



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



**Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica**

**Desempenho dos Métodos de Instalação de Transdutores
Piezelétricos em Sistemas de Monitoramento de
Integridade Estrutural Baseados na Impedância
Eletromecânica**

RICARDO ZANNI MENDES DA SILVEIRA

Bauru – SP
2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Desempenho dos Métodos de Instalação de Transdutores
Piezelétricos em Sistemas de Monitoramento de
Integridade Estrutural Baseados na Impedância
Eletromecânica**

RICARDO ZANNI MENDES DA SILVEIRA

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista

Bauru – SP
2017

da Silveira, Ricardo Zanni Mendes.

Desempenho dos Métodos de Instalação de Transdutores Piezelétricos em Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica / Ricardo Z. M. da Silveira, 2017

53 f.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista

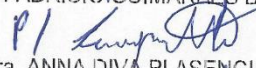
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

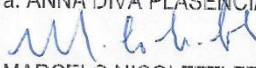
1. Instalação. 2. Detecção de dano. 3. Sistemas SHM. 4. Transdutores Piezelétricos. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RICARDO ZANNI MENDES DA SILVEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de maio do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB/videoconferência, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Prof. Dr. MARCELO NICOLETTI FRANCHIN do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RICARDO ZANNI MENDES DA SILVEIRA, intitulada **DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE INSTALAÇÃO DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADOS NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA


Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO


Prof. Dr. MARCELO NICOLETTI FRANCHIN

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me abençoar.

À minha família, meu alicerce.

À minha mãe, Gláucia (in memoriam), pelo amor, pelo carinho, pelo exemplo de pessoa e por tudo que foi em vida. Mulher admirável.

Ao meu pai, Waldemir, pelo ser humano e profissional fantástico que é. De princípios e caráter íntegros. Pessoa imprescindível.

Ao meu irmão, Marcelo, pelo amor, parceria e pelo exemplo de amizade.

À minha amada noiva, Ticiane, pelo apoio, pela compreensão e pelo amor pleno dedicado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista, pela inspiração e profunda contribuição em minha formação acadêmica, pela ajuda e dedicação durante todas as etapas deste trabalho. Reitero minha amizade, meu respeito, minha admiração e minha gratidão.

Aos amigos que permaneceram sempre ao meu lado: Leandro Melo, Everaldo Freitas, Pedro Oliveira, Danilo Ribeiro, Felipe Alexandre, Wenderson Nascimento, Danilo Budoya e Bruno Castro.

À comissão examinadora.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo auxílio financeiro (Processo 2015/02500-6) recebido nesta pesquisa.

RESUMO

Transdutores piezelétricos são amplamente utilizados em muitos métodos não destrutivos para a detecção de danos estruturais em aplicações de monitoramento de integridade estrutural ou SHM (*Structural Health Monitoring*). Dentre os vários métodos não destrutivos, a técnica da impedância eletromecânica (E/M) é conhecida por utilizar cerâmicas piezelétricas pequenas e finas que desempenham simultaneamente as funções de atuador e sensor. O método convencional de instalação dessas cerâmicas piezelétricas na estrutura é utilizando um adesivo de alta rigidez como cola a base de epóxi ou cianoacrilato. No entanto, alguns estudos propõem métodos alternativos de instalação do transdutor, visando a sua reutilização ou que permitam o monitoramento em condições adversas sob as quais a instalação direta do sensor não seria possível. Assim, esta dissertação de mestrado apresenta uma análise experimental comparativa entre os principais métodos de acoplamento entre o transdutor piezelétrico e a estrutura monitorada em sistemas de SHM baseados na técnica da impedância eletromecânica (E/M). Os acoplamentos dos transdutores piezelétricos foram realizados pelos métodos da instalação direta, também conhecida como instalação convencional, por acoplamento magnético e lâminas de alumínio. O transdutor utilizado para os métodos de acoplamento foi o diafragma piezelétrico, comumente conhecido como *buzzer*. Testes com os três métodos de instalação foram realizados em estruturas de alumínio e o dano estrutural foi induzido por meio de adição de massa metálica (porca de aço), fixada diretamente na estrutura com cola a base de cianoacrilato. A análise comparativa entre os métodos de instalação foi realizada utilizando índices de danos obtidos das assinaturas de impedância elétrica dos diafragmas piezelétricos, além da função de resposta em frequência (FRF) e da densidade espectral de potência obtida pelo método da quebra do grafite. Os resultados experimentais apontam características importantes para os métodos de instalação, os quais têm influência significativa sobre a resposta em frequência e sensibilidade para a detecção de danos estruturais.

Palavras-chave: Transdutores piezelétricos, SHM, impedância eletromecânica, instalação, dano.

ABSTRACT

Piezoelectric transducers are widely used in many non-destructive methods for detecting structural damage in Structural Health Monitoring (SHM) applications. Among the various techniques for detecting structural damage, the electromechanical impedance (EMI) technique is known to use fine and small piezoelectric ceramics that simultaneously perform the actuator and sensor functions. The conventional method of installing these piezoelectric ceramics in the structure is by using a high stiffness adhesive such as epoxy or cyanoacrylate based glue. However, some studies propose alternative methods of installing the transducer for reuse or to allow monitoring under adverse conditions under which direct sensor installation would not be possible. Thus, this master's thesis presents a comparative experimental analysis between the main coupling methods between the piezoelectric transducer and the monitored structure in SHM systems based on the electromechanical impedance technique. The piezoelectric transducer couplings were made by direct installation methods, also known as conventional installation, by magnetic coupling and aluminum foils. The transducer used for the coupling methods was the piezoelectric diaphragm, commonly known as buzzer. Tests with these methods were carried out on aluminum structures and the structural damage was induced using metallic masses (steel nuts), fixed directly to the structure with cyanoacrylate-based glue. The comparison of the results analysis between the coupling methods was performed using the indices of damages obtained from electrical impedance signatures of the piezoelectric diaphragm, the frequency response function (FRF) and the power spectral density (PSD) obtained by pencil lead break (PLB) test. The experimental results indicate important characteristics for each installation method and that the mounting method has a significant influence on the frequency response and sensitivity for the detection of structural damage.

Keywords: Piezoelectric transducers, SHM, electromechanical impedance, mounting, damage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Configuração básica utilizada no método convencional da impedância E/M	21
Figura 2: Sistema de medição utilizado no método convencional da impedância E/M.....	23
Figura 3: Sistema de medição utilizado no método FRF	25
Figura 4: Sistema de medição utilizado no método PLB	27
Figura 5: Método de instalação convencional do transdutor piezelétrico.	30
Figura 6: Método de instalação utilizando ímãs magnéticos	31
Figura 7 : Método de instalação MWBEMI	32
Figura 8: Porca de parafuso simulando o dano na estrutura	33
Figura 9: Método FRF utilizando o método de instalação MWBEMI.....	34
Figura 10: Procedimento para execução do método PLB	34
Figura 11: Sinais de tensão obtidos no domínio do tempo.....	36
Figura 12: PSDs obtidos no domínio da frequência	37
Figura 13: Parte real das assinaturas de impedância obtidas sob a condição despreendida da estrutura	38
Figura 14: Parte real da assinatura de impedância obtida para cada método de instalação fixado na estrutura monitorada.....	39
Figura 15: Assinaturas de impedância obtidas para a estrutura em condições íntegra e danificada. .	40
Figura 16: Índices RMSD obtidos para danos à distâncias de (a) 100 mm e (b) 1000 mm do transdutor ou método de instalação.....	41
Figura 17: Índices CCDM obtidos para danos às distâncias de (a) 100 mm e (b) 1000 mm do transdutor ou método de instalação.....	42
Figura 18: Relevância das assinaturas de FRF obtidas para os métodos convencional e magnético.	43
Figura 19: Relevância das assinaturas de FRF obtidas para o método de instalação MWBEMI	44
Figura 20: Assinaturas FRF obtidas para a estrutura sob a condição íntegra e sob a condição danificada.....	45
Figura 21: Índices RMSD e CCDM obtidos para o método FRF de transferência	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores máximos obtidos para cada método de instalação em todos os ensaios	47
---	----

LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

AE	<i>Acoustic Emission</i> – Emissão Acústica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Conversor Analógico – Digital
CCDM	<i>Correlation Coefficient Deviation Metric</i> – Desvio do coeficiente de correlação
CDA	Conversor Digital – Analógico
DAQ	<i>Data Acquisition</i> – Dispositivo de aquisição de dados
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> – Transformada de Fourier discreta
E/M	Eletromecânica
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada rápida de Fourier
FRF	<i>Frequency Response Function</i> – Função de Resposta em Frequência
HB	<i>Hard brand</i> – Dureza média
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MWBEMI	<i>Metal Wire Based Eletromechanical Impedance</i> – Impedância E/M baseada em fios metálicos
MFC	<i>Macro Fiber Composite</i> – Compósito de macro fibra
NDE	<i>Non-Destructive Evaluation</i> – Avaliação não destrutiva
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i> – Ensaio não destrutivo
PC	<i>Personal Computer</i> – Computador pessoal
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i> – Conector de componentes periféricos
PCIe	<i>Peripheral Component Interconnect Express</i> – Conector expresso de componentes periféricos
PLB	<i>Pencil Lead Break</i> – Quebra do grafite
PSD	<i>Power Spectral Density</i> – Densidade Espectral
PZT	<i>Pb-Lead Zirconate Titanate</i> – Titanato zirconato de chumbo
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> – Desvio da raiz média quadrática
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento de integridade estrutural
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Barramento serial universal

