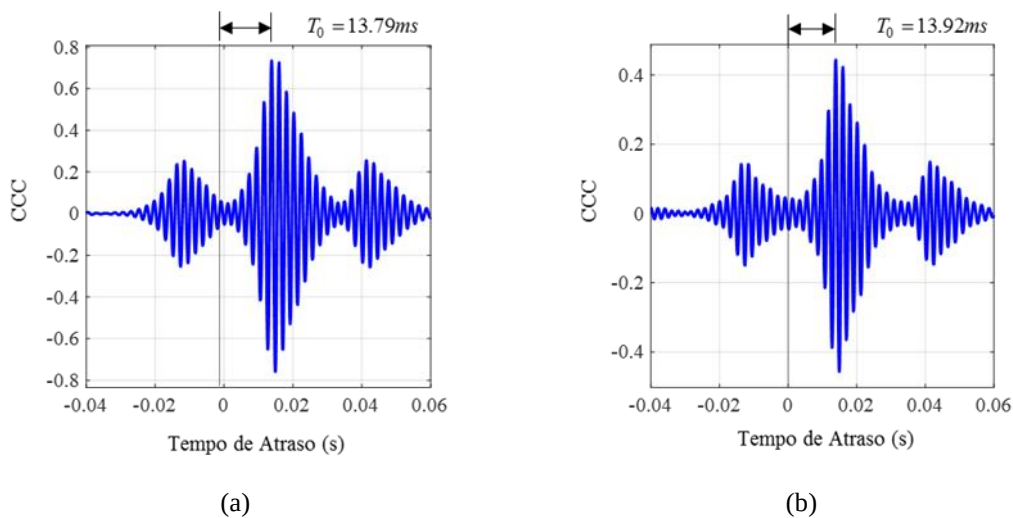
Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação cruzada após aplicar um filtro passa-faixa (290 a 650 Hz) nos sinais no domínio do tempo é mostrado na Fig. 4.17 (a), onde o sinal de excitação

randômico foi utilizado, apresentou como resultado um tempo de atraso de valor igual a 13.79 ms, que corresponde a uma velocidade de 507 m/s.

Enquanto, ao utilizar um sinal de excitação do tipo chirp, o coeficiente de correlação cruzada, após aplicar um filtro passa-faixa (300 a 630 Hz) nos sinais no domínio do tempo, é mostrado na Fig. 4.17 (b). O tempo de atraso obtido corresponde a 13.92 ms, o que equivale a uma velocidade de 503 m/s.

Figura 4.17 – Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais medidos quando utilizado um atuador comercial LMS para impactar a tubulação no ponto de acesso 01; (a) Excitando o atuador com um sinal de excitação do tipo randômico; (b) Excitando o atuador com um sinal de excitação do tipo chirp.



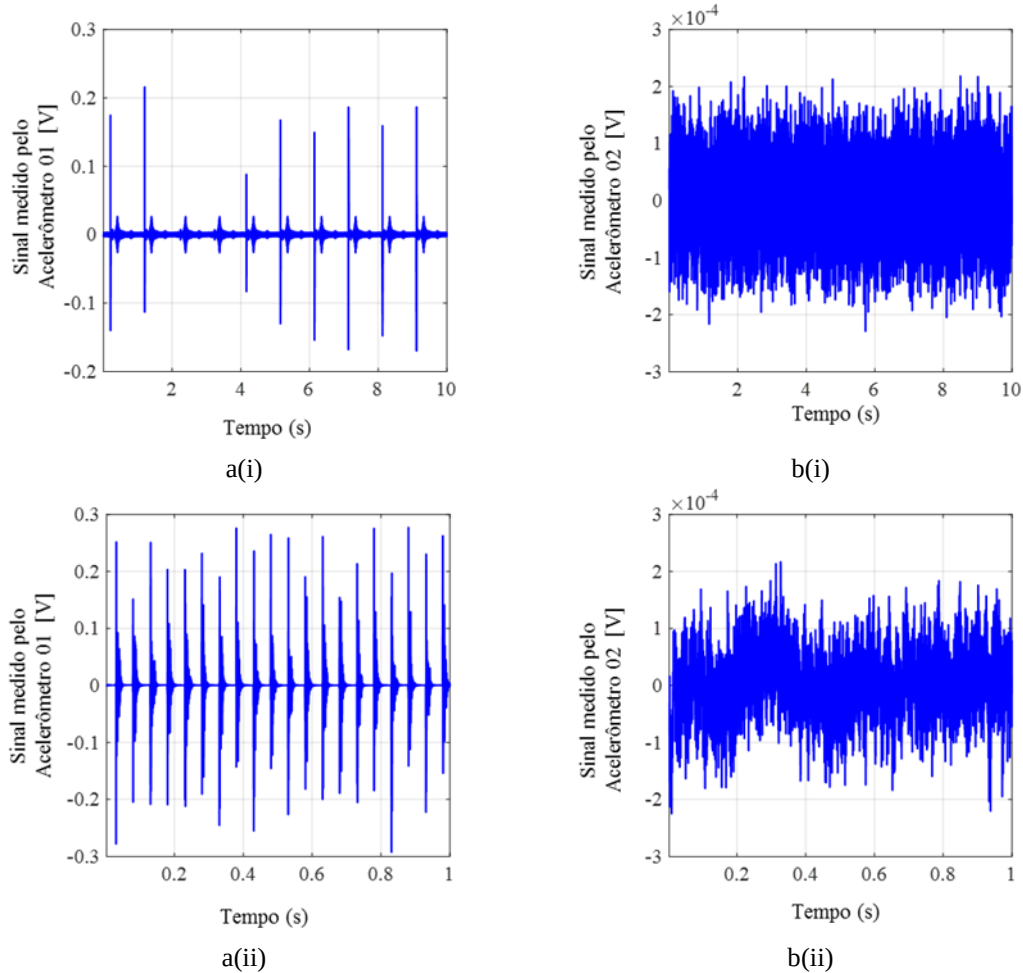
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado um geofone para impactar a tubulação

Um geofone, operando de forma inversa, foi utilizado como atuador para realizar impactos a tubulação, onde duas medições foram realizadas com diferentes tipos de sinal de excitação. O primeiro sinal utilizado foi um sinal do tipo chirp (de 0 a 2000 Hz em 1 segundo) sendo repetido periodicamente, o segundo sinal utilizado foi um sinal do tipo senoidal de 10 Hz.

A Figura 4.18 mostra os sinais capturados pelos acelerômetros quando utilizado um geofone para impactar a tubulação. O sinal temporal adquirido pelos acelerômetros nos pontos 1 e 2 são mostrados na Figura 4.18(a) e 4.18(b), respectivamente.

Figura 4.18 – Sinal temporal obtido quando utilizado um geofone para impactar a tubulação. A legendas ‘i’ e ‘ii’ correspondem aos sinais medidos quando utilizado um sinal de excitação do tipo chirp e senóide para excitar o atuador, respectivamente; (a) Sinal medido com o acelerômetro 01 instalado no ponto de acesso 01 ;(b) Sinal medido com o acelerômetro 02 instalado no ponto de acesso 02.

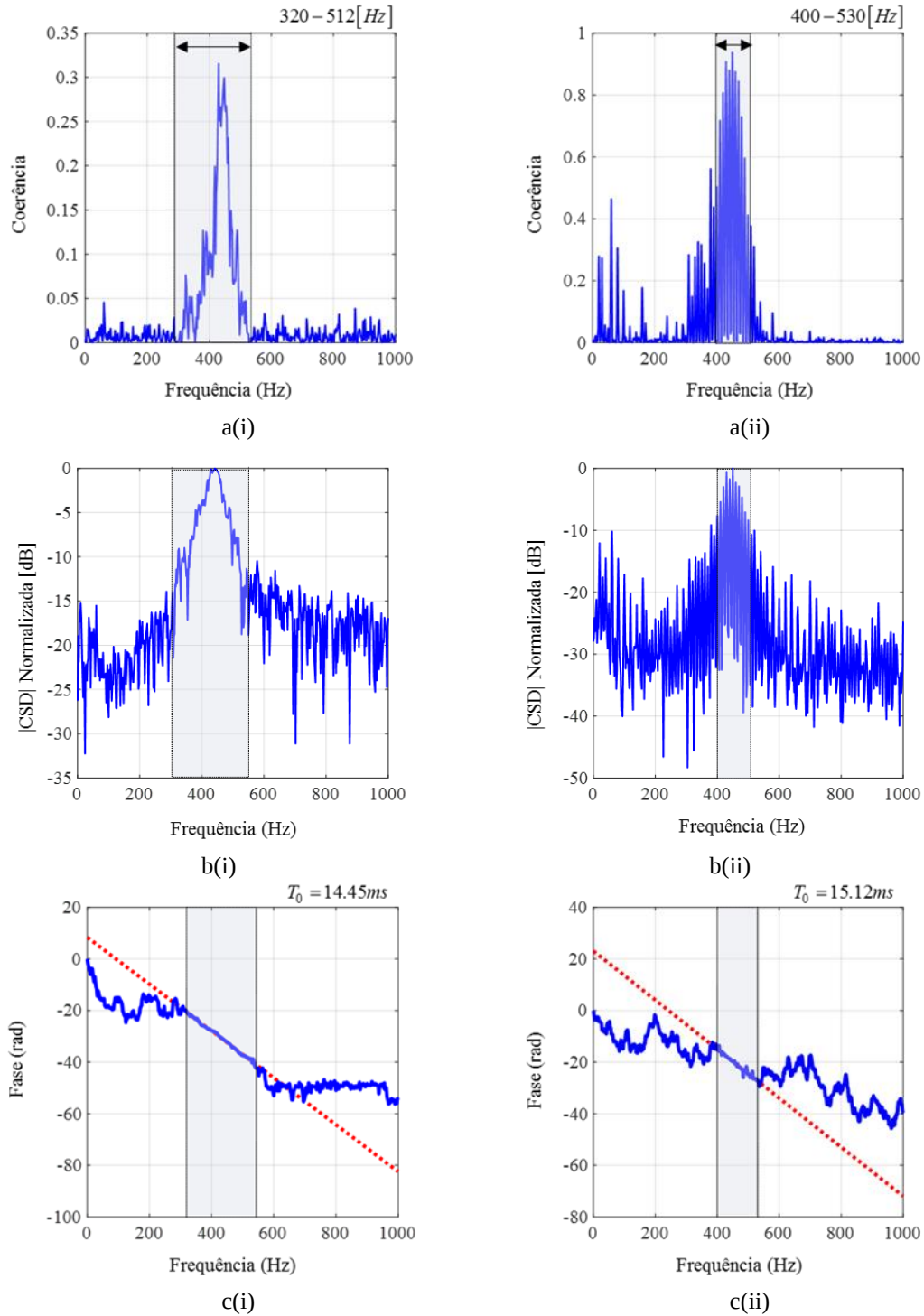


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.19 (i) mostra os resultados gráficos obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado um geofone sendo excitado por um sinal do chirp (0 a 2000 Hz em 1 segundo). O tempo de atraso obtido através da análise da fase da densidade espectral cruzada, mostrada na Fig. 4.19c (i), foi de 14.45ms, que corresponde a uma velocidade de 484 m/s para a faixa de frequência de 320 a 512 Hz.

A Figura 4.19 (ii) mostra os resultados gráficos obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado um geofone sendo excitado por um sinal do tipo senoidal (10 Hz). A Fig. 4.19c (ii) mostra o tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral cruzada para a faixa de frequência de 400 a 530 Hz foi de 15.12 ms, que equivale a uma velocidade de 463 m/s.

Figura 4.19 – Resultados obtidos quando utilizado um geofone como atuador para impactar a tubulação no ponto de acesso 01 sob a excitação de um sinal do tipo chirp. A legendas ‘i’ e ‘ii’ correspondem aos sinais medidos quando utilizado um sinal de excitação do tipo chirp e senóide para excitar o atuador, respectivamente; (a) Coerência; (b) Módulo da CSD Normalizada; (c) Fase da CSD; — Sinal Medido;
 Reta estimada.

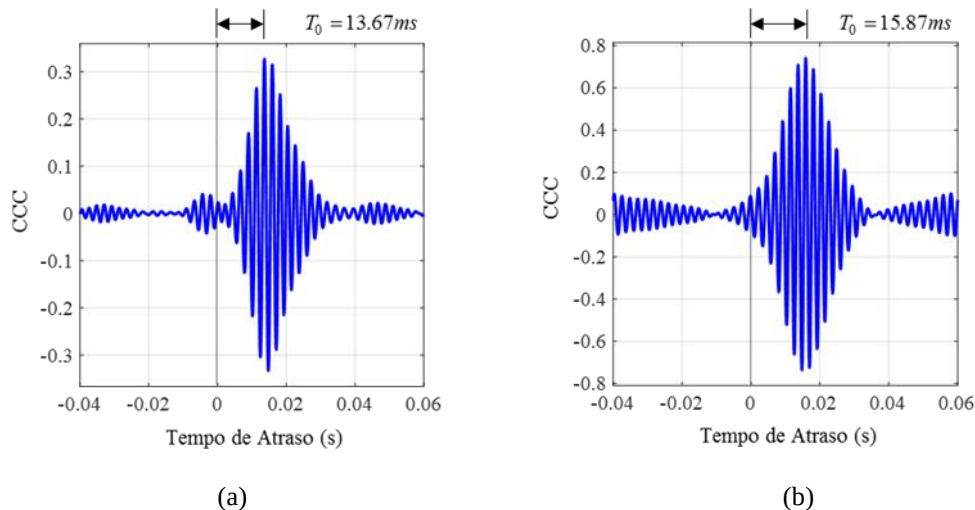


Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação cruzada quando utilizado um sinal de excitação do tipo chirp, após aplicar um filtro passa-faixa (320 a 512 Hz) nos sinais no domínio do tempo, é mostrado na Fig. 4.20 (a). O tempo de atraso obtido corresponde a 13.67 ms, o que equivale a uma velocidade de 512 m/s.