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
C_c	Coeficiente de correlação	Adimensional
D	Deslocamento elétrico	C/ m ²
E	Campo Elétrico	V / m
$H(\omega)$	Função de Resposta em Frequência - FRF	Adimensional
N	Duração dos sinais	s
$Re(Z_1)$	Impedância elétrica do transdutor com a estrutura íntegra	Ω
$Re(Z_2)$	Impedância elétrica do transdutor com a estrutura com dano	Ω
R_s	Resistor Série	Ω
S	Tensor de deformação mecânica (strain)	Adimensional
S_{xx}	Auto espectro de potência	Adimensional
S_{xy}	Espectro de potência cruzado	Adimensional
T	Tensão mecânica ou stress	N / m
X	Transformada discreta de Fourier do sinal de excitação	Adimensional
Y	Transformada discreta de Fourier do sinal de resposta	Adimensional
X^*, Y^*	Conjugados complexos	Adimensional
Z_e	Impedância elétrica do transdutor	Ohm
Z_{in}	Impedância de entrada do DAQ	Ω
Z_p	Impedância mecânica do transdutor	N.s / m
Z_s	Impedância mecânica da estrutura	N.s / m
C	Capacitância estática do condutor	F
cov	Covariância da parte real da assinatura de impedância	Adimensional
d	Constante Piezelétrica	m / V
ε	Permissividade dielétrica	F / m

Símbolo	Descrição	Unidade
f	<i>Frequência</i>	<i>Hz</i>
j	<i>Número imaginário unitário</i>	<i>Adimensional</i>
s	<i>Constante de elasticidade ou compliance</i>	<i>m² / N</i>
$x(t)$	<i>Sinal de excitação do transdutor</i>	<i>V</i>
$x[n]$	<i>Sinal de excitação digital</i>	<i>V</i>
$y(t)$	<i>Sinal de resposta do transdutor</i>	<i>V</i>
$y[n]$	<i>Sinal de resposta digital</i>	<i>V</i>
ω	<i>Velocidade angular</i>	<i>rad / s</i>
ω_I, ω_F	<i>Frequência angular inicial e final</i>	<i>rad / s</i>
σ	<i>Desvio padrão</i>	<i>Adimensional</i>

PUBLICAÇÕES

Artigo completo publicado em periódico

DA SILVEIRA, R. Z. M.; CAMPEIRO, L. M.; BAPTISTA, F. G. Performance of three transducer mounting methods in impedance-based structural health monitoring applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p. 1-14, versão online. DOI: 10.1177/1045389X17689942

Artigo relacionado ao trabalho aceito para publicação em periódico

CAMPEIRO, L. M.; DA SILVEIRA, R. Z. M.; BAPTISTA, F. G. Impedance-Based Damage Detection under Noise and Vibration Effects, *Structural Health Monitoring*. Aceito para publicação.

Trabalho completo publicado em anais de congresso

DA SILVEIRA, R. Z. M.; CAMPEIRO, L. M.; BAPTISTA, F. G. Analysis of sensor installation methods in impedance-based SHM applications. In: Eurosensors 2016, 2016, Budapest. *Proceedings of the 30th anniversary Eurosensors Conference, Eurosensors 2016*, 2016. v. 168. p. 1751-1754.

SUMÁRIO

Capítulo 1

Introdução	15
1.1 Objetivos	17
1.2 Justificativa e Motivação	18
1.3 Organização do trabalho	19

Capítulo 2

Método da Impedância Eletromecânica	21
2.1 Método Convencional da Impedância Eletromecânica	21
2.2 Método da Função de Resposta em Frequência (FRF)	25
2.3. Avaliação da Sensibilidade para Detecção de Danos	26
2.3.1 Teste da Quebra do Grafite (PLB)	26
2.3.2 Índices de Danos	27

Capítulo 3

Materiais e Métodos	29
----------------------------------	-----------

Capítulo 4

Resultados e Discussão	36
4.1 Análise pelo teste PLB	36
4.2 Método Convencional Direto da Impedância E/M	437
4.3. Método da FRF	43

Conclusão	48
------------------------	-----------

Sugestão para trabalhos futuros	49
--	-----------

Referências Bibliográficas	50
---	-----------

Capítulo 1

Introdução

Na atualidade existem muitos sistemas estruturais que são utilizados diariamente por pessoas, como as grandes infraestruturas civis, entre elas pontes, barragens e oleodutos, e os diversos meios de transportes, como aeronaves e navios. Inevitavelmente, tais estruturas sofrem de avarias e desgastes, que podem ser capazes de alterar suas condições ideais de operação ou prejudicar a sua utilização segura. Devido aos elevados custos de manutenção e reparo associados aos danos que se propagam ao longo da estrutura, que podem resultar em graves acidentes e colocar em perigo a segurança de pessoas que utilizam ou trabalham com essas estruturas, as técnicas de monitoramento de integridade estrutural ou SHM (*Structural Health Monitoring*) têm sido tema de grandes estudos científicos nas últimas décadas. Os sistemas de SHM são capazes de detectar danos estruturais ainda em estágio inicial e, assim, melhorar a segurança das estruturas e reduzir os seus correspondentes custos de manutenção (FARRAR; WORDEN, 2013; BAKHT; MUFTI, 2015), prolongando a vida útil da estrutura. Recentemente, tem aumentado o interesse em utilizar transdutores piezelétricos no monitoramento de integridade estrutural, sendo desejável que a detecção de dano estrutural utilize técnicas não destrutivas (WAUGH, 2016; GIURGIUTIU, 2013), também conhecidas como NDT (*non-destructive testing*) ou NDE (*non-destructive evaluation*).

Um sistema de monitoramento de integridade estrutural abrange a observação do sistema estrutural ao longo do tempo através de medições de sua resposta dinâmica amostradas periodicamente a partir de um ou mais sensores, da extração das características sensíveis ao dano e da análise estatística dessas características para a determinação do estado atual do sistema relativo à sua integridade. O propósito de um sistema de SHM é de obter informações suficientes sobre o dano ocorrido para que procedimentos apropriados sejam executados na estrutura monitorada.

Ao abordar sistemas de integridade estrutural é importante estabelecer a definição de dano. A definição de dano tem a ver com qualquer modificação intencional ou não intencional das propriedades físicas da estrutura que podem afetar o seu desempenho atual ou futuro, fazendo com que a estrutura não apresente comportamento ideal. No caso de sistemas estruturais, o dano pode se expor de diferentes formas e, dentre as mais comuns, pode-se citar as deformações

excessivas, o desgaste, a corrosão, a ruptura ou afrouxamento de elementos de ligação e as trincas.

Os sistemas de SHM dispõem de uma estrutura completa para o monitoramento de dano estrutural, contando com uma rede de sensores, uma plataforma de aquisição, processamento e armazenamento de dados, além de um método de detecção de dano estrutural ou alteração do comportamento da estrutura monitorada.

Existem muitas técnicas para a detecção de dano estrutural, tal como a emissão acústica (OHTSU *et al.*, 2016), ondas de Lamb (KIM; CHATTOPADHYAY, 2015), correntes parasitas (ARJUN *et al.*, 2015) e métodos baseados em sensores de fibra óptica (ZHAO; BAO; AMJAD, 2015). Entre a grande diversidade de técnicas disponíveis, a técnica da impedância eletromecânica (E/M) se destaca por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo, pequenos, leves e que operam simultaneamente como sensor e atuador (ALBAKRI; TARAZAGA, 2017; NA; PARK, 2017).

Para este trabalho foi utilizado a técnica da impedância E/M por ter demonstrado ser uma técnica promissora para a aplicação de detecção de dano e para o desenvolvimento de sistemas de SHM. O princípio dessa técnica é baseado no efeito piezelétrico (MEITZLER *et al.*, 1988). Devido a esse efeito, ao se fixar um transdutor piezelétrico na estrutura a ser monitorada é estabelecida uma relação entre as propriedades elétricas do transdutor e as propriedades mecânicas da estrutura. Desta forma, a integridade da estrutura pode ser avaliada a partir da medição e análise da impedância elétrica do transdutor. Caracteristicamente, os transdutores utilizados na técnica da impedância E/M são constituídos de finas cerâmicas de PZT (*Pb-lead zirconate titanate* – titanato zirconato de chumbo) revestidas em ambas as faces por filmes metálicos que exercem a função de eletrodos.

Em razão das cerâmicas de PZT convencionais serem rígidas e quebradiças, se torna inviável a sua aplicação em estruturas com superfície irregular. Para contornar esse problema, recentemente, foram propostos os transdutores de MFC (*Macro Fiber Composite* – compósito de macro fibra) como alternativa (BRUNNER *et al.*, 2009; SHAHAB AND ERTURK, 2016). Além das cerâmicas de PZT e dos transdutores de MFC, os diafragmas piezelétricos têm sido utilizados em diversos trabalhos científicos recentes (FREITAS; BAPTISTA, 2016) por terem baixo custo e serem facilmente encontrados. Portanto, os diafragmas piezelétricos foram utilizados neste trabalho.