Enquanto, ao utilizar um sinal de excitação do tipo senoidal para excitar o geofone, tem o coeficiente de correlação cruzada, após a aplicação do filtro passa-faixa (400 a 530 Hz) nos sinais no domínio do tempo, mostrado na Fig. 4.20 (b). O tempo de atraso calculado foi de 15.87 ms que corresponde a uma velocidade de propagação de 441 m/s.

Figura 4.20 – Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais medidos quando utilizado um geofone como atuador para impactar a tubulação no ponto de acesso 01; (a) Excitando o atuador com um sinal de excitação do tipo chirp; (b) Excitando o atuador com um sinal de excitação do tipo senoidal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Discussão dos Resultados

4.4.1 Estimativa da velocidade de propagação

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos para a estimativa da velocidade de propagação.

Tipo de Excitação	Fonte	Tipo de Sinal	Tempo de Atraso obtido pelo CCC [ms]	Estimativa da Velocidade 01 [m/s]	Tempo de Atraso obtido pela Fase da S_{xy} [ms]	Estimativa da Velocidade 02 [m/s]
Vazamento Externo	Vazamento 1	---	12.7	551	12.58	556
Atuador	LMS	Chirp	13.92	503	14.33	488
	Siemens	Randômico	13.79	508	14.37	487
	Geofone	Chirp	13.67	512	14.45	484
		Senoidal	15.87	441	15.12	463

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao examinar a tabela 4.2, é possível observar que existe uma consistência razoável entre os resultados obtidos para a velocidade de propagação entre as estimativas realizadas nos domínios do tempo e da frequência. A estimativa obtida ao se utilizar um vazamento fora da seção como fonte excitadora apresentou uma velocidade de propagação maior quando comparada com a metodologia que utiliza o atuador.

Acredita-se que a diferença entre os valores das velocidades esteja associada com as características dinâmicas do sistema da tubulação, sendo necessário um estudo mais aprofundado quanto a transmissão da vibração da tubulação para o ponto de acesso e vice-versa. Um outro aspecto a ser observado, é a presença de reflexões devido a descontinuidade estrutural. Nas Fig. 4.17 (i) e 4.17 (ii) é possível observar claramente a presença das reflexões no gráfico do coeficiente de correlação cruzada, onde a reflexão se manifesta adicionando picos em -0.015 s e 0.04 s. Acredita-se que outras reflexões com tempo de atraso menores também estejam presentes nos dados. Essa hipótese se baseia no conhecimento adquirido através de análises previamente realizadas do campo de prova. Pequenos tempos de atraso podem influenciar na estimativa do tempo de atraso, como fora abordado por Brennan *et al.* (2016). Neste caso, o tempo de atraso estimado acaba sendo maior que o tempo de atraso real, o que acaba sendo o que ocorre com os dados medidos.

Através dos resultados obtidos, também foi observado que a faixa de frequência onde a energia do impacto/vazamento está contida varia de caso a caso. A faixa de frequência é adotada ao analisar a fase da densidade espectral cruzada, escolhendo-se o intervalo da frequência onde a fase apresenta um comportamento linear. A faixa de frequência depende de

vários fatores, um deles é a maneira de como mecanismo de excitação se acopla na tubulação, o que pode levar a alterar as características dinâmicas do sistema (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Os resultados medidos podem ser comparados com o resultado teórico baseado no equacionamento proposto por Brennan *et al.* (2018), mostrado na Eq. 2.27 e por conveniência, novamente citado pela equação que segue:

$$c = c_w \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{Eh}{2B_w a} + \frac{G_s}{B_w}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.3)$$

onde os parâmetros da tubulação são mostrados na Tabela 4.1. Ao se utilizar tais parâmetros, a velocidade de propagação do ruído de vazamento é estimada em 495 m/s. Ressalta-se que o parâmetro módulo de cisalhamento do solo G_s também é estimado, o que significa que exista uma certa incerteza na estimativa obtida por Eq. (4.3).

4.4.2 Estimativa da localização do vazamento

A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos para a localização de vazamento.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos para a localização do vazamento.

Tipo de Excitação	Fonte	Sinal	Velocidade [m/s]	Distância d ₁ [m]
Vazamento externo	Vazamento 1	---	551	5.62
Atuador	LMS Siemens	Chirp	503	5.44
		Randômico	508	5.45
	Geofone	Chirp	512	5.47
		Senoidal	441	5.20
	Equação teórica			495
Valor real				5.46

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar através da Tabela 4.3 que as estimativas de localização de vazamento estiveram dentro da faixa de tolerância aceitável, sendo inferior a 10%. Também deve-se observar que as estimativas de localização quando utilizado um atuador ao invés do vazamento obtiveram maior aproximação com o valor real, com exceção da excitação do tipo senoidal aplicado no geofone.

Nas Fig. 4.17, são revelados fenômenos de reflexão nos sinais medidos. Tal fato, acredita-se que esteja relacionado com as características geométrica e de layout do campo de prova. É provável que o efeito de reflexão proporcione um erro na estimativa do tempo de atraso e consequentemente, na localização do vazamento. Entretanto, especula-se que os dois erros (estimativa da velocidade de propagação e estimativa da localização do vazamento) acabem um compensando o outro, o que significa que a melhor estimativa da localização de vazamento é quando se utiliza um atuador para estimar a velocidade de propagação.

4.5 Conclusão

Neste capítulo, foram mostrados os resultados obtidos na estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento em uma seção do campo de prova específico para simular vazamentos em condições “controladas”. Foram utilizadas duas abordagens diferentes para realizar tal estimativa. A primeira baseia-se na utilização de um vazamento localizado fora da seção da tubulação como fonte excitadora, fazendo com que a vibração provocada pelo vazamento se propague e seja detectada pelos acelerômetros instalados em dois pontos de acesso distintos, sendo a distância entre eles conhecida. O segundo método utiliza um atuador instalado em um dos pontos de acesso para provocar impactos controlados na tubulação. Dois tipos diferentes de atuadores foram utilizados, o primeiro foi um atuador comercial LMS Siemens e o segundo foi um geofone configurado de modo reverso.

Foi observado que a velocidade de propagação do ruído de vazamento, quando utilizado um vazamento fora da seção como fonte excitadora, apresentou uma velocidade maior do que quando comparado aos resultados obtidos através da metodologia que utilizava o atuador. Esta divergência de valores pode estar associada a efeitos de reflexão que podem estar ocorrendo na tubulação, dependendo do tipo de excitação que está sendo utilizada. De forma a verificar os resultados obtidos para a velocidade de propagação, foi realizado uma análise comparativa, onde foi gerado um vazamento entre os pontos de acesso e em seguida foi realizada a medição do tempo de atraso. Esse resultado juntamente com a estimativa da velocidade de propagação possibilitou realizar um comparativo entre os resultados obtidos para a localização do vazamento. No próximo capítulo será mostrado um detalhamento sobre o protótipo do correlacionador desenvolvido pelo grupo de pesquisa.

CAPÍTULO 05 - DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO DO CORRELACIONADOR ACÚSTICO

5.1 Introdução

Neste capítulo serão detalhadas características do protótipo, aspectos quanto ao software desenvolvido e também informações relacionadas ao desenvolvimento de um *case* responsável por abrigar o geofone (utilizado como atuador para aplicar impactos na tubulação) e o sensor do tipo acelerômetro. Por fim, serão apresentados resultados obtidos de medições realizadas utilizando o *case* no campo de prova da SABESP em São Paulo (SP).

5.2 Desenvolvimento do Protótipo

A proposta de desenvolvimento do protótipo do correlacionador acústico resultou em duas versões. Na primeira versão, o operador deveria instalar dois sensores (acelerômetros) nos pontos de acesso que delimitam a seção da tubulação em análise, onde exista a suspeita de vazamento. Em seguida, o usuário deverá fornecer ao software (instalado no computador) os parâmetros da tubulação, tais como a distância entre os pontos de acesso, dimensões e material do tubo e o tipo de solo onde o tubo está enterrado. A partir destes parâmetros, o software calcula a velocidade de propagação do ruído de vazamento através da Eq. 2.27, proposta por Brennan *et al.* (2018).

Após esse procedimento, o operador dará a ordem, através deste mesmo *software*, para o início da aquisição dos ruídos de vazamento. Dois dispositivos eletrônicos conectados aos sensores receberão tal comando, via Wi-Fi, e iniciarão o procedimento de captura desses sinais, que devem ser sincronizados. Entretanto, torna-se necessário realizar um procedimento de sincronização entre os módulos eletrônicos para que esses iniciem a aquisição dos sinais ao mesmo tempo, de forma a evitar o surgimento de um tempo de atraso adicional ao tempo de atraso obtido através do vazamento, resultante da diferença de tempo de ação/resposta existente entre os dispositivos eletrônicos.

Após a aquisição dos ruídos de vazamentos, o *software* realiza os procedimentos de análise e processamento de sinais, descritos nos capítulos anteriores, visando a obtenção de um

valor correspondente a estimativa do tempo de atraso entre os dois sinais vibratórios medidos pelos sensores instalados nos pontos de acesso.

Como mencionado anteriormente, é de grande importância realizar a filtragem dos ruídos de vazamento, a fim de excluir ruídos indesejados e que não correspondam ao ruído de vazamento. O *software* oferece duas maneiras de realizar a filtragem dos ruídos de vazamento. A primeira maneira, se dá de forma automática, onde o programa realiza uma análise entre os sinais e escolhe a faixa de frequência onde os sinais apresentaram melhores índices de coerência. A segunda maneira funciona de forma manual, onde o usuário utiliza o cursor sobre o gráfico da fase da densidade espectral cruzada, delimitando a faixa de frequência onde a fase apresenta comportamento linear.

Com a obtenção da estimativa do tempo de atraso T_0 , a velocidade de propagação do ruído de vazamento c e a distância entre os pontos de acesso d , o *software* então, calcula a distância entre o ponto de acesso 01 ao vazamento utilizando a Eq. 2.1.

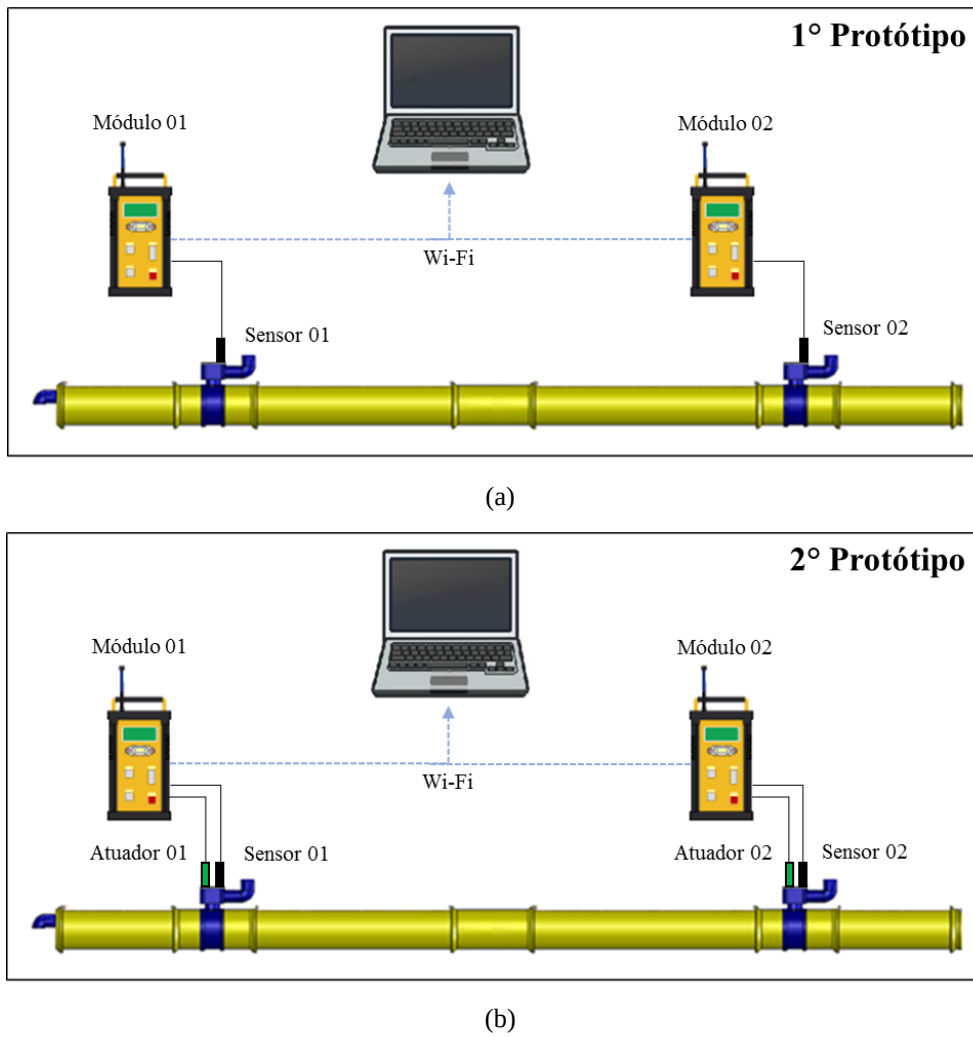
Na segunda versão é possível realizar a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento de duas maneiras. A primeira maneira utiliza o cálculo teórico, da mesma forma que a primeira versão do protótipo, e a segunda forma realiza a estimativa da velocidade de propagação experimentalmente utilizando a metodologia proposta por Almeida (2013).