Os transdutores desempenham uma importante função na detecção eficiente e confiável de danos estruturais. Portanto, vários estudos descrevem o desenvolvimento e a caracterização

(CAO *et al.*, 2015), o dimensionamento apropriado (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2011; BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010a), e o correto diagnóstico e validação (OVERLY *et al.*, 2009) de transdutores para aplicações de SHM. Igualmente importante é a maneira de como os transdutores são instalados na estrutura. Portanto, objetivo deste estudo é analisar os efeitos da instalação do transdutor sobre a detecção de danos estruturais em aplicações de SHM baseadas no método impedância E/M.

Normalmente, o procedimento básico para instalar um transdutor em uma estrutura é utilizando um adesivo de elevada rigidez, como cola a base de epóxi ou cianoacrilato. Esse método básico de instalação é amplamente utilizado e pesquisado na literatura, assim como no desenvolvimento de modelos eletromecânicos (LIANG; SUN; ROGERS, 1994; ANNAMDAS; ANNAMDAS, 2009) e na análise dos efeitos da camada adesiva (MOHARANA; BHALLA, 2015). A instalação direta da cerâmica de PZT na estrutura, embora simples, tem a desvantagem de ser de difícil remoção, inutilizando a cerâmica ou danificando a estrutura. Além disso, a instalação direta do transdutor nem sempre é possível em estruturas sob condições adversas de operação. Afim de evitar tais problemas, muitos pesquisadores propuseram métodos alternativos para a instalação do transdutor.

Na; Tawie; Lee (2012), por exemplo, propuseram a fixação do transdutor por meio de um acoplamento magnético. Os autores fixaram a cerâmica de PZT em um pequeno ímã utilizando o método convencional, o qual foi acoplado à estrutura por atração magnética utilizando um segundo ímã. A solução simples proposta pelos autores permite a reutilização do transdutor e o seu fácil reposicionamento em estruturas metálicas, se necessário.

Um outro sistema alternativo foi proposto por Na; Lee (2013), no qual os autores acoplaram a cerâmica de PZT à estrutura por intermédio de um fio ou fita metálica. Recentemente, Naskar; Bhalla (2016) apresentaram um estudo experimental e numérico mais detalhado, no qual o fio metálico foi substituído por lâminas metálicas. Esse novo método de instalação é conhecido na literatura como MWBEMI (*metal wire based electromechanical impedance* – impedância E/M baseada em fios metálicos).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho de mestrado é apresentar uma análise experimental comparativa de três métodos de instalação do transdutor na estrutura: instalação convencional, por acoplamento magnético e o método MWBEMI; e avaliar se tais métodos exercem influência

significativa na resposta em frequência e na sensibilidade do transdutor piezelétrico na detecção de dano, baseada no método da impedância E/M. Os ensaios experimentais foram realizados em uma barra de alumínio, na qual os desempenhos dos três métodos de instalação foram comparados utilizando as assinaturas de impedância elétrica, os índices de danos básicos RMSD – *root-mean-square deviation*, desvio da raiz média quadrática e CCDM – *correlation coefficient deviation metric*, métrica do desvio do coeficiente de correlação, e o teste da quebra do grafite ou *pencil lead break* (PLB).

Neste estudo foram testados dois métodos de detecção de dano. Além do método da impedância E/M convencional, no qual um único transdutor opera simultaneamente como um sensor e um atuador, também foi utilizada uma variação, a técnica conhecida como o método da função de resposta em frequência (FRF), conforme é relatado por Martowicz *et al.* (2016). No método da FRF são utilizados dois transdutores, um operando como atuador e outro operando como sensor, e a detecção dos danos é fundamentado na análise das assinaturas de FRF obtidas a partir da relação entre os sinais de excitação e resposta de ambos os transdutores no domínio da frequência.

1.2 Justificativa e Motivação

A área de SHM é de grande interesse de diversos grupos de estudos técnico e científico em engenharia. Essa tendência pode ser atribuída aos elevados custos de manutenção e reparo de danos que se propagam ao longo da estrutura e que podem causar acidentes, inclusive a perda de vidas. Danos de fadigas, fissuras e corrosão estão entre as principais falhas encontradas em estruturas de engenharia civil, naval e aeronáutica. O monitoramento da integridade estrutural pode atenuar essa condição, visto que pode substituir a manutenção programada pela manutenção essencial, diminuindo manutenções imprevistas e custos, garantindo disponibilidade, qualidade e longevidade aos equipamentos e produtos. A durabilidade e monitoramento da integridade dessas estruturas são objeto de extensas pesquisas no âmbito acadêmico, governamental e industrial. Esta é uma área que requer novas e inovadoras abordagens.

A motivação é tanto científica quanto econômica. Do ponto de vista científico, monitorar e detectar danos estruturais remete a conquistar um elevado nível em segurança. Do ponto de vista econômico, sistemas com essa capacidade permitem uma economia significativa em manutenção.

Com os sistemas de monitoramento de integridade estrutural é possível reduzir significativamente os custos de programas de inspeção e prolongar a vida útil da estrutura, mantendo assim a operação de muitos sistemas estruturais seguros.

Entre as vantagens da detecção de dano estrutural baseada na impedância E/M está o uso de transdutores piezelétricos finos, leves, discretos e de baixo custo, que podem ser acoplados facilmente nas estruturas. Esses transdutores são utilizados em grande quantidade em uma extensa variedade de dispositivos eletrônicos. As aplicações são diversas, desde as mais simples, tais como microfones e autofalantes piezelétricos utilizados em dispositivos portáteis, às mais sofisticadas, como em aparelhos de tomografia na medicina. Os transdutores piezelétricos quando utilizados em sistemas de SHM possuem um grande potencial na detecção de danos e na avaliação não destrutiva.

Segundo Gyekenyesi *et al.* (2005), a técnica da impedância E/M é a única que possui condições favoráveis para o desenvolvimento de sistemas de SHM embarcados em aeronaves e em tempo real. Assim, a técnica da impedância E/M se torna evidente por possuir metodologia simples e por utilizar componentes de baixo custo, tais como os transdutores piezelétricos.

A partir da década passada, muitos trabalhos demonstraram êxito em utilizar a técnica da impedância E/M em diversas estruturas, como as mais simples, por exemplo as barras em alumínio, e também em estruturas mais complexas. No entanto, ainda existem alguns problemas para aplicações reais que devem ser investigados. Um desses problemas é encontrar um método eficiente de instalação entre o transdutor piezelétrico e a estrutura a ser monitorada, e que este método seja adequado para as condições de operação da estrutura. Por essa razão, diversos métodos de instalação foram propostos na literatura e os três métodos principais foram analisados neste trabalho.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, como segue:

- Capítulo 1: Introdução e revisão bibliográfica básica dos sistemas de SHM, objetivos, justificativa e motivação para o desenvolvimento do trabalho.

- Capítulo 2: Apresentação do método da Impedância E/M para a detecção de danos estruturais, além do método da FRF, análise da sensibilidade dos transdutores para detecção de dano, teste da quebra do grafite e índices de danos.
- Capítulo 3: Apresentação da metodologia empregada para detecção de danos. Descrição dos métodos de instalação utilizados (método convencional, método da instalação magnética, o método de instalação MWBEMI e metodologias FRF e do teste da quebra do grafite).
- Capítulo 4: Apresentação dos resultados experimentais, comparando o comportamento dos transdutores envolvidos para cada método de instalação. O primeiro teste realizado foi o da análise de sensibilidade ao dano usando o teste da quebra do grafite (PLB), o segundo foi o da viabilidade de detectar danos estruturais pelo método da impedância E/M usando as assinaturas de impedância elétrica e os índices RMSD e CCDM e o terceiro teste analisou os efeitos através do método da FRF.
- Capítulo 5: Considerações finais, perspectivas para trabalhos futuros e referências bibliográficas utilizadas.

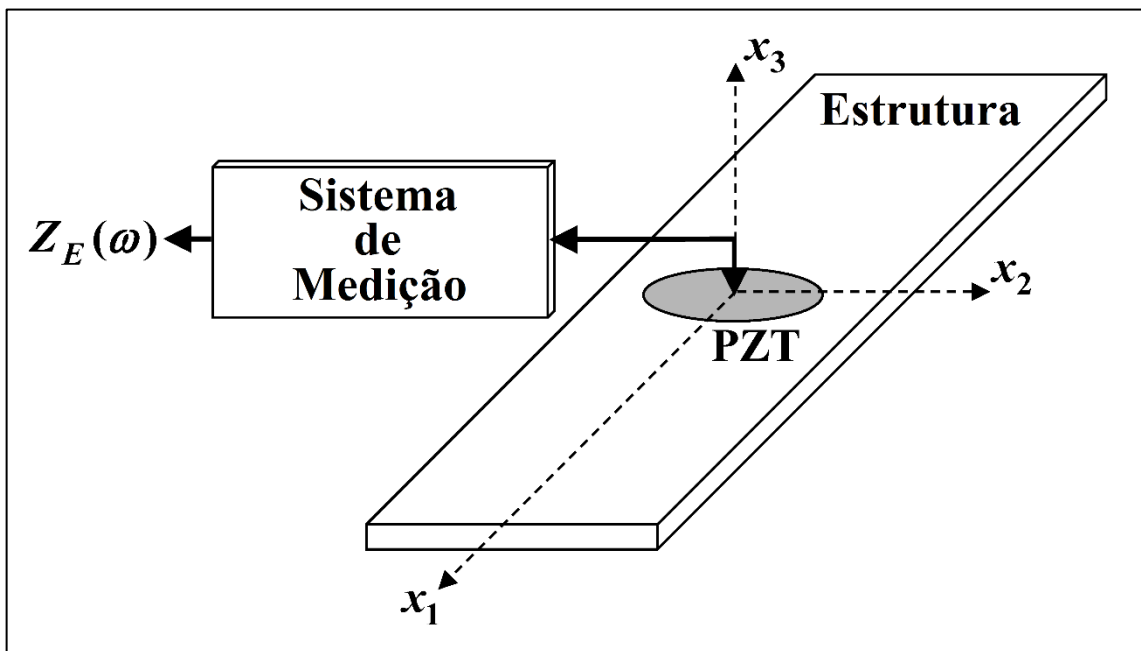
Capítulo 2

Método da Impedância Eletromecânica

2.1 Método Convencional de Impedância Eletromecânica

O princípio da detecção de dano baseada no método da impedância E/M consiste em acoplar um transdutor piezelétrico em uma estrutura a ser monitorada. A configuração básica utilizada no método convencional da impedância E/M é apresentada na Figura 1, onde uma cerâmica de PZT, comumente utilizada como um transdutor, é acoplada a uma estrutura.

Figura 1: Configuração básica utilizada no método convencional da impedância E/M



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 1, um sistema de medição excita simultaneamente o transdutor enquanto fornece a sua impedância elétrica ($Z_E(\omega)$). Portanto, no método da impedância E/M o transdutor opera simultaneamente como sensor (efeito piezelétrico direto) e como atuador (efeito piezelétrico reverso). Como já é de conhecimento, a deformação do material piezelétrico ocorre em todas as direções. Entretanto, como geralmente a espessura da cerâmica de PZT é muito fina (uma fração de milímetro), a deformação no sentido da sua espessura, representada na Figura 1 pelo eixo x_3 , pode ser desprezada para frequências suficientemente baixas. É

importante ressaltar que, para impedâncias medidas em altas frequências, na faixa de MHz, conhecido como impedância E/M de modo de espessura, deformações ao longo da espessura do material podem ser detectadas (KAMAS; TEKKALMAZ, 2016).

Além disso, baseando-se em uma suposição unidimensional e considerando uma estrutura estreita, apenas uma deformação na direção longitudinal, como representado pelo eixo x_1 na Figura 1, deve ser considerada, desconsiderando a deformação ao longo do eixo x_2 .

Baseando-se nessas suposições, o efeito piezelétrico direto (sensor) e o efeito piezelétrico reverso (atuador) no transdutor são dadas pelas Equações (1) e (2), respectivamente:

$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (1)$$

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad (2)$$

sendo que D_3 e E_3 são o deslocamento elétrico e o campo elétrico, respectivamente; T_1 e S_1 são a tensão mecânica e a deformação mecânica, respectivamente; e d_{31} , ε_{33}^T e s_{11}^E são as constantes piezelétricas, dielétricas e de elasticidade do material piezelétrico, respectivamente, sendo que os sobrescritos T e E indicam tensão mecânica e campo elétrico constantes, respectivamente, e os subscritos 1 e 3 representam os eixos dos sistemas de coordenadas naturais do material piezelétrico para a suposição unidimensional.

A partir das Equações (1) e (2), um modelo eletromecânico unidimensional (LIANG; SUN; ROGERS, 1994) pode ser obtido para relacionar as propriedades elétricas do transdutor com as propriedades mecânicas da estrutura. Dessa maneira, o cálculo da impedância elétrica de um transdutor utilizando uma versão simplificada desse modelo é dada por:

$$Z_E(\omega) = \frac{1}{j\omega C} \left(1 - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T} \frac{Z_S(\omega)}{Z_S(\omega) + Z_P(\omega)} \right)^{-1} \quad (3)$$

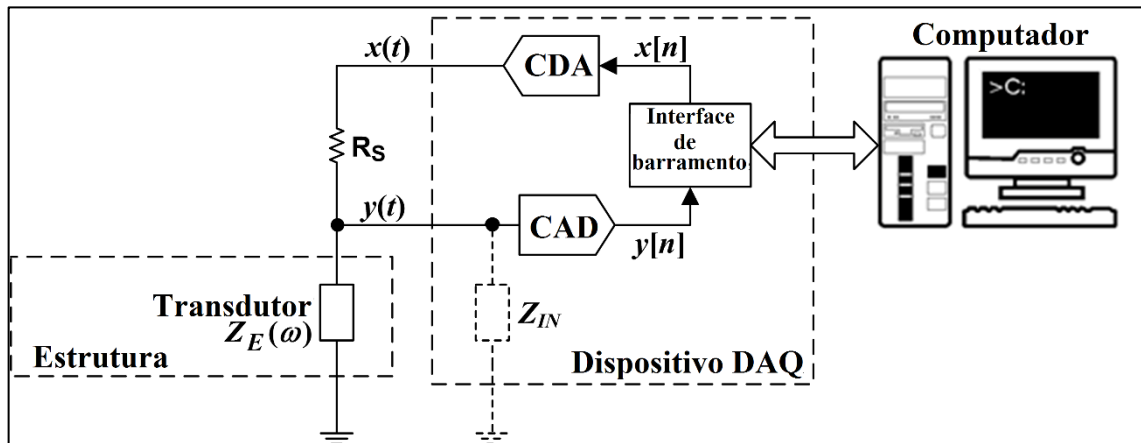
sendo que $Z_E(\omega)$ é a impedância elétrica do transdutor na frequência angular ω , que deve variar dentro de um intervalo adequado proporcionado pelo sistema de medição; $Z_P(\omega)$ é a impedância mecânica do transdutor; $Z_S(\omega)$ é a impedância mecânica da estrutura monitorada; C é a capacitância estática do transdutor; e j é o número imaginário unitário.

Os danos estruturais, tais como fissuras, e o afrouxamento de conexões, ocasionam variações na impedância mecânica da estrutura. De acordo com a Equação (3), qualquer variação na impedância mecânica da estrutura ($Z_S(\omega)$) provoca uma alteração correspondente

na impedância elétrica do transdutor ($Z_E(\omega)$), conhecida como impedância E/M. Portanto, a integridade estrutural pode ser monitorada com as medições e as análises da impedância elétrica do transdutor.

A medição da impedância elétrica do transdutor pode ser realizada utilizando um analisador de impedância comercial. No entanto, muitos pesquisadores propuseram sistemas de medição alternativos baseados no domínio do tempo (VIEIRA FILHO; BAPTISTA; INMAN, 2011) ou análise no domínio da frequência (CORTEZ; VIEIRA FILHO; BAPTISTA, 2013, KAUR *et al.*, 2016, MARUO *et al.*, 2015). Neste estudo, a impedância elétrica foi medida usando o sistema alternativo proposto por Baptista; Vieira Filho (2009), que é baseado em um dispositivo de aquisição de dados multifuncional (DAQ) controlado por um computador que executa um software e drivers apropriados para o modelo DAQ utilizado. A configuração básica deste sistema é representada na Figura 2.

Figura 2: Sistema de medição utilizado no método convencional da impedância E/M.



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme visto na Figura 2, o dispositivo de aquisição de dados (DAQ) deve ter pelo menos uma saída analógica para fornecer o sinal de excitação ($x(t)$) através do conversor digital-analógico (CDA) e uma entrada analógica para a aquisição do sinal de resposta ($y(t)$) do transdutor através do conversor analógico-digital (CAD). Os sinais $x[n]$ e $y[n]$ são as formas digitais dos sinais de excitação e resposta, respectivamente, que são processadas no computador. A conexão entre o dispositivo DAQ e o computador é através de um barramento padrão USB (*Universal Serial Bus* – barramento serial universal), PCI (*Peripheral Component Interconnect* – conector de componentes periféricos), e PCIe (*Peripheral Component*

Interconnect Express – conector expresso de componentes periféricos). O transdutor está ligado através de um resistor R_S .