Na seção da tubulação em análise, delimitada por dois pontos de acesso a tubulação (ponto de acesso 01 e ponto de acesso 02), são instalados um sensor (acelerômetro) e um atuador (geofone) em cada um dos pontos de acesso. Individualmente, cada atuador excitará a tubulação por meio de impactos controlados, de tal forma que a vibração gerada se propague ao longo da tubulação e seja medida pelos sensores instalados no outro ponto de acesso. Conhecendo a distância entre os dois pontos de acesso, a função de correlação-cruzada será utilizada, com o intuito de se obter um valor correspondente ao tempo total gasto que o sinal leva para percorrer a seção da tubulação T_0 , assim, a estimativa da velocidade de propagação é então obtida através da Eq. 2.24.

Após a obtenção do valor correspondente a velocidade de propagação, é realizada uma nova medição, medindo os sinais de vazamento através dos sensores instalados nos pontos de acesso para então, realizar a estimativa da localização do vazamento fazendo uso do valor da velocidade de propagação obtido experimentalmente.

Na Figura 5.1 são mostradas ilustrações esquemáticas de forma a exemplificar as duas versões do protótipo do correlacionador.

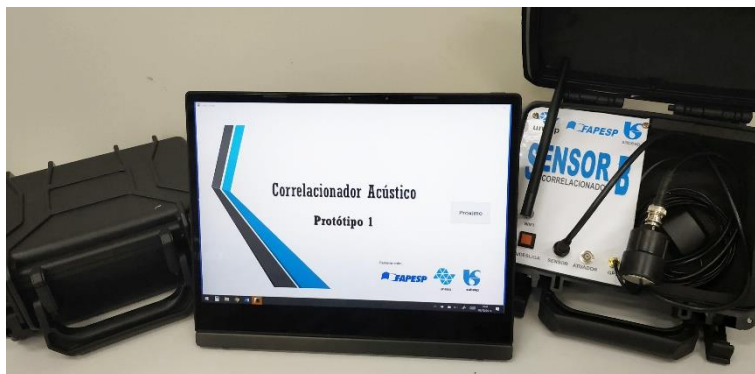
Figura 5.1 – Versões do Protótipo do Correlacionador Acústico; (a) 1º Versão; (b) 2º Versão.



Fonte: Elaborado pelo grupo de pesquisa.

Na Figura 5.2 é mostrada uma fotografia do Protótipo do correlacionador desenvolvido pelo grupo de pesquisa deste projeto.

Figura 5.2 - Imagem do Protótipo do Correlacionador Acústico, onde são mostrados os dois módulos e o computador com o *software* desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo grupo de pesquisa.

5.2.1 Desenvolvimento do software

Os responsáveis pelo desenvolvimento dos *softwares* utilizados na primeira e na segunda versão, foi o autor desse trabalho em parceria com outro integrante do grupo de pesquisa, o doutorando em Engenharia Mecânica, Msc. Pedro Christian Ayala Castillo, cujo título de sua tese é “Estudo do processamento de sinais de vazamento em tubulações enterradas para o desenvolvimento de um correlacionador de sinais de baixo custo” sob a orientação do Prof. Dr. Michael John Brennan.

O programa utilizado para desenvolver o software do correlacionador para ambas as versões foi o MATLAB® utilizando a ferramenta GUIDE.

a) **Primeiro Protótipo**

A tela inicial de apresentação do programa é mostrada na Fig. 5.3(a), ao clicar no botão “Próximo” segue para uma nova janela, correspondente a tela de inserção de parâmetros, vide Fig. 5.3(b). Será nesta janela que o operador inserirá os parâmetros da tubulação, tais como a distância entre os pontos de acesso, tipo de solo, material do tubo, diâmetro, espessura da parede do tubo e também o tempo de análise em segundos. Vale ressaltar, que ao clicar o botão próximo na tela de inserção de parâmetros, o programa irá realizar automaticamente o cálculo teórico correspondente a velocidade de propagação a partir dos parâmetros aqui estabelecidos.

A próxima janela a ser exibida é a tela de apresentação de resultados, onde nesta janela o usuário pode realizar uma nova medição, carregar arquivo de vazamento, inserir novamente os parâmetros da tubulação, índice de qualidade da correlação e a escolha do tipo de filtragem a ser utilizada (automática ou manual).

Ayalla desenvolveu um índice de qualidade da correlação, através de uma metodologia que analisa o formato da função de correlação e a quantifica em uma faixa de valor de 0 a 10, a fim de possibilitar a classificação da correlação através de índices de ruim, bom ou excelente.

O resultados gráficos obtidos ao analisar os sinais de vazamento e disponibilizados ao usuário, são a fase da densidade espectral e também o coeficiente de correlação cruzada são mostrados na Figura 5.3(c). De forma a facilitar a compreensão do usuário, o resultado referente a localização do vazamento é mostrada em uma figura na parte inferior da janela, nela está representada a seção da tubulação em análise, onde são mostradas as distâncias do vazamento aos pontos de acesso.

O intuito de também mostrar a fase da densidade espectral cruzada se deve ao fato de permitir ao usuário que escolha a faixa de frequência, que será utilizada para filtrar os sinais de vazamento, de acordo com a faixa de frequência onde a fase apresentar comportamento linear.

Figura 5.3 – Janelas de interface do 1º Protótipo entre o operador e o software; (a) Capa; (b) Inserção de Parâmetros; (c) Análise dos resultados.



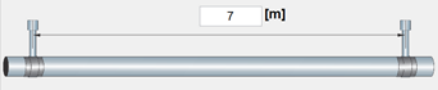
(a)

Parâmetros do Sistema

Instruções Iniciais:
Preencha todos os campos disponíveis na tela para prosseguir para a próxima tela.

Esquemático do Sistema

Distância entre os pontos de acesso:

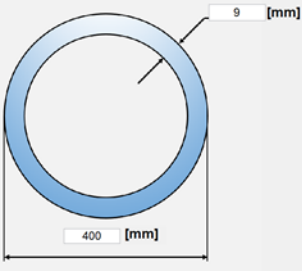


7 [m]

Tipo de solo: Arenoso

Material do tubo: Cloreto de Polivinila (PVC)

Propriedades do Tubo



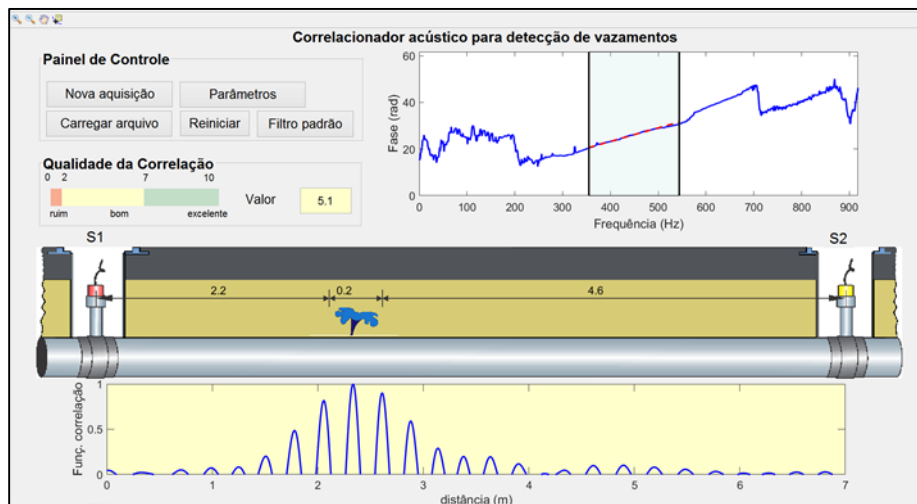
9 [mm]

400 [mm]

Tempo de Análise: 30 [s]

Anterior Próximo

(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo grupo de pesquisa.

b) Segundo Protótipo

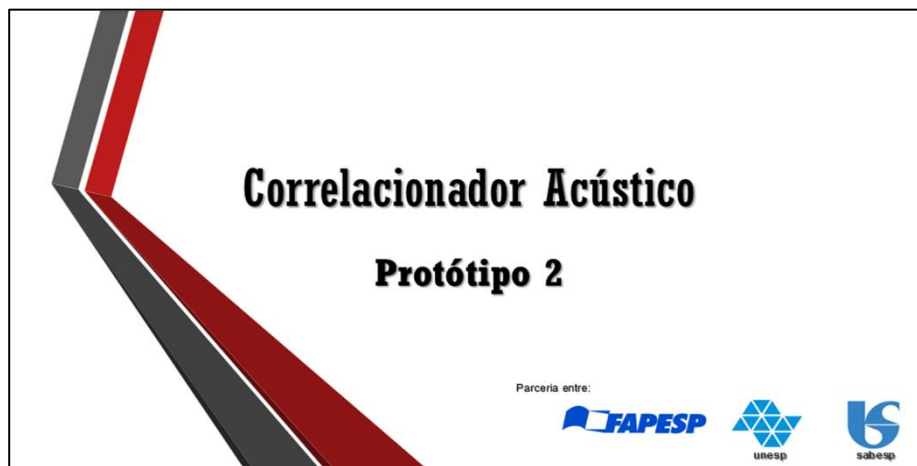
Para o segundo protótipo, a intenção foi manter o mesmo conceito utilizado para a primeira versão, todavia, acrescentando a opção de estimar a velocidade de propagação experimentalmente. Na Fig. 5.4(a) é mostrada a nova janela de apresentação. Ao clicar no botão próximo, a janela que segue é a tela de inserção dos parâmetros da tubulação, vide Fig. 5.4(b), sendo nesta tela onde ocorreram algumas modificações. Agora existe a opção de calcular a velocidade de propagação, utilizando a Eq. 2.27 e os parâmetros inseridos correspondentes a tubulação (Fig. 5.4(b)), e também realizar o procedimento de medição da velocidade. Para a realização da medição da velocidade de propagação, tudo se dará de forma automática, não necessitando nenhum tipo de operação por parte do usuário (Fig. 5.4c)).

Durante o procedimento de aquisição dos dados, é mostrado ao usuário uma janela de progresso de medição, como pode ser visto na Fig. 5.4(d). E para casos onde os picos principais, que fornecem o valor do tempo de atraso dos sinais, tiverem sua amplitude muito próxima a

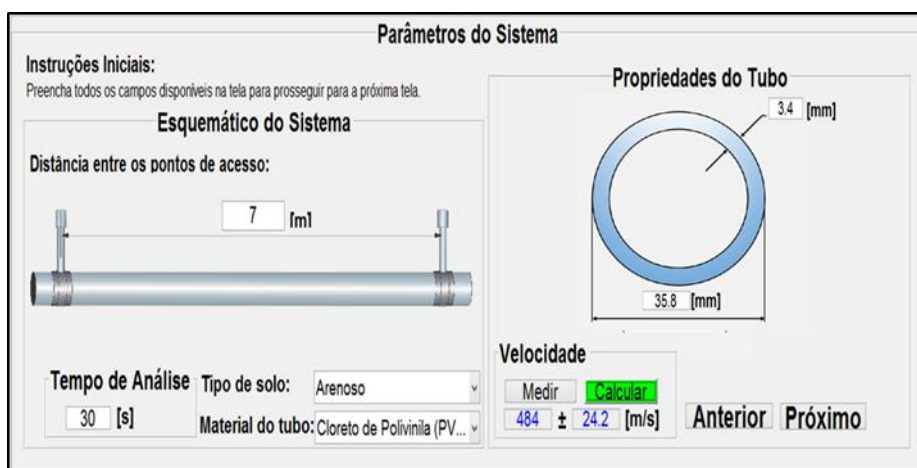
dos lóbulos laterais, uma janela de aviso será aberta de forma a informar ao usuário que poderá existir imprecisão nos resultados medidos.

Na realização da medição da velocidade de propagação, não serão exibidas janelas com resultados gráficos, apenas será fornecido ao usuário um valor referente a velocidade de propagação e um valor correspondente à faixa de tolerância deste valor. E após a obtenção de um valor correspondente a velocidade, o usuário poderá prosseguir para a próxima janela onde será realizada a aquisição dos sinais de vazamento, da mesma forma como fora descrito para a primeira versão do protótipo do correlacionador.

Figura 5.4 – Janelas de interface do 2º Protótipo entre o operador e o software; (a) Capa; (b) Inserção de parâmetros com ênfase no cálculo teórico da velocidade; (c) Inserção de parâmetros com ênfase no cálculo experimental da velocidade de propagação; (d) Análise dos resultados da medição.



(a)



(b)

Parâmetros do Sistema

Instruções Iniciais:
Preencha todos os campos disponíveis na tela para prosseguir para a próxima tela.

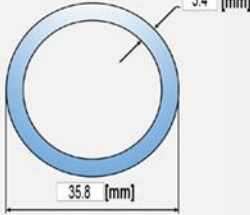
Esquemático do Sistema

Distância entre os pontos de acesso:



7 [m]

Propriedades do Tubo



3.4 [mm]
35.8 [mm]

Velocidade

Tempo de Análise: 30 [s]
Tipo de solo: Arenoso
Material do tubo: Cloreto de Polivinila (PV...)

Medir Calcular
477 ± 35 [m/s]

Anterior Próximo

(c)



(d)

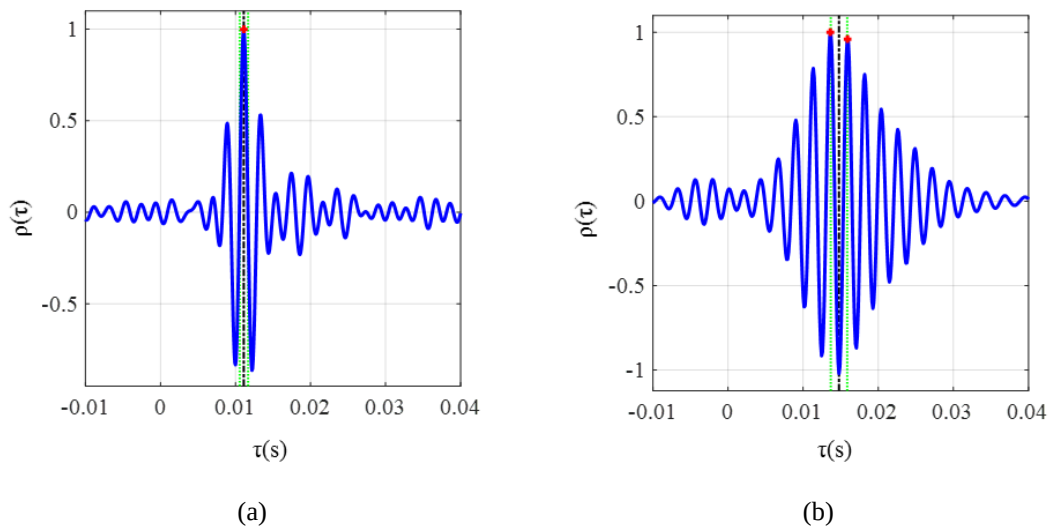
Fonte: Elaborado pelo grupo de pesquisa.

Para o cálculo da tolerância, foram propostas duas maneiras de forma a atender diferentes tipos de situações que possam vir a ocorrer durante a medição da velocidade de propagação do ruído de vazamento. A primeira situação, é quando o pico principal e os lóbulos laterais possuem uma grande diferença de amplitudes, evidenciando claramente o pico principal. Para tal caso, foi adotada uma tolerância de $\pm 5\%$. Para situações onde o pico principal e um dos lóbulos laterais possuem amplitudes próximas, calcula-se a média entre os tempos correspondentes a ambos os picos e tal valor será utilizado como valor de estimativa da velocidade de propagação, uma vez que a tolerância, será limitada pelos valores obtidos da velocidade ao utilizar os valores correspondentes aos valores de tempo advindos do pico principal e do segundo maior pico.

São mostrados na Figura 5.5, as duas situações descritas acima, onde os resultados mostrados foram obtidos em medições experimentais da velocidade de propagação em duas

seções da tubulação diferentes e utilizando diferentes tipos de atuadores para excitar a tubulação (para o primeiro caso foi utilizado o atuador da Siemens LMS e o segundo caso utilizando um geofone como atuador), de forma a exemplificar as duas diferentes maneiras realizadas para o cálculo da tolerância. Os resultados estão dispostos na Tabela 5.1.

Figura 5.5 – Exemplos de medições reais da velocidade de propagação, evidenciando a maneira de como foi feita o cálculo da tolerância; (a) Primeiro caso: amplitudes do pico principal e dos lóbulos laterais é grande; (b) Segundo caso: amplitudes do pico principal e dos lóbulos laterais é próxima.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde para as situações mostradas acima foram obtidos os seguintes resultados :

Tabela 5.1 – Resultados obtidos.

Resultados obtidos:	Tempo de Atraso [ms]	Velocidade de Propagação [m/s]
Caso 01	11.09	496 ± 25 [m/s]
Caso 02	13.67	474 ± 38 [m/s]

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Desenvolvimento do Hardware

O integrante do grupo de pesquisa responsável pelo desenvolvimento do *hardware* foi o doutorando em Engenharia Mecânica, Msc. Daniel Henrique de Sousa Obata, cujo título de sua tese é “Desenvolvimento de um Detector de Vazamentos em Tubulações Enterradas por Correlação Cruzada” sob a orientação do Prof. Dr. Michael John Brennan.

Vale informar ao leitor que é de grande importância e ao mesmo tempo de grande dificuldade, o desenvolvimento de um sistema eletrônico como este. Existem diversas adversidades que podem ocorrer durante a montagem do sistema eletrônico e que possivelmente poderiam vir a influenciar no sinal de vazamento medido, podendo-se exemplificar, problemas associados à interferências originadas pelo próprio sistema eletrônico, perda de pacote de dados devido a falhas de comunicação via Wi-Fi ou até mesmo a não-sincronização entre os módulos de medição.

O sistema escolhido como componente central dos módulos é o minicomputador do tipo Orange Pi Zero. Este componente possui um processador H3 da empresa *Sunsix* de arquitetura ARM® Cortex A7 de 32 bits, Quad Core, 1GHz 512MB de RAM, com armazenamento em cartão SD, e interfaces de ethernet, USB, Wi-Fi e pinos de GPIO (*General Purpose Input/Output*). O sistema operacional Linux compatível e instalado na placa Orange Pi é o *Armbian*. O motivo da escolha desta placa eletrônica, se deve ao fato que suas configurações são muito superiores às necessidades do projeto atreladas ao seu baixo custo e fornecimento no mercado local. Mesmo se tratando de um sistema computacional miniaturizado, seu valor é cerca de dez vezes inferior a um computador convencional.

A sincronização entre os sinais adquiridos, é de grande importância para a aplicação da técnica de detecção de vazamentos pela metodologia de correlação cruzada, uma vez que, atrasos inseridos na coleta de dados devido a eletrônica e processamento podem vir a inserir erros na estimativa da localização de vazamento. Obata desenvolveu e realizou ensaios em laboratório e concluiu que a técnica de sincronização entre dispositivos por GPS em sistema de transmissão remoto é válida para a aplicação no estudo de detecção de vazamentos. A incerteza decorrente das fontes de tempo de referência via GPS e do circuito lógico se encontram na ordem de nano segundos (10 a 250 ns e 150 a 250 ns) e não interfeririam na estimativa do tempo de atraso entre os sinais de vazamento (OBATA *et al.*, 2018).

Existem várias metodologias para transmissão de dados sem fio, como por exemplo, raios infravermelhos, lasers, micro-ondas e rádio, porém, a transmissão de sinais por meio de rádio é mais comum e usualmente utilizada (rádio, TV, celular, rede Wi-Fi entre outras). Optou-se em utilizar a comunicação por rádio Wi-Fi, por ser de fácil implementação, ter grande largura de transmissão de dados e possuir diversos dispositivos no mercado.

O controle da aquisição dos sinais é realizado através da unidade de sistema principal que através de uma rotina em Matlab®, conecta-se aos dois conjuntos de sensor/transmissor, avalia se há conexão do módulo GPS com o satélite e aguarda o comando de nova aquisição. Durante o comando de nova aquisição, o estado de conexão com o satélite é avaliado

novamente, o horário atual é capturado e uma nova aquisição é agendada para alguns segundos adiante.

O sensor utilizado para captar as vibrações de vazamento na seção da tubulação é um acelerômetro 333B da empresa PCB do tipo piezelétrico com tecnologia ICP® (sensibilidade de 10mV por m/s²), necessitando de um circuito condicionador de sinais, que fará a alimentação do mesmo e entregará o sinal da aceleração em forma de tensão. A aquisição do sinal do sensor se dá através da própria interface de áudio do Orange Pi, que transmite o sinal por rede sempre que uma conexão for solicitada.

5.2.3 Desenvolvimento do Invólucro (Atuador\Sensor)

Para o segundo protótipo, foi desenvolvido um dispositivo, onde em seu interior estará presente um geofone (Sensor Nederland SM-24 UB 10 Hz 375Ω) e um acelerômetro (PCB 352C22). Este dispositivo é feito de alumínio, sendo dividido em três partes, porém, são fixados por rosca, o desenho do dispositivo é mostrado no Apêndice deste trabalho.

Na parte inferior (*case inferior*) será colado o geofone sobre um ímã neodímio que foi posicionado na parte inferior interna do *case*. A proposta de se utilizar o ímã se deve ao fato de utilizar o princípio de atração magnética para fixar o invólucro ao ponto de acesso onde serão realizadas as medições. Testes em laboratório foram realizados para avaliar se a utilização de um ímã na base do geofone poderia de alguma forma interferir no impacto produzido. Fora constatado que a presença do ímã não proporcionou potencial para prejudicar o impacto produzido pelo geofone.

A parte intermediária (*case central*) é o local onde será instalado o acelerômetro PCB. O cabo do geofone (que está instalado na parte inferior) atravessará essa seção através de um rasgo existente nesta peça. A parte superior (*case superior*) tem como objetivo servir como uma tampa do invólucro. Nele, os cabos do acelerômetro e do geofone atravessarão por um furo feito em sua parte superior e serão presos através de um prensa-cabo do tipo PG7. Como mencionado, essas partes do invólucro são fixados por rosca. Um o-ring foi utilizado para auxiliar na vedação e no aperto entre as partes do dispositivo.

Testes em laboratório foram realizados a fim de avaliar se as características dinâmicas e construtivas do invólucro poderiam agir como um agente perturbador nas medições de vibração realizadas pelo sensor instalado na parte intermediária da peça. Foi observado que a maneira como os elementos estavam fixados, no caso por rosca estava causando interferência na medição do sinal. Para amenizar tal situação, foi aplicada graxa entre os dentes da rosca e

através da realização de novos testes, observou que as interferências reduziram significativamente, o que possibilitou concluir que as características dinâmicas do invólucro não mais interfeririam na medição do sinal de vibração.

No Apêndice deste trabalho é mostrado um esquemático detalhado do invólucro desenvolvido.

5.3 Validação do Invólucro na Estimativa da Velocidade de Propagação

Nos dias 13 e 14 de Dezembro de 2018, alguns dos integrantes do grupo de pesquisa realizaram uma viagem para São Paulo (SP) para realizar medições no campo de provas da SABESP. O integrante Daniel Obata ficou encarregado de realizar testes, utilizando o primeiro protótipo do correlacionador, a fim de verificar sua performance em campo.

Esclarece-se ao leitor que o primeiro protótipo é a base para o desenvolvimento da segunda versão do correlacionador. Entretanto, como o primeiro protótipo ainda não fora definitivamente concluído, o autor desse trabalho focou suas atividades no desenvolvimento do software (descrito na seção 5.2.1) e do invólucro/*case* (descrito na seção 5.2.3) uma vez que o hardware está sendo projetado pelo acadêmico Daniel Obata.

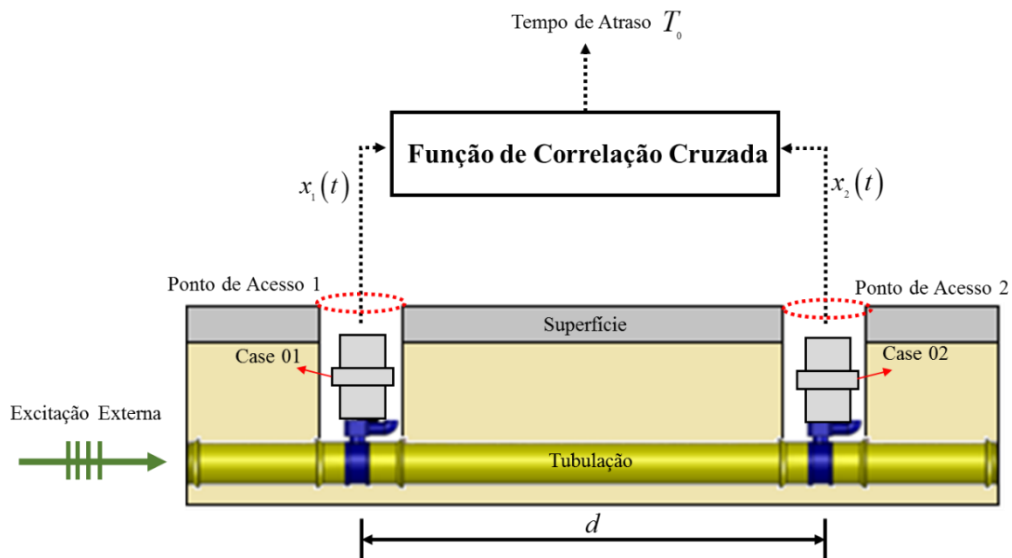
Dessa forma, durante a visita ao campo de provas, o autor deste trabalho, ficou incumbido de realizar medições utilizando o invólucro (*case*), com o objetivo de avaliar sua performance e de estimar a velocidade de propagação do ruído de vazamento.