A impedância da entrada analógica (Z_{IN}) pode ser ignorada se for suficientemente elevada em comparação com a impedância do transdutor. Além disso, a resistência da fiação também pode ser desconsiderada para conexões curtas. Com base nestas considerações, a impedância elétrica do transdutor pode ser calculada como

$$Z_E(\omega) = R_S \frac{H(\omega)}{1-H(\omega)} \quad (4)$$

sendo que $H(\omega)$ é a FRF obtida considerando o sinal de excitação $[x(n)]$ como entrada e o sinal de resposta $[y(n)]$ como saída, que é calculada como:

$$H(\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (5)$$

sendo que $S_{xy}(\omega)$ é o espectro de potência cruzada entre o sinal de excitação ($x[n]$) e o sinal de resposta ($y[n]$) e $S_{xx}(\omega)$ é o auto espectro de potência do sinal de excitação, representados por

$$S_{xy}(\omega) = \frac{X(\omega)Y^*(\omega)}{N} \quad (6)$$

$$S_{xx}(\omega) = \frac{X(\omega)X^*(\omega)}{N} \quad (7)$$

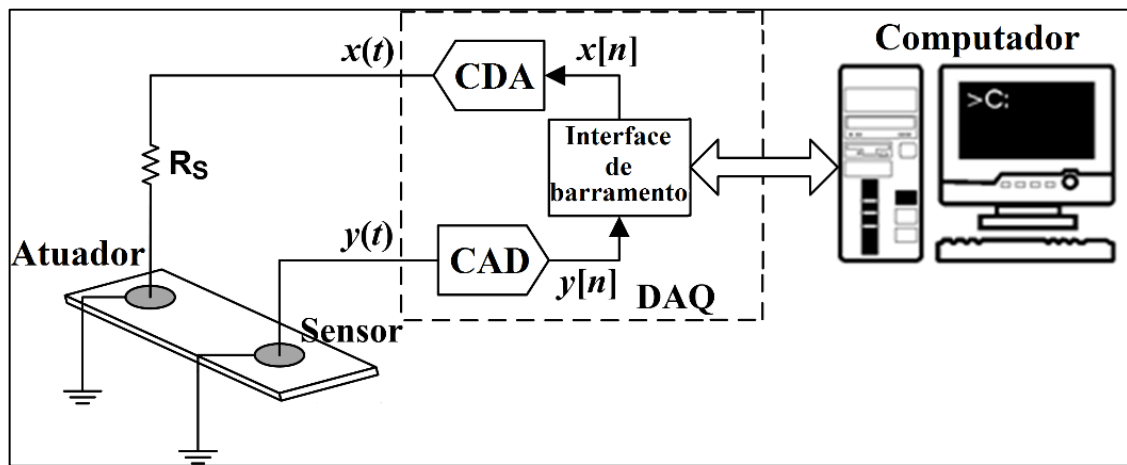
sendo que $X(\omega)$ e $Y(\omega)$ é a transformada discreta de Fourier – *discrete Fourier transform* (DFT) – do sinal de excitação ($x[n]$) e o sinal de resposta ($y[n]$), respectivamente, obtidas usando o algoritmo da transformada rápida de Fourier – *fast Fourier transform* (FFT); $X^*(\omega)$ e $Y^*(\omega)$ significam os conjugados complexos; e N é a duração dos sinais.

É importante ressaltar que, neste método de medição, a amplitude do sinal do transdutor ($y(t)$) não é constante. Ao invés disso, diminui com o aumento da frequência devido à reatância capacitiva do transdutor ($1 / j\omega C$), como indicada na Equação (3). Do ponto de vista elétrico, isso não afeta o valor medido da impedância porque a FRF ($H(\omega)$) não depende da amplitude do sinal, garantindo medições exatas (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009).

2.2 Método da Função de Resposta em Frequência (FRF)

O método da FRF de transferência ou simplesmente FRF é conhecido por utilizar ao menos dois transdutores onde cada um opera separadamente, um como sensor e o outro como atuador. Consequentemente, através desse sistema de medição, pode se obter em diferentes posições da estrutura os sinais de entrada e saída da FRF. Sobretudo, esse método é utilizado para detecção de danos que possam ser localizados entre os dois transdutores. A configuração básica de um sistema de medição FRF é representado pela Figura 3.

Figura 3: Sistema de medição utilizado no método FRF.



Fonte: Elaborado pelo autor

No sistema de medição da FRF, o sinal de excitação ($x(t)$) é aplicado ao transdutor atuador através do resistor limitador de corrente elétrica (R_s) e o sinal de resposta é obtido pelo transdutor que opera como sensor. A FRF $H(\omega)$ apresentada pela Equação (5) é obtida a partir dos sinais digitais $x[n]$ e $y[n]$ através do cálculo do espectro de potência cruzada ($S_{xy}(\omega)$) e do auto espectro de potência ($S_{xx}(\omega)$), representados nas Equações (6) e (7), respectivamente. A geração e a amostragem dos sinais de excitação e resposta ocorrem de forma sincronizada e simultânea.

Para minimizar quaisquer efeitos de ruído e para obter uma boa repetição entre as assinaturas, a FRF é obtida a partir de uma média de várias medições. Os danos estruturais situados entre os dois transdutores provocam variações nas assinaturas FRF, que podem ser analisadas como assinaturas de impedância convencionais ao monitorar a integridade de uma estrutura.

2.3. Avaliação da Sensibilidade para Detecção de Danos

A avaliação dos métodos de instalação do transdutor em termos de eficácia na detecção de danos estruturais foi realizada utilizando o teste PLB, comparando a impedância elétrica e assinaturas FRF, e usando os índices básicos de dano.

2.3.1 Teste da Quebra do Grafite (PLB)

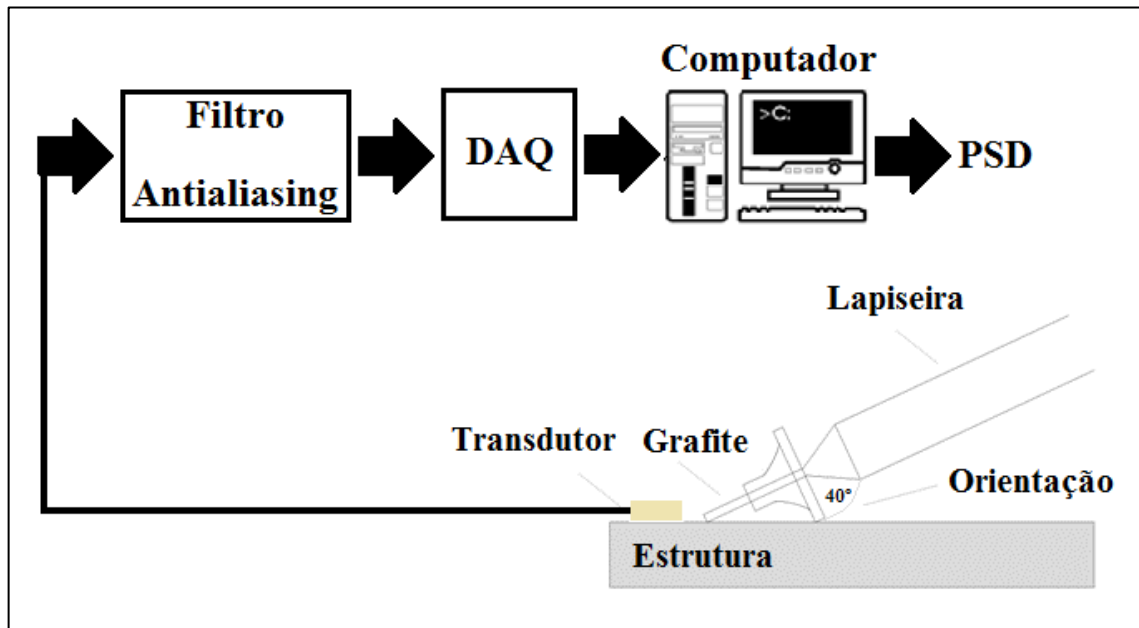
O teste da quebra do grafite ou PLB é um processo utilizado em aplicações de emissão acústica para a geração de sinal acústico. É um teste que envolve a caracterização dos transdutores elétricos visando melhorar a confiabilidade e a sensibilidade (ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR, 2015).

Os transdutores piezelétricos utilizados nas técnicas de impedância E/M podem apresentar problemas que interferem na sensibilidade do sensor, nos efeitos das condições de montagem na sensibilidade, na degradação da sensibilidade e no método de avaliação, e que podem influenciar nos resultados (HIGO; INABA, 1991). Por essa razão, o teste do PLB é uma técnica eficiente para avaliar transdutores.

O procedimento do teste PLB consiste em quebrar um grafite de lapiseira contra a estrutura em que o transdutor está instalado. Ao quebrar o grafite, uma tensão mecânica impulsiva é liberada e, conseqüentemente, é gerado um sinal de grande largura de banda que pode ser utilizado para avaliar a resposta do transdutor. Quando ocorre a quebra do grafite, se obtém a amostra do sinal de tensão do transdutor. Geralmente, a análise é realizada no domínio da frequência, com o cálculo da densidade espectral de potência – *power spectral density* (PSD). Adotado como padrão, o teste PLB utilizado para a obtenção de uma fonte acústica é um procedimento simples e de baixo custo (ASTM, 2010).

Neste trabalho, o teste PLB foi utilizado para estimar a sensibilidade ao dano estrutural dos métodos de instalação dos transdutores piezelétricos, pois como demonstrado em estudo anterior (ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR, 2015) há uma relação entre a PSD obtida pelo teste e a sensibilidade ao dano. A configuração básica do teste PLB é mostrada na Figura 4.

Figura 4: Sistema de medição utilizado no teste PLB.