5.3.1 Procedimento experimental

Os procedimentos realizados neste experimento foram similares aos procedimentos descritos no Capítulo 4 (Seção 4.3), com intuito de comodidade ao leitor, alguns aspectos relevantes serão mencionados novamente nesta seção.

A Figura 5.6 mostra um esquema do arranjo experimental no qual uma seção da tubulação é delimitada por dois pontos de acesso (ponto de acesso 01 e ponto de acesso 02). Em cada um dos pontos de acesso foi instalado um *case*, onde em seu interior está instalado um acelerômetro e um geofone (que será utilizado como atuador para excitar a tubulação para estimar a velocidade de propagação). Também é mostrada a excitação proveniente de um vazamento localizado fora da seção da tubulação, enfatizando assim os dois mecanismos utilizados como fonte externa para excitar a tubulação.

Figura 5.6 – Esquemática de uma seção da tubulação onde são mostrados os *cases* instalados nos pontos de acesso, junto com a excitação externa agindo para a estimativa da velocidade de propagação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

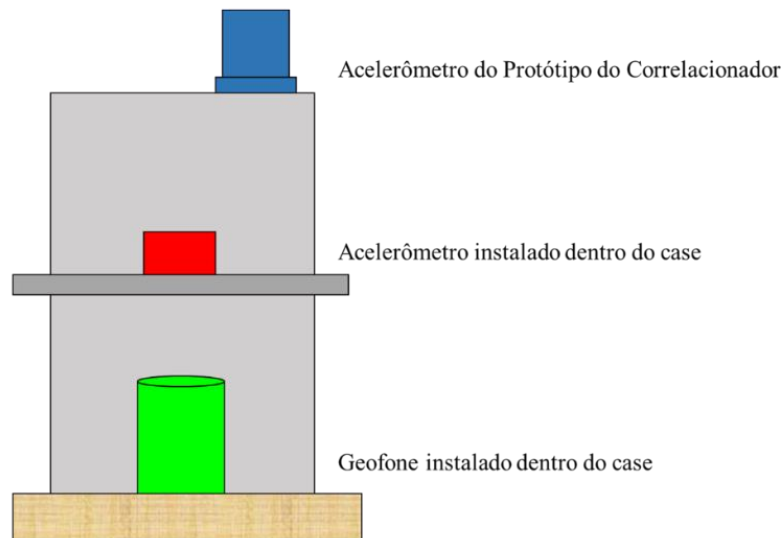
Parte da metodologia proposta por Almeida *et al.* (2015) foi utilizada para a obtenção da velocidade de propagação do ruído de vazamento na seção da tubulação P1-P2. O primeiro método aplicado, foi a utilização de um vazamento fora da seção da tubulação como fonte de vibração (vazamento 01). O segundo método utilizou a vibração provocada pelo impacto produzido pelo geofone configurado de modo reverso, de forma a gerar impactos quando a massa inercial em seu interior colidir com seu invólucro. De maneira geral, a excitação vibratória produzida pela fonte externa (atuador) irá se propagar do ponto de acesso P1 para o ponto de acesso P2, e no interior dos *cases* foram utilizados acelerômetros “*tear-drop*” (PCB – 352C22) para fazer a coleta das medições.

Durante a realização dos testes no campo de prova, fora observado que o acelerômetro que havia sido escolhido para ser utilizado dentro do invólucro (acelerômetro PCB 352C22), não possuía a sensibilidade necessária (10mV/g) para capturar os sinais vibratórios da tubulação. Por essa razão, durante a realização dos testes no campo de prova, optou-se por instalar sob o case, o acelerômetro que estava sendo utilizado pelo 1º protótipo do correlacionador, cuja sensibilidade é de aproximadamente 100mV/g.

A Fig. 5.7 mostra um esquemático da instalação dos sensores no interior do *case*, evidenciando a posição onde foram instalados durante a realização deste experimento. No topo da parte superior do *case* foi fixado com cola adesiva o acelerômetro utilizado no primeiro protótipo, no interior do *case* (na parte intermediária) foi fixado com cola adesiva (cola

instantânea Loctite) o acelerômetro PCB 352C22, enquanto na parte inferior do *case* está fixado com cola adesiva o geofone que será utilizado como atuador.

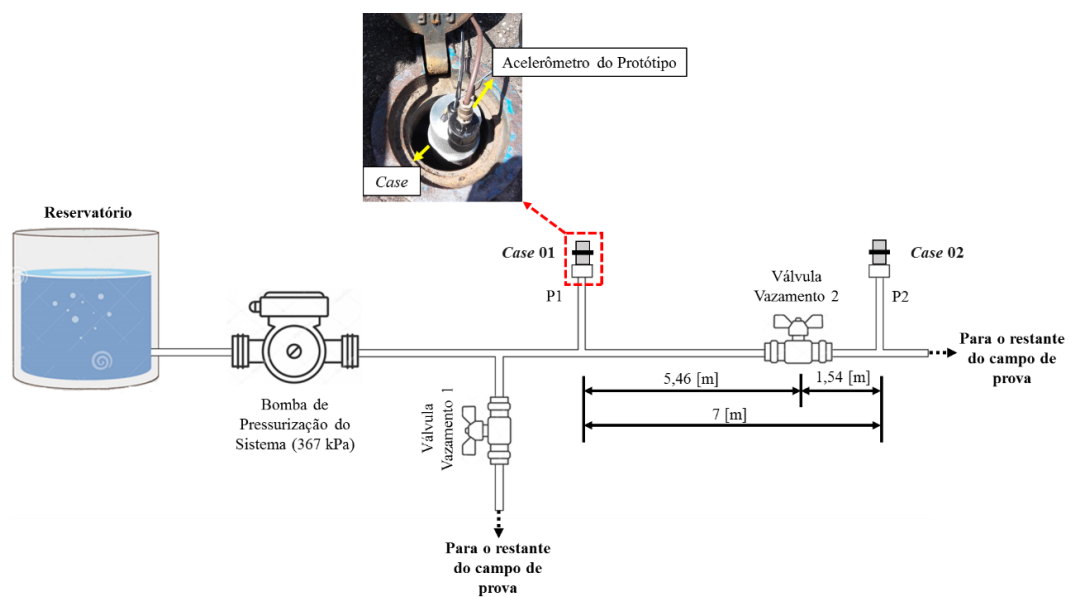
Figura 5.7 – Esquemática da instalação dos sensores no *case*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Fig. 5.8 mostra um diagrama esquemático de como foi feita a implementação da metodologia proposta, aplicada ao campo de provas da SABESP.

Figura 5.8 – Esquemático do campo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

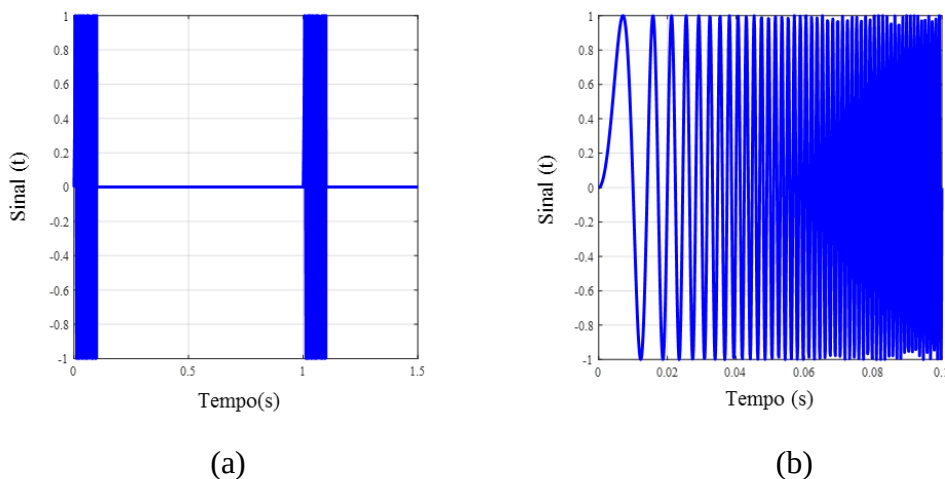
Foi realizada a função de correlação-cruzada dos sinais medidos para calcular o tempo de atraso gasto T_0 para a onda percorrer a trajetória da seção da tubulação. Combinando este resultado, juntamente com a distância entre os pontos de acesso d , a velocidade de propagação do ruído de vazamento pode então ser calculada através da Eq. 2.24.

Para a determinação da densidade espectral entre os sinais, fora utilizado um janelamento do tipo *Hanning* com 50% de sobrepasso (*overlap*) e com 4096 pontos da FFT (*Fast Fourier Transform*). Isto resulta em uma resolução da frequência de 2 Hz e uma resolução no domínio do tempo de 0.122 ms. Para cada medição mostrada nesta seção, fora utilizada uma faixa de frequência diferente, devido ao fato de que a frequência onde a energia do impacto/vazamento se concentra é diferente de caso a caso.

A aquisição de sinais foi feita utilizando o sistema de aquisição da SIEMENS modelo SCADA XS com uma frequência de amostragem de 8192 Hz, com tempo de aquisição de 60 segundos. Os acelerômetros utilizados foram acelerômetros ICP® da PCB Piezotronics, modelo 333B com sensibilidade de ($\pm 20\%$) 100 mV/g (10.2 mV/(m/s²)) e o modelo 352C22 com sensibilidade de ($\pm 15\%$) 10 mV/g (1 mV/(m/s²)).

O sinal utilizado para excitar o geofone foi o sinal do tipo chirp, descrito no capítulo 3 deste trabalho. Para melhor entendimento, este é mostrado novamente na Figura 5.9.

Figura 5.9 – Sinal do tipo chirp utilizado para excitar o geofone.



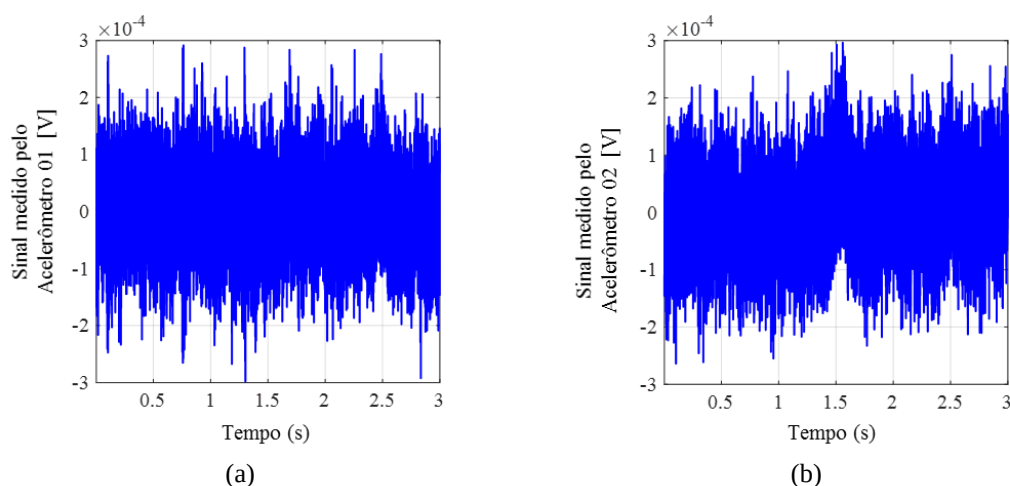
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Resultados

- Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado a vibração provocada pela bomba pressurizadora como fonte de excitação externa

A Figura 5.10 mostra os sinais capturados pelos acelerômetros quando utilizado a bomba pressurizadora do sistema fora da seção da tubulação como fonte excitadora para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento. O sinal temporal adquirido pelos acelerômetros nos pontos 1 e 2 são mostrados na Figura 5.10(a) e 5.10(b), respectivamente.

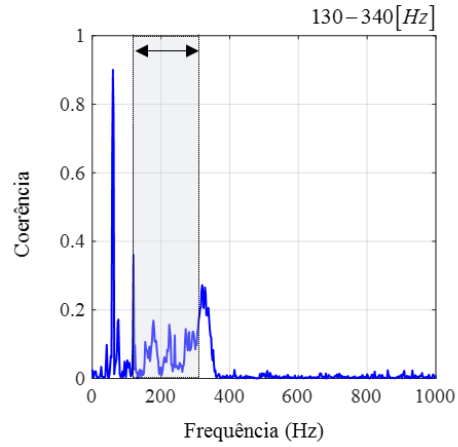
Figura 5.10 – Sinal temporal medido pelo acelerômetros do protótipo instalados sob o case quando a bomba de pressurização do sistema estava ligada; (a) Sinal medido com o acelerômetro 01 do protótipo instalado no ponto de acesso 01 ;(b) Sinal medido com o acelerômetro 02 do protótipo instalado no ponto de acesso 02.



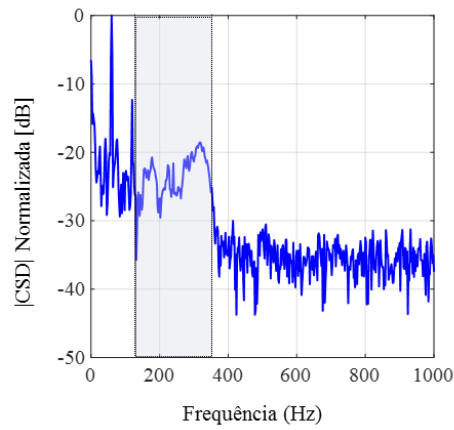
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.11 mostra os resultados gráficos obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado a bomba pressurizadora do sistema como fonte excitadora. O tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral cruzada para a faixa de frequência de 130 a 340 Hz foi de 12.08 ms, que equivale a uma velocidade de 579 m/s, vide Fig. 5.11(c).

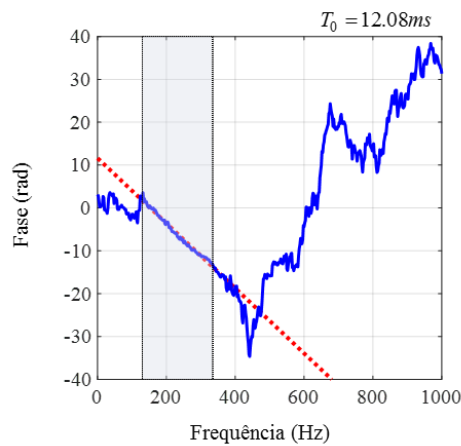
Figura 5.11 – Resultados obtidos na medição do ruído da bomba pressurizadora do sistema; (a) Coerência; (b) Módulo da CSD Normalizado; (c) Fase da CSD. Sinal Medido; Reta estimada.



(a)



(b)

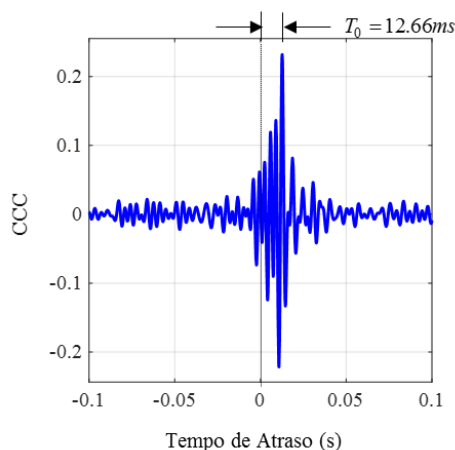


(c)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação cruzada após a aplicação do filtro passa-faixa (130 a 340 Hz) nos sinais no domínio do tempo pode ser visto na Fig. 5.12. O tempo de atraso calculado foi de 12.66 ms que corresponde a uma velocidade de propagação de 553 m/s.

Figura 5.12 – Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais medidos quando um utilizada a bomba pressurizadora como fonte de excitação.

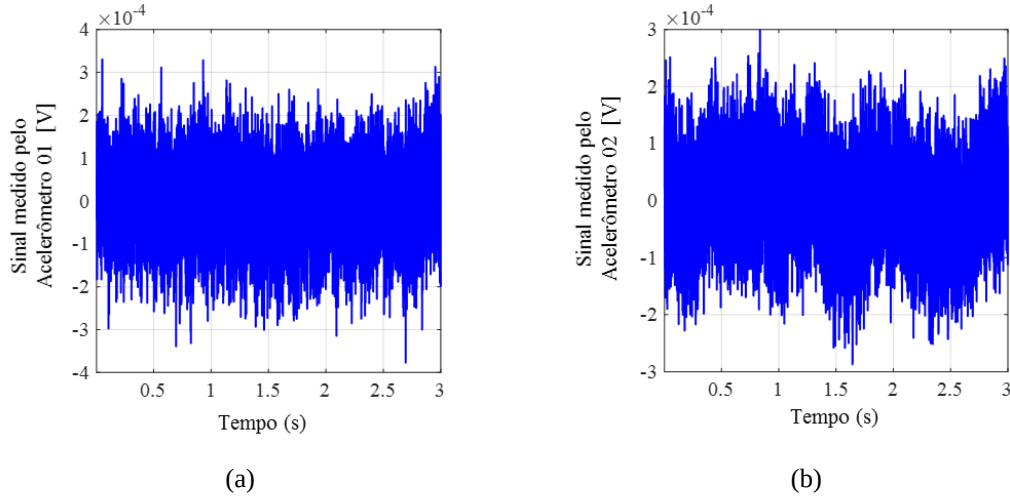


Fonte: Elaborado pelo autor.

- Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado um vazamento externo como fonte de excitação

A Figura 5.13 mostra os sinais capturados pelos acelerômetros quando utilizado a vazamento fora da seção da tubulação (vazamento 1) como fonte excitadora para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento. O sinal temporal adquirido pelos acelerômetros nos pontos 1 e 2 são mostrados na Figura 5.13(a) e 5.13(b), respectivamente.

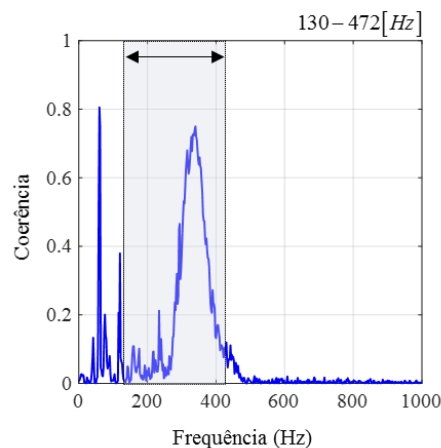
Figura 5.13 – Sinal temporal medido pelo acelerômetros do protótipo instalados sob o *case* quando utilizado o vazamento 01 localizado fora da seção da tubulação em análise; (a) Sinal medido com o acelerômetro 01 do protótipo instalado no ponto de acesso 01 ;(b) Sinal medido com o acelerômetro 02 do protótipo instalado no ponto de acesso 02.



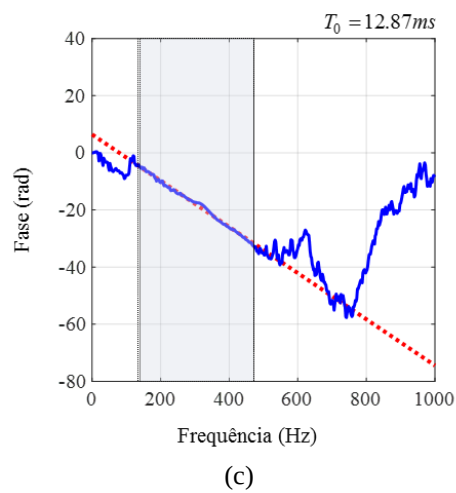
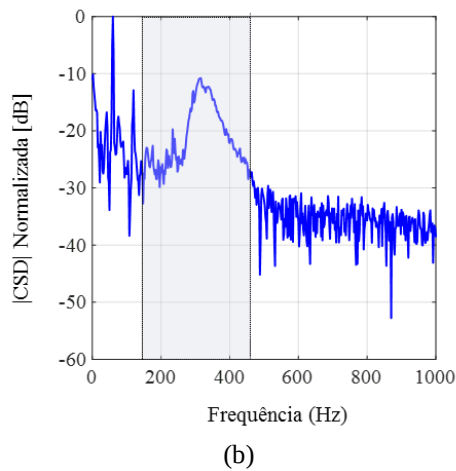
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.14 mostra os resultados gráficos obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado o vazamento 01 como fonte excitadora. O tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral cruzada para a faixa de frequência de 130 a 472 Hz foi de 12.87 ms, que equivale a uma velocidade de 544 m/s, vide Fig. 5.14(c).

Figura 5.14 – Resultados obtidos na medição do ruído do vazamento 01; (a) Coerência; (b) Módulo da CSD Normalizado; (c) Fase da CSD. — Sinal Medido; Reta estimada.



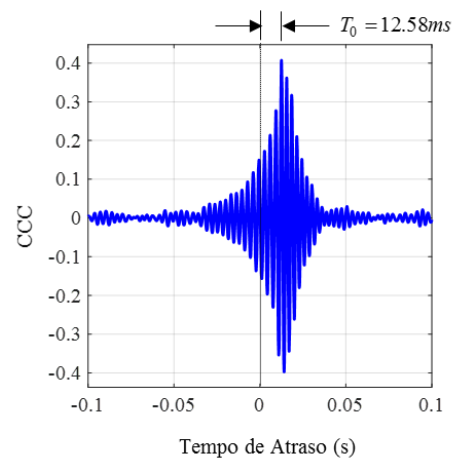
(a)



Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação cruzada após a aplicação do filtro passa-faixa (130 a 472 Hz) nos sinais no domínio do tempo pode ser visto na Fig. 5.15. O tempo de atraso calculado foi de 12.58 ms que corresponde a uma velocidade de propagação de 556 m/s.

Figura 5.15 – Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais medidos quando um utilizado o vazamento 01 como fonte de excitação.

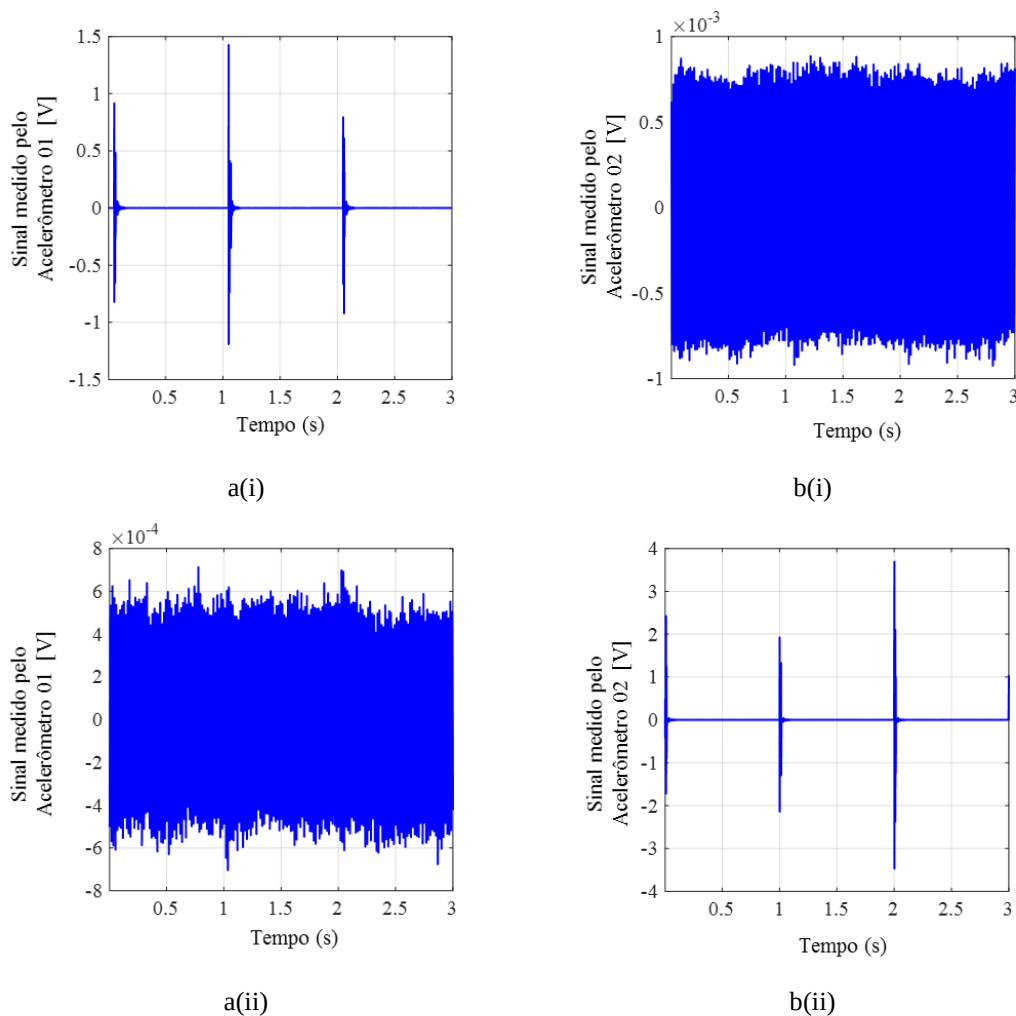


Fonte: Elaborado pelo autor.

- Estimativa da velocidade de propagação quando utilizado um atuador como fonte de excitação

A Figura 5.16 mostra os sinais capturados pelos acelerômetros quando o geofone para realizar impactos na tubulação. O sinal temporal adquirido pelos acelerômetros nos pontos 1 e 2 são mostrados na Figura 5.16a (i) e 5.16b (i) respectivamente, quando aplicado impacto no ponto de acesso 01. Já nas Figura 5.16a (ii) e 5.16b (ii) são mostrados os sinais medidos pelos acelerômetros quando realizado o impacto no ponto de acesso 02.

Figura 5.16 – Sinal temporal medido pelo acelerômetros do protótipo instalados sob o *case* quando utilizado o impacto do atuador como fonte de excitação; A legendas ‘i’ e ‘ii’ correspondem aos sinais medidos quando aplicado o impacto no ponto de acesso 01 e 02, respectivamente; (a) Sinal medido com o acelerômetro 01 do protótipo instalado no ponto de acesso 01 ;(b) Sinal medido com o acelerômetro 02 do protótipo instalado no ponto de acesso 02.