Fonte: Elaborado pelo autor

Embora o teste PLB seja comumente utilizado em aplicações de emissão acústica, também é uma técnica útil para avaliar a sensibilidade de transdutores piezelétricos na detecção de danos baseadas na técnica da impedância E/M (ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR, 2015).

No presente estudo, o teste PLB foi utilizado para avaliar a resposta dos transdutores piezelétricos instalados na estrutura monitorada. Foram utilizados diferentes métodos de instalação dos transdutores piezelétricos. A quebra do grafite na estrutura monitorada ocorreu na mesma posição e sob as mesmas condições para todos os métodos de instalação, de modo que as diferenças observadas entre os sinais obtidos dos transdutores piezelétricos foram particularmente ocasionadas devido ao método de instalação. A análise foi realizada calculando e comparando as densidades espectral de potência para os três métodos de instalação.

2.3.2 Índices de Danos

Um dos modos de detectar e quantificar danos estruturais no método da impedância E/M é comparando duas curvas (ou assinaturas) de impedância elétrica, sendo que uma delas é obtida quando a estrutura está em um estado considerado íntegro, conhecido como *baseline*. Essa comparação é feita por meio de índices de dano. Um dos índices mais utilizados na literatura é o desvio da raiz média quadrática (RMSD), que é baseado na distância Euclidiana entre as duas assinaturas. O índice RMSD é calculado como (FARRAR; WORDEN, 2013)

$$RMSD = \sum_{\omega=\omega_I}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[Re(Z_2(\omega)) - Re(Z_1(\omega))]^2}{Re(Z_1(\omega))^2}} \quad (8)$$

sendo que $Re(Z_1(\omega))$ é a parte real da assinatura de impedância elétrica do transdutor obtida para a estrutura considerada íntegra ou *baseline*, $Re(Z_2(\omega))$ é a parte real da assinatura de impedância elétrica do transdutor após possíveis danos, e RMSD é o índice calculado na faixa de frequência com frequência inicial ω_I e frequência final ω_F .

O índice RMSD também pode ser calculado usando a magnitude ou a parte imaginária da impedância. Entretanto, utiliza-se normalmente a parte real porque esta é mais sensível aos danos e menos sensível à temperatura (PARK *et al.*, 2003; BAPTISTA *et al.*, 2014). Todavia, para o método FRF o índice foi calculado utilizando a magnitude da função de resposta em frequência $|H(\omega)|$, porque é mais significativo para este método.

Outro índice muito utilizado é a métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM), que é baseado no coeficiente de correlação entre duas assinaturas de impedância e calculado como

$$CCDM = 1 - C_C \quad (9)$$

sendo que C_C é o coeficiente de correlação, dado por

$$C_C = \frac{cov[Re(Z_1(\omega)), Re(Z_2(\omega))]}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (10)$$

sendo que “cov” é a covariância das partes reais das duas assinaturas de impedância tal como definidas anteriormente, e calculadas na mesma faixa de frequência que o índice RMSD na Equação (8), e σ_1 e σ_2 são os desvios padrão correspondentes de cada assinatura.

Para este trabalho, os índices RMSD e CCDM foram calculados para todos os métodos de instalação sob as mesmas condições experimentais e comparados para avaliar a influência do método de instalação do transdutor na detecção de danos estruturais.

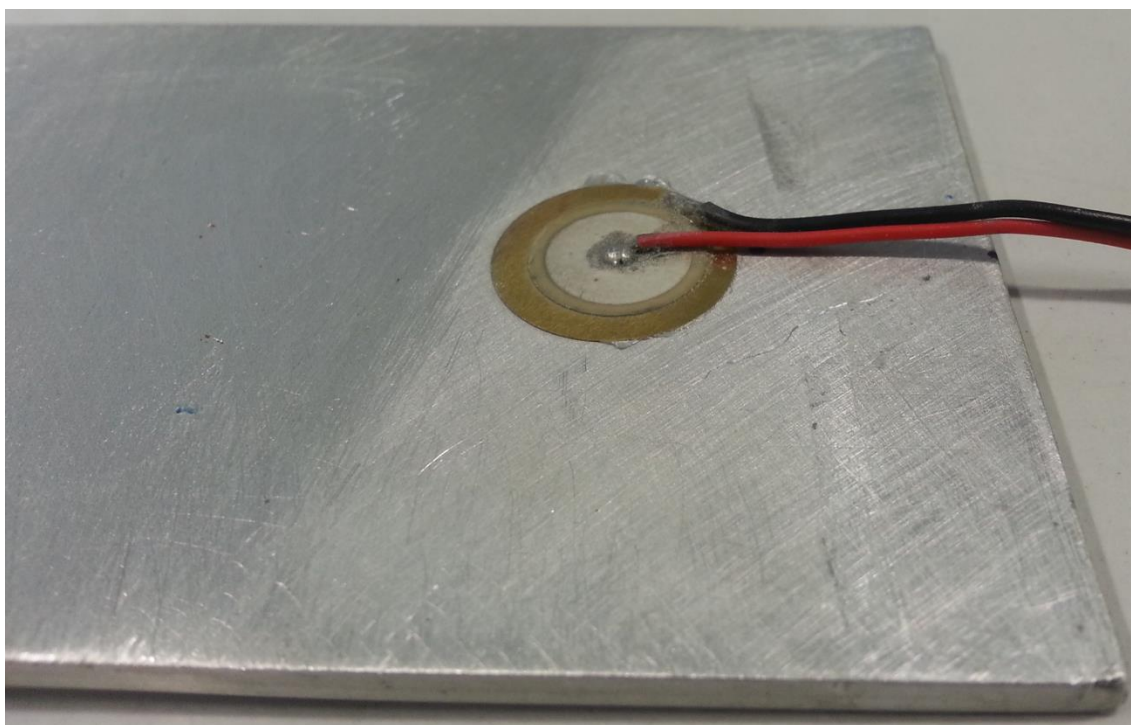
Capítulo 3

Materiais e Métodos

Para a avaliação dos efeitos da instalação do transdutor na estrutura, afim de detectar danos estruturais, ensaios foram realizados em uma barra de alumínio de 1100 mm x 76 mm x 3 mm, que são estruturas comumente utilizadas em laboratórios de pesquisa. Os transdutores utilizados foram os diafragmas piezelétricos, usualmente conhecidos como “buzzers”, compostos de uma base circular de latão de espessura de 0,20 mm e 20 mm de diâmetro, sobre a qual há uma cerâmica piezelétrica (elemento ativo) de 0,22 mm de espessura e 14 mm de diâmetro. A aplicação principal destes dispositivos é a sinalização sonora, como alarmes e bipes e, recentemente, têm sido utilizados em trabalhos científicos como sensores e na detecção de dano baseada na impedância eletromecânica com resultados próximos ao da cerâmica convencional. Muitos estudos científicos recentes têm relatado a viabilidade de utilizar diafragmas piezelétricos para a detecção de danos estruturais com base na impedância E/M e outros métodos (FREITAS; BAPTISTA, 2016; TINOCO; MARULANDA, 2015).

No método de instalação convencional o transdutor piezelétrico foi acoplado diretamente a estrutura utilizando uma cola a base de cianoacrilato, e a uma distância de 30 mm entre o centro do transdutor e a extremidade da barra. O método de instalação convencional é mostrado na Figura 5.

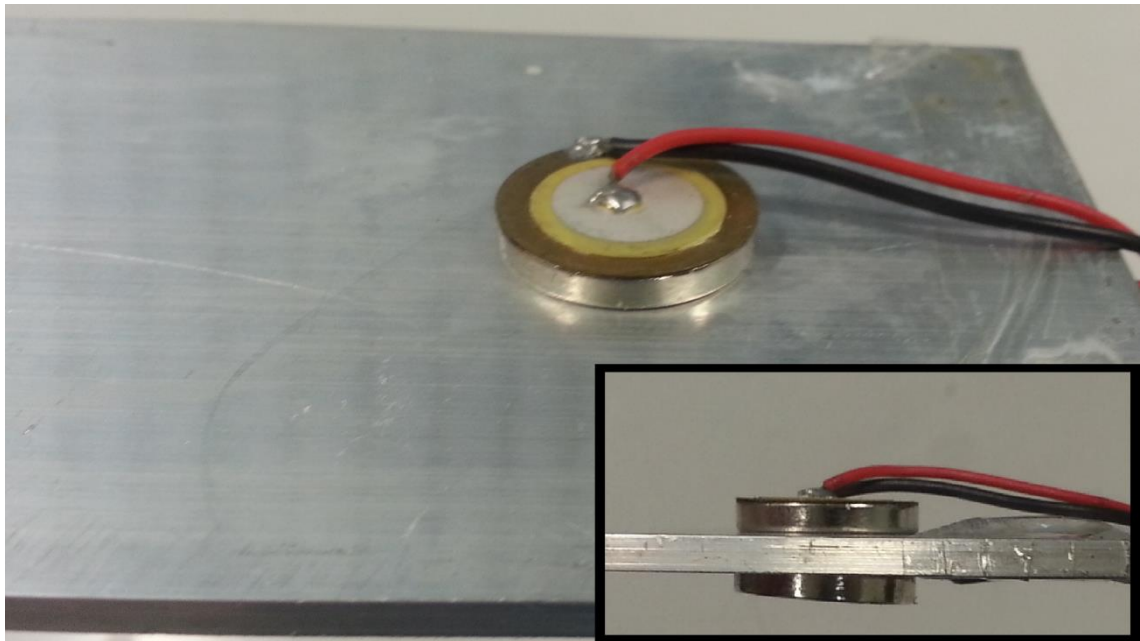
Figura 5: Método de instalação convencional do transdutor piezelétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o método de instalação utilizando ímãs magnéticos, o transdutor piezelétrico foi unido utilizando cola a base de cianoacrilato a um ímã circular de neodímio de 20 mm de diâmetro e de 3 mm de espessura. Para realizar a junção a estrutura foi utilizado outro ímã de neodímio de mesma característica ao citado na outra face da estrutura, em posição equivalente à do método de instalação convencional. Este procedimento é representado pela Figura 6.