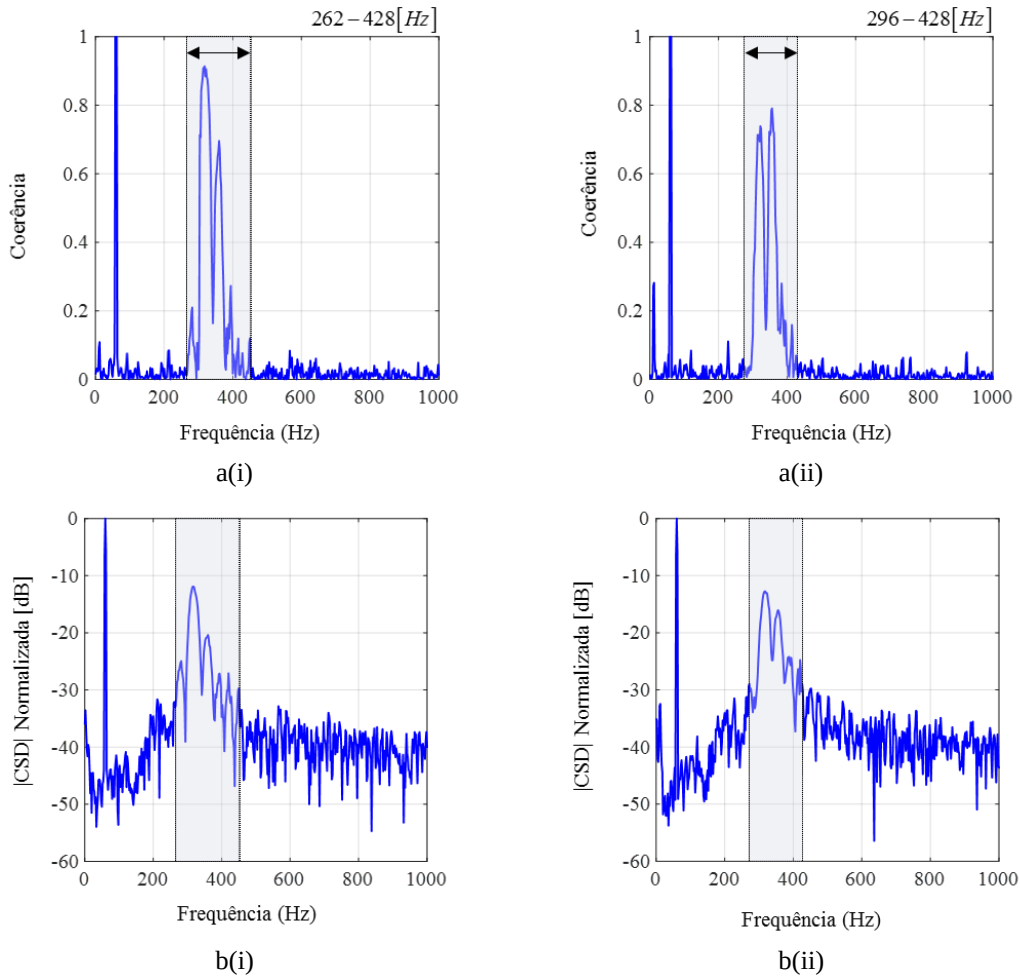


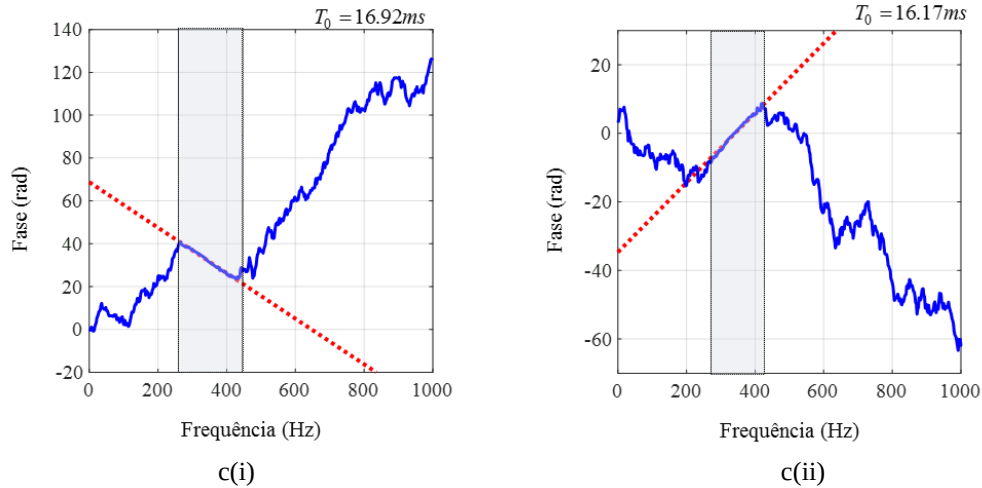
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.17 (i) mostra os resultados obtidos no domínio da frequência para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado o atuador para impactar o ponto de acesso 01. O tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral cruzada para a faixa de frequência de 262 a 428 Hz foi de 16.92 ms, que equivale a uma velocidade de 414 m/s, vide Fig. 5.17c (i).

A Figura 5.17 (ii) mostra os resultados gráficos obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento quando utilizado o atuador para impactar o ponto de acesso 02. O tempo de atraso calculado através do gradiente da fase da densidade espectral cruzada para a faixa de frequência de 296 a 428 Hz foi de 16.17 ms, que equivale a uma velocidade de 433 m/s, vide Fig. 5.17c (ii).

Figura 5.17 – Resultados obtidos na medição do ruído da bomba pressurizadora do sistema; A legendas ‘i’ e ‘ii’ correspondem aos sinais medidos quando aplicado o impacto no ponto de acesso 01 e 02, respectivamente; (a) Coerência; (b) Módulo da CSD Normalizado; (c) Fase da CSD. — Sinal Medido; Reta estimada.



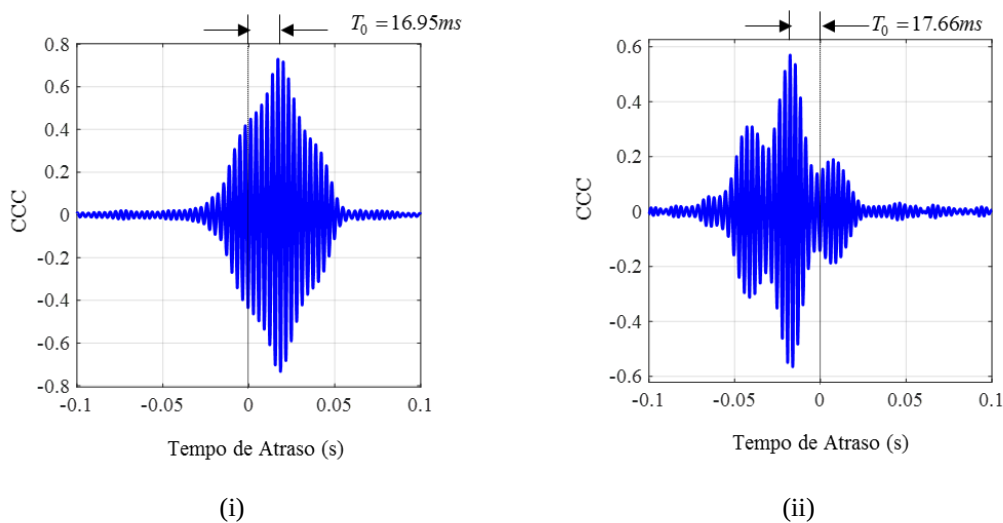


Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação cruzada após aplicar um filtro passa-faixa (262 a 428 Hz) nos sinais no domínio do tempo é mostrado na Fig. 5.18 (i), onde foi aplicado o impacto no ponto de acesso 01, apresentou como resultado um tempo de atraso de valor igual a 16.95 ms, que corresponde a uma velocidade de 413 m/s.

Enquanto, ao aplicar impacto no ponto de acesso 02, o coeficiente de correlação cruzada, após aplicar um filtro passa-faixa (296 a 428 Hz) nos sinais no domínio do tempo, é mostrado na Fig. 5.18 (ii). O tempo de atraso obtido corresponde a 17.66 ms, o que equivale a uma velocidade de 396 m/s.

Figura 5.18 – Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais medidos quando um utilizada um atuador para impactar a tubulação. A legendas ‘i’ e ‘ii’ correspondem aos sinais medidos quando aplicado o impacto no ponto de acesso 01 e 02, respectivamente;



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 5.2 são mostrados os resultados obtidos neste experimento. Ressaltando ao leitor que o valor apresentado como velocidade corresponde ao valor médio da velocidade de propagação obtida através do tempo de atraso obtido pela CSD e a velocidade obtida através do tempo de atraso obtido pelo CCC.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento.

Tipo de Excitação	Fonte	Tempo obtido pela Fase da CSD [ms]	Tempo obtido pela CCC [ms]	Velocidade [m/s]
Externa	Bomba	12.08	12.66	566
	Vazamento 01	12.87	12.58	550
Impacto	Ponto de Acesso 1	16.92	16.95	413.5
	Ponto de Acesso 2	16.17	17.66	415
Cálculo Teórico				495

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3 Discussão dos resultados

Os procedimentos adotados para a realização deste experimento foram similares aos procedimentos adotados nas realizações dos experimentos mostrados no capítulo anterior. Entretanto, a Tabela 5.2 evidencia que os resultados obtidos para a estimativa da velocidade de propagação utilizando o impacto produzido pelo case não foi satisfatório, o que comprova a necessidade de melhorias. Possivelmente, a divergência dos resultados possa estar associada com alguns fatores, tais como: o posicionamento do sensor no case, as características dinâmicas e a maneira de como fora acoplado o case juntamente a tubulação no ponto de acesso. Para tanto, este foi o primeiro experimento realizado utilizando o case em campo. Acredita-se que a partir destes resultados, é possível aprimorá-lo em busca de melhorar sua performance na estimativa da velocidade de propagação.

Um outro aspecto que deve ser levado em conta é o fato do campo de prova ter sido continuamente modificado, o que acaba dificultado a repetibilidade dos experimentos realizados.

5.4 Conclusão

Neste capítulo, fora comentado alguns dos principais aspectos relacionados a concepção do protótipo do correlacionador. Inicialmente fora abordado sobre as diferenças existentes entre as duas versões do protótipo. A primeira versão seria a base para a segunda versão, onde essa apresentaria como inovação a opção de estimar a velocidade de propagação experimentalmente. Em seguida fora abordado os programas desenvolvidos para cada uma das versões desenvolvidos no software MATLAB® fazendo uso de uma interface conhecida como *Guide*. E por fim, fora mostrado aspectos relacionados a concepção do invólucro (*case*) contendo o sensor/atuador que será utilizado no segundo protótipo, resultados obtidos em laboratório e também resultados obtidos no campo de provas. Pode-se concluir que, inicialmente, o *case* não proporcionou bons resultados em campo, entretanto, isso abre a oportunidade de aperfeiçoá-lo e melhorá-lo em futuras pesquisas.

CAPÍTULO 06 - CONCLUSÕES

6.1 Tópicos da Tese

Este capítulo resume todo o trabalho desenvolvido nesta tese de doutorado e apresenta as principais conclusões obtidas e também as recomendações para trabalhos futuros. O principais objetivos desta tese de doutorado são: a modelagem do impacto produzido por um geofone que será utilizado para aplicar a metodologia proposta para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento em uma tubulação, realização de experimentos em uma seção de um campo de provas estimando a velocidade de propagação e a localização de um vazamento e por fim trabalhar em conjunto com o grupo de pesquisa do projeto para o desenvolvimento de um protótipo de correlacionador utilizando componentes de baixo custo. Para atingir estes objetivos a dissertação foi dividida da seguinte forma:

No capítulo 01 foi apresentado o escopo deste trabalho, através de uma revisão de literatura, na qual foram comentados brevemente sobre alguns dos métodos conhecidos atualmente para a detecção de vazamento. Em seguida foi apresentada a proposta de construção do protótipo do correlacionador acústico e por fim, apontando quais são os objetivos e contribuições deste trabalho.

O capítulo 02 apresentou um estudo sobre o método acústico de correlação, introduzindo os principais conceitos envolvidos nesta metodologia. Através de simulações computacionais, foi utilizado o modelo proposto por Gao *et al.* (2004) e Brennan *et al.* (2018) para representar o modelo de uma tubulação subterrânea, a fim de demonstrar a física do problema, o processamento de sinais utilizado pela técnica de correlação e também investigação sobre fatores que podem influenciar na qualidade da estimativa da localização de vazamento.

No Capítulo 03 fora apresentado um estudo sobre a modelagem do impacto produzido por um geofone quando configurado como atuador, sendo realizado testes em bancada para validação do modelo desenvolvido. Finalizou-se o capítulo associando o modelo de impacto do geofone combinado com o modelo da tubulação proposto por Gao *et al.* (2004), simulando uma situação onde seria realizada a metodologia para a estimativa da velocidade de propagação em uma seção de uma tubulação.

No capítulo 04 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente em um campo de provas, tendo como objeto de estudo a estimativa da velocidade de propagação de uma seção de tubulação plástica, utilizando dois tipos diferentes de fonte de excitação, vazamento externo e impacto produzido por um atuador. Ressalta-se que foram utilizados dois tipos de atuadores,

atuador comercial (*Integral Shaker – LMS Qsources Excitation Hardware*) e um sensor do tipo geofone configurado de modo reverso para operar como atuador.

No capítulo 5 foi detalhado o desenvolvimento do protótipo do correlacionador e suas versões, apresentou-se as interfaces gráficas desenvolvidas para o *software*, alguns aspectos sobre o hardware foram comentados brevemente e por fim mostrou-se o desenvolvimento de um invólucro (*case*) que será utilizado para abrigar o atuador e sensor na segunda versão do protótipo do correlacionador.

No capítulo 6 foram apresentados os tópicos deste trabalho, as principais conclusões obtidas e também as recomendações para trabalhos futuros.

6.2 Principais Conclusões

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. Tal técnica faz uso da estimativa do atraso (correlação-cruzada) entre os sinais adquiridos por sensores instalados em dois pontos de acesso que delimitam a seção da tubulação em análise e a velocidade com que o ruído de vazamento (GAO *et al.*, 2004).

Entretanto, existem fatores que podem influenciar a estimativa dos parâmetros citados, tais como as propriedades geométricas e construtivas do material, a dinâmica do sistema de tubulações e até mesmo o tipo de solo onde a tubulação está enterrada. Correlacionadores encontrados no mercado utilizam um valor de velocidade de propagação obtido através de valores tabelados de acordo com o tipo de material e o comprimento do tubo, entretanto, tais valores nem sempre condizem com o real valor da velocidade na seção da tubulação, o que acaba gerando uma imprecisão na estimativa da localização do vazamento (BRENNAN *et al.*, 2017).

A velocidade de propagação no qual a onda percorre a tubulação pode ser obtida através da parte real do número de onda. Pesquisadores na área de detecção de vazamento buscaram alternativas para medir a velocidade de propagação através da realização de experimentos em laboratório, entretanto, tal metodologia não é de fácil aplicação em situações reais de detecção de vazamento. Almeida *et al.* (2015) propôs um método experimental, robusto e ao mesmo tempo simples, para a realização da estimativa da velocidade de propagação. Tal método

consiste em excitar o tubo com um atuador eletromecânico nos pontos de acesso, onde estão localizados os sensores.

Neste trabalho, foi realizada uma investigação sobre o uso do geofone como atuador para gerar vibração através de impactos. 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). Iniciou-se o estudo analisando o impacto produzido por um geofone, quando configurado para operar de modo reverso, agindo então como um atuador. Foi realizado um experimento que consistia em analisar a força produzida através do impacto produzido pelo geofone, quando excitado por dois tipos de sinais, um senoidal e o outro sinal do tipo chirp. Em seguida, foi proposto um modelo que representasse o impacto produzido pelo geofone, com o objetivo de buscar uma aproximação com o resultado experimental, possibilitando assim realizar análises, buscando determinar um padrão de comportamento apresentado pelo geofone, quando esse agindo como atuador. Foram realizadas simulações computacionais, onde utilizou-se a metodologia proposta por Almeida (2013), baseada na utilização de impactos na tubulação para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento, associada ao modelo da tubulação proposto por Gao *et al.* (2004) e fazendo uso dos modelos desenvolvidos referentes ao impacto do geofone como fonte de excitação em um dos pontos de acesso. Com a realização desta simulação, ambos os sinais apresentaram o mesmo resultado para o tempo de atraso, entretanto foi possível constatar que o sinal do tipo chirp apresentou resultados gráficos mais simples e de fácil entendimento para a determinação do tempo de atraso entre os sinais.

Foram realizados experimentos em um campo de prova da SABESP utilizado pela companhia para avaliar equipamentos de detecção de vazamento e treinamento de pessoal. Neste campo de prova é possível realizar vazamentos em condições “controladas”, dessa forma, os experimentos realizados objetivaram-se em determinar as características vibro-acústicas de uma seção da tubulação subterrânea. Foram utilizadas duas abordagens diferentes para realizar a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento. A primeira se baseia na utilização de um vazamento localizado fora da seção da tubulação, como fonte excitadora, fazendo com que a vibração provocada pelo vazamento se propague e seja detectada pelos acelerômetros instalados em dois pontos de acesso distintos, sendo a distância entre eles conhecida. A segunda metodologia utiliza um atuador instalado em um dos pontos de acesso para provocar impactos controlados na tubulação. Dois tipos diferentes de atuadores foram utilizados, o primeiro foi um atuador comercial LMS Siemens e o segundo foi um geofone

configurado de modo reverso. Foi observado que a velocidade de propagação do ruído de vazamento, quando utilizado um vazamento fora da seção como fonte excitadora, apresentou uma velocidade maior do que quando comparado aos resultados obtidos através da metodologia que utilizava o atuador. Esta divergência de valores pode estar associada a efeitos de reflexão que possam estar ocorrendo na tubulação dependendo do tipo de excitação que está sendo utilizada ou até mesmo, a maneira como foi feita a ligação entre o ponto de acesso e a tubulação subterrânea, onde provavelmente possa existir alterações quanto a forma de transmissão do ruído nesta junção. De forma a verificar os resultados obtidos para a velocidade de propagação, foi realizado uma análise comparativa, onde foi gerado um vazamento entre os pontos de acesso em seguida foi realizada a medição do tempo de atraso, esse resultado juntamente com a estimativa da velocidade de propagação possibilitou realizar um comparativo entre os resultados obtidos para a localização do vazamento. Através desse comparativo, pode-se comprovar que o geofone quando configurado como um atuador, apresentou bons resultados para a estimativa da velocidade de propagação, quando excitado por um sinal do tipo chirp.

Por fim, foram comentados alguns dos principais aspectos relacionados a concepção do protótipo do correlacionador, sendo detalhado aspectos quanto ao *software*, *hardware* e o invólucro que será utilizado para abrigar o sensor e o atuador na segunda versão do protótipo. Ainda são necessárias alterações e melhoramentos no protótipo a fim de deixa-lo mais robusto para ser utilizado em campo, entretanto pode-se observar a evolução do desenvolvimento deste equipamento, onde futuramente proporcionará resultados bastante promissores.

6.3 Recomendações para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que podem ser realizados a partir dos tópicos contidos neste trabalho de tese.

1. Estudo quanto a transmissão do ruído na junção entre o ponto de acesso e a tubulação subterrânea;
2. Aplicar as metodologias propostas neste trabalho para a estimativa da velocidade de propagação e a localização do vazamento em uma seção de tubulação metálica existente no campo de provas da SABESP;
3. Desenvolvimento de uma modelagem eletromecânica do geofone que procure representa-lo quando operando como atuador;
4. Desenvolvimento de um sistema de *hardware* e *software* mais robusto para o protótipo do correlacionador;

5. Aperfeiçoamento do invólucro (*case*) a fim de obter melhores resultados para a estimativa da velocidade de propagação do ruído de vazamento;
6. Realização de medições utilizando o protótipo do correlacionador em situações reais para a localização de vazamentos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). **Water loss control: Apparent and Real Losses**, 2012.

ALMEIDA, F. C. L. **Improved acoustic methods for leak detection in buried plastic water distribution pipes**. 2013. 240 f. Thesis (Doctor in Mechanical Engineering) - Universidade de Southhampton, Southhampton, 2013.

ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P.; WHITFIELD, S.; DRAY, P. F. The dynamic behavior of a buried water pipe and its effect on Leak Location using Acoustic Methods. *In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DAMAGE ASSESSMENT OF STRUCTURES*, 10, 2013, Dublin. **Proceedings of the [...]**. Dublin: IEEE, 2013. V. 569-570, p. 1194-1201.

ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P.; DRAY, S.; WHITFIELD, S.; PASCHOALINI, A. On the acoustic filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe and its effect on leak detection: an experimental investigation. **Sensors**, Basel, v. 14, p. 5595-5610, 2014.

ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P.; DRAY, S.; WHITFIELD, S. Towards in-situ measurement of wave velocity in buried plastic water distribution pipes for the purposes of leak location. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 359, p. 40-55, 2015.

ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P.; GAO Y.; PASCHOALINI, A. The effects of resonances on time delay estimation for water leak detection in plastic pipes. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 420, p. 315-329, 2017.

BENDAT, J. S.; PIERSON, A. G. **Random data analysis and measurement procedures**, 2. ed. New York: Wiley, 2010.

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. **Computer & Fluids**, Oxford, v. 57, p. 110-123, 2012.

BENOUAHI, M.; UEDA, S. accountable water and sanitation governance: japan's experience. *In: water in the arab world. Management perspectives and innovations*, World Bank, 2009, p. 131-156.

BRENNAN, M. J.; ALMEIDA, F. C. L.; JOSEPH, P.; DRAY, S.; WHITFIELD, S. Wavespeed measurement in buried water distribution pipes and its significance in leak location. **Key Engineering Materials**, Pfaffikon, v. 569-570, p. 1202-1209, 2013.

BRENNAN, M. J.; LIMA, F. K.; ALMEIDA, F. C. L.; JOSEPH, P. F.; PASCHOALINI, A. T. A virtual pipe rig for testing acoustic leak detection correlators: proof of concept. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 102, p. 137-145, 2016.

BRENNAN, M. J.; ALMEIDA, F. C. L.; LIMA, F. K.; AYALA, P.; PASCHOALINI, A. Measurement of the speed of leak noise propagation in buried water pipes: challenges and difficulties. *In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DYNAMIC PROBLEMS OF MECHANICS*, 17, 2017, São Sebastião. **Proceedings of the [...]**. São Sebastião: [s.n.], 2017. p 511-522.

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

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

CHEONG, L. C. Unaccounted for water and the economics of leak detection. **Water Supply**, London, v. 9, p. 3-4, 1991.

FAHMY, M.; MOSELHI, O. Detecting and locating leaks in underground water mains using thermography. *In: PROCEEDINGS OF THE ISARC*, 26, 2009, Austin. **Proceedings of the [...]**. Austin: [s.n.], 2009. p. 61-67.

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

FULLER, C. R.; FAHY, F. J. Characteristics of wave-propagation and energy-distributions in cylindrical elastic shells filled with fluid, **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 81, p. 501-518, 1982.

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

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

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

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

HUNAIDI, O. Ground-penetrating radar for detection of leaks in buried plastic water distribution pipes. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND-PENETRATING RADAR*, 7, 1998, Lawrence Kansas. **Conference [...]**. Lawrence Kansas: [s.n.], 1998. p. 783-786.

HUNAIDI, O.; CHU, W. T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 58, p. 235 – 254, 1999.

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

HUNAIDI, O. **Detecting leaks in water-distribution pipes**. Canada: National Research Council, 2000. Construction Technology Update, 40.

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

INFORMAÇÃO. *In*: BRASIL fica na 20ª posição em ranking internacional de perda de água. Karina Trevizan, São Paulo: G1 - Globo. 2014. Disponível em: <http://g1.globo.com/economia/crise-da-agua/noticia/2015/03/brasil-fica-na-20-posicao-em-ranking-internacional-de-perda-de-agua.html>. Acesso em: 11 maio 2019.

INFORMAÇÃO. *In*: BRASIL joga pelo ralo 38% de água com boa qualidade. Ana Paula Ribeiro, O Globo. 2018. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/brasil-joga-pelo-ralo-38-de-agua-com-boa-qualidade-22522488>. Acesso em: 11 maio 2019.

INFORMAÇÃO. *In*: TUBULAÇÃO velha da Sabesp causa perdas no centro de São Paulo. São Paulo: Época Negócios. 2014. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Informacao/Dilemas/noticia/2014/04/tubulacao-velha-da-sabesp-causa-perdas-no-centro-de-sao-paulo.html>. Acesso em: 11 maio 2019.

LYON, R. H. **Machinery noise and diagnostics**. Stoneham: Butterworth, 1986.

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

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

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J. The design and instrumentation of an experimental rig to investigate acoustic methods for the detection and location of underground piping systems. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 69, p. 1101 – 1107, 2008.

OPPENHEIM A.V.; SCHAFER, R. W. **Signals & Systems**. 2.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1997.

OBATA, D.; BRENNAN, M. J.; ALMEIDA, F. C. L.; AYALA, P. C.; LIMA, F. K.; PASCHOALINI, A. T. Sincronização de sinais via GPS para sistemas de detecção de vazamentos por correlação cruzada. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, CONEM, 10, 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: ABCM, 2018.

PINNINGTON, R. J.; BRISCOE, A. R. Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe. **Journal of Sound and Vibration**, London, v.173, p. 503 – 516, 1994.

PINNINGTON, R. J. The axisymmetric wave transmission properties of pressurized flexible tubes. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 204, p. 271 – 289, 1997.

REICH, G. Leak detection with tracer gases, sensitivity and relevant limiting factors. **Vacuum**, Oxford, v. 37 n. 8-9, p. 691-698, 1987.

SCUSSEL, O.; BRENNAN M. J.; MUGGLETON, J. M.; ALMEIDA, F.C.L.; PASCHOALINI, A. T. Estimation of the bulk and shear moduli of soil surrounding a plastic water pipe using measurements of the predominantly fluid wave in the pipe. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 164, p. 237 – 246, 2019.

SHIN, K.; HAMMOND, J. K. **Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers**. Chichester: Wiley, 2008.

USAID. SUWASA Nigeria: water sector reforms in bauchi state. Restaurado 16 de Abril de 2012.

WEIL, G. J. Non-contact, remote sensing of buried water pipeline leaks using infrared thermography. *In*: WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT AND URBAN WATER RESOURCES, 20, 1993, Seattle. **Proceedings of the [...]** Seattle: ASCE, 1993. p. 404-407.

APÊNDICE – DESENHO DO INVÓLUCRO (CASE)