Figura 6: Método de instalação utilizando ímãs magnéticos.



Fonte: Elaborado pelo autor

O método MWBEMI, no qual o acoplamento entre o transdutor e a estrutura a ser monitorada ocorre utilizando um fio ou lâmina de metal, utilizou em seus testes duas lâminas de alumínio de 300 mm de comprimento a uma largura de 30 mm de diferentes espessuras, 0,5 mm e 1,0 mm, respectivamente. O transdutor piezelétrico foi acoplado em uma das extremidades de cada uma das lâminas de alumínio à uma distância de 30 mm, e a outra extremidade foi fixada a estrutura em uma posição equivalente ao dos métodos de instalação anteriores. A fixação do transdutor nas lâminas de alumínio, e assim como a fixação das lâminas na estrutura, foram realizadas com cola a base de cianoacrilato. A instalação utilizando o método MWBEMI é mostrada na Figura 7.

Figura 7: Método de instalação MWBEMI.



Fonte: Elaborado pelo autor

A medição da impedância elétrica foi realizada com um sistema de medição fundamentado em um dispositivo DAQ (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009) de acordo com o diagrama ilustrado na Figura 2. O modelo do dispositivo de aquisição de dados (DAQ) utilizado foi o multifuncional NI-USB-6361 da fabricante *National Instruments*, com interface USB. Os transdutores piezelétricos foram excitados através de um resistor de $2,2\text{ k}\Omega$ (representado por R_s na Figura 2) e um sinal *chirp* com amplitude de 1 V e a uma faixa de frequência de 0 – 500 kHz.

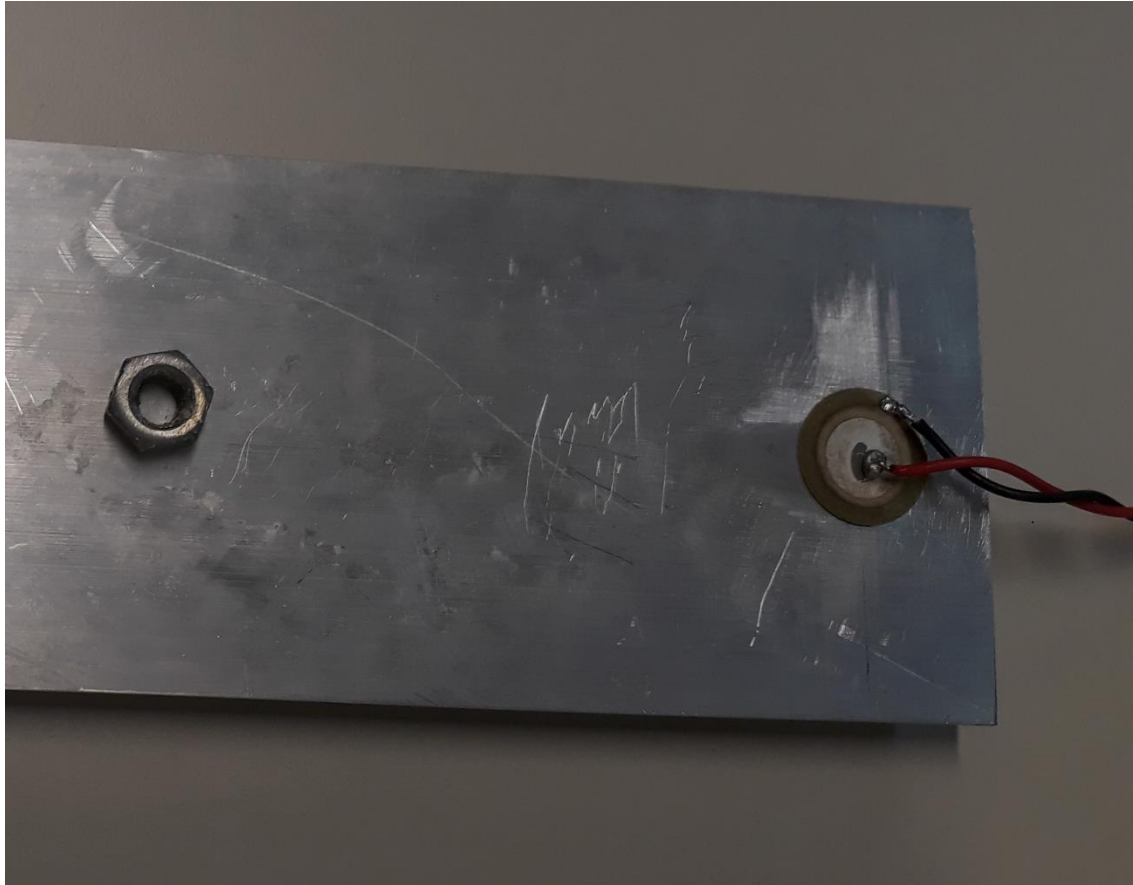
Embora a amplitude do sinal do transdutor piezelétrico tenha variações com a frequência, pode-se desprezar sua influência para a sensibilidade ao dano, visto que a estrutura monitorada é de pequeno porte. E, para garantir uma comparação adequada, a mesma intensidade de sinal foi utilizada em todos os métodos de instalação.

Os sinais de resposta dos transdutores piezelétricos foram amostrados a uma taxa de amostragem de 2 MS/s. As assinaturas de impedância elétrica foram obtidas para uma faixa de frequência que varia de 0 a 500 kHz, e utilizando como referência a média de 5 medições para garantir uma boa exatidão e precisão.

Para caracterizar o dano estrutural foi fixada com cola a base de cianoacrilato uma massa metálica (porca de aço de parafuso) de dimensões 14mm x 8mm na estrutura, como se pode observar na Figura 8, nas distâncias de 100 mm e 1000 mm dos transdutores fixados na estrutura monitorada para cada método de instalação. Esse procedimento altera a impedância mecânica

da estrutura de forma semelhante aos ocasionados por danos estruturais, mas proporciona a vantagem de não danificar permanentemente a estrutura.

Figura 8: Porca de parafuso simulando o dano na estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o método da FRF, o sistema de medição foi modificado conforme ilustrado no diagrama da Figura 3. Foi instalado um segundo transdutor piezelétrico na outra extremidade da barra de alumínio correspondente ao método de instalação. As configurações do dispositivo DAQ não foram alteradas. Nesse método, um dos transdutores funcionou como um atuador, enquanto o outro operava como sensor. As assinaturas FRF ($H(\omega)$) foram adquiridas na faixa de frequência de 0 – 500 kHz utilizando-se a média de 5 medições. O dano estrutural foi induzido com a fixação da mesma massa metálica na posição central da estrutura e entre os dois transdutores piezelétricos. Na Figura 9 mostra-se a configuração experimental do método FRF utilizando o método de instalação MWBEMI, no qual as lâminas de alumínio estão fixadas na estrutura monitorada entre o transdutor sensor e o transdutor atuador.

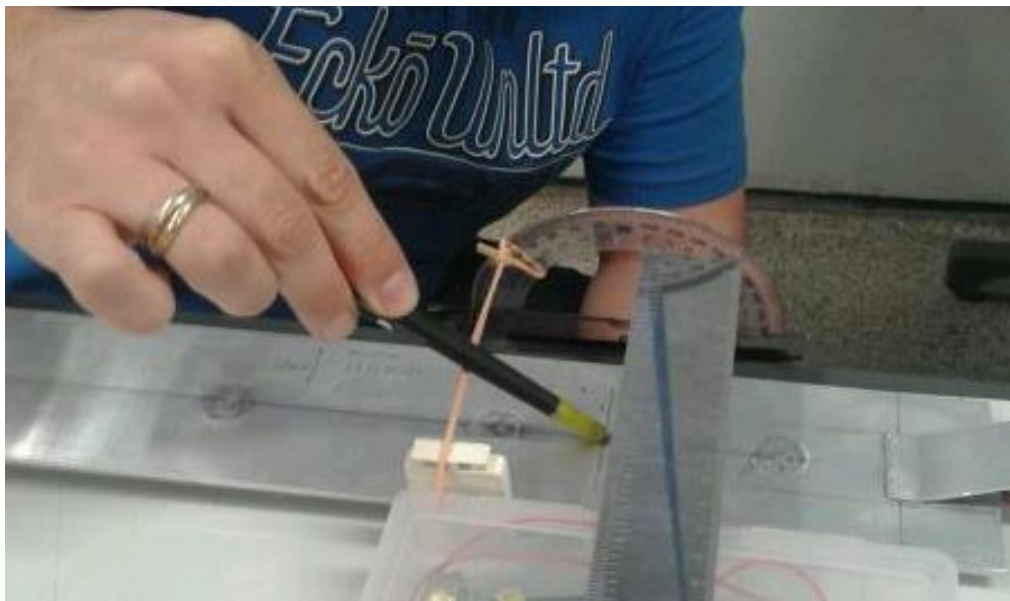
Figura 9: Método FRF utilizando o método de instalação MWBEMI.



Fonte: Elaborado pelo autor

No teste da quebra do grafite (PLB) foi utilizada uma lapiseira comum, contendo grafite de dureza média (HB), com um comprimento de 3 mm e um diâmetro de 0,5 mm. A quebra do grafite foi realizada manualmente, com um ângulo de aproximadamente 40° a uma distância de 100 mm do transdutor ou método de instalação correspondente. Quando o grafite foi quebrado, o sinal de tensão dos transdutores para os diferentes métodos de instalação foi amostrado a uma taxa de amostragem de 2 MS/s. Devido ao sinal ser impulsivo, foi utilizado um filtro de *antialiasing* RC passivo com uma frequência de corte em torno de 677 kHz. A análise foi realizada no domínio da frequência, e a PSD foi calculado utilizando o método Welch com uma janela de Hanning de 256 amostras e sobreposição de 50%, e tomando por base 10 medições (ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR, 2015). O arranjo utilizado para a execução correta do teste PLB é apresentado na Figura 10.

Figura 10: Procedimento para execução do teste PLB.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em todos os ensaios, as medições foram realizadas em temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C e estabilizadas utilizando um aparelho de ar condicionado, e a estrutura dos experimentos foram apoiadas em uma mesa usando blocos de borracha.

Capítulo 4

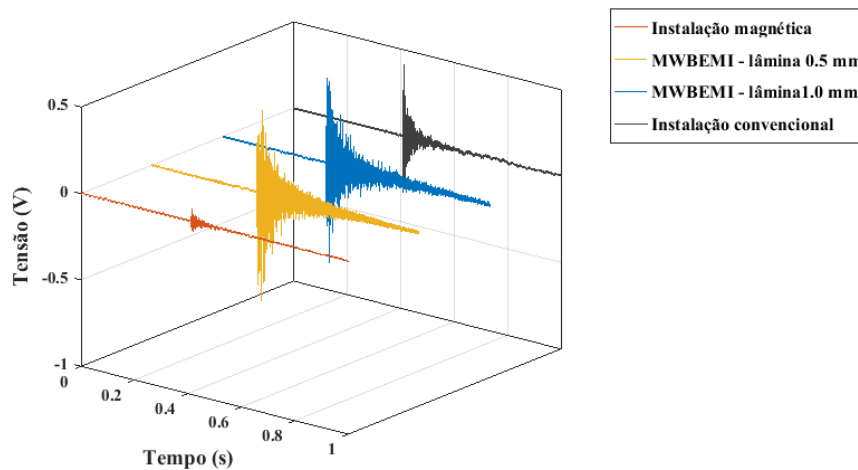
Resultados e Discussão

4.1 Análise pelo teste PLB

O teste PLB é um método bem conhecido para avaliar a resposta em frequência de transdutores em aplicações de emissão acústica. Neste estudo, essa técnica foi utilizada para avaliar a sensibilidade dos transdutores piezelétricos em três diferentes métodos de instalação e também avaliar os efeitos dos métodos de instalação sobre a detecção de danos estruturais. Como o teste foi realizado nas mesmas condições em todos os casos, as diferentes características observadas podem ser atribuídas, principalmente, ao método de instalação.

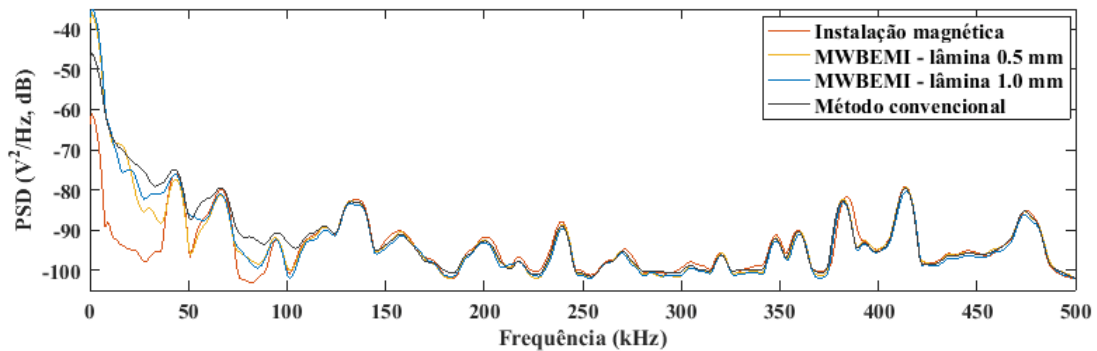
Os sinais de tensão obtidos no domínio do tempo para os diferentes métodos de instalação são mostrados na Figura 11, e as correspondentes PSDs no domínio da frequência são ilustradas na Figura 12.

Figura 11: Sinais de tensão obtidos no domínio do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12: PSDs obtidas no domínio da frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor

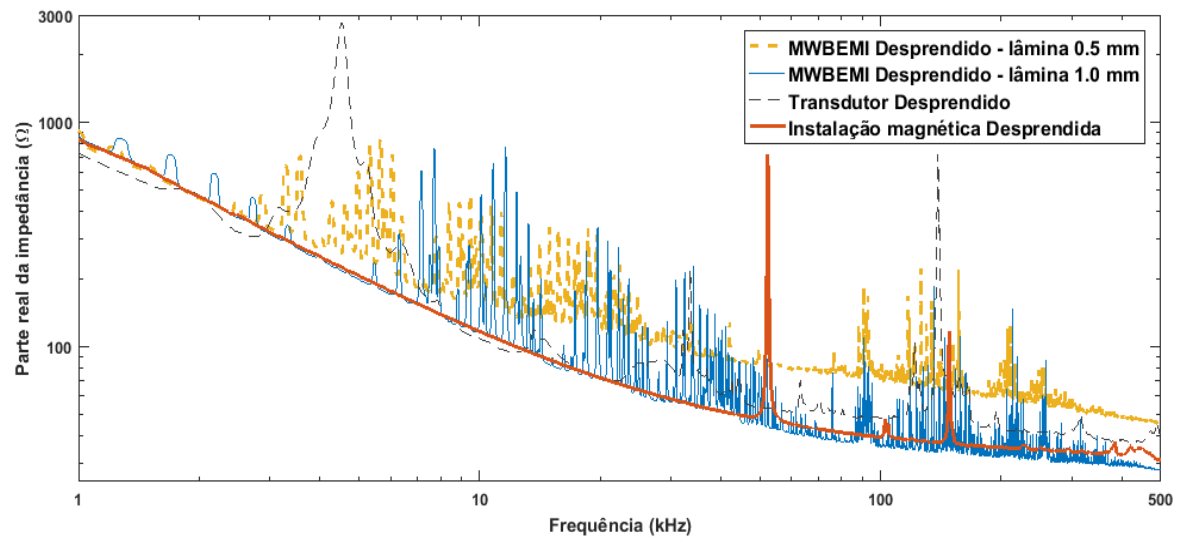
No domínio do tempo, quando são utilizados os métodos de instalação convencional e MWBEMI, estes são semelhantes em termos de nível de tensão. Por outro lado, o sinal obtido a partir do transdutor instalado com o método magnético apresentou uma tensão significativamente menor. O mesmo comportamento é observado no cálculo das PSDs no domínio da frequência. Em todos os métodos de instalação, as PSDs se caracterizaram por serem mais elevadas para as baixas frequências e menores com o aumento da frequência. De modo geral, para as frequências de até aproximadamente 100 kHz, a instalação magnética forneceu dados de PSD menor, e a instalação convencional mostrou um PSD um pouco maior em comparação com os dois tipos de instalação MWBEMI, com exceção em frequências menores que 10kHz. Para frequências acima de 100kHz, as PSDs de todos os métodos de instalação são menores e equivalentes.

Portanto, geralmente, é esperada maior sensibilidade à resposta em danos estruturais utilizando a instalação convencional e uma menor sensibilidade utilizando a instalação magnética. A análise dos resultados da instalação do transdutor na detecção de danos estruturais baseada na técnica da impedância E/M é apresentada e discutida na próxima seção.

4.2 Método Convencional Direto da Impedância E/M

Para analisar os efeitos dos métodos de instalação nas assinaturas de impedância e, conseqüentemente, na detecção de danos estruturais, as assinaturas de impedância elétrica foram inicialmente medidas com o transdutor piezelétrico e todos os métodos de instalação desprendidos da estrutura monitorada. Na Figura 13 são mostradas as partes reais das assinaturas de impedância elétrica na condição desprendida.

Figura 13: Parte real das assinaturas de impedância obtidas sob a condição desprendida da estrutura.

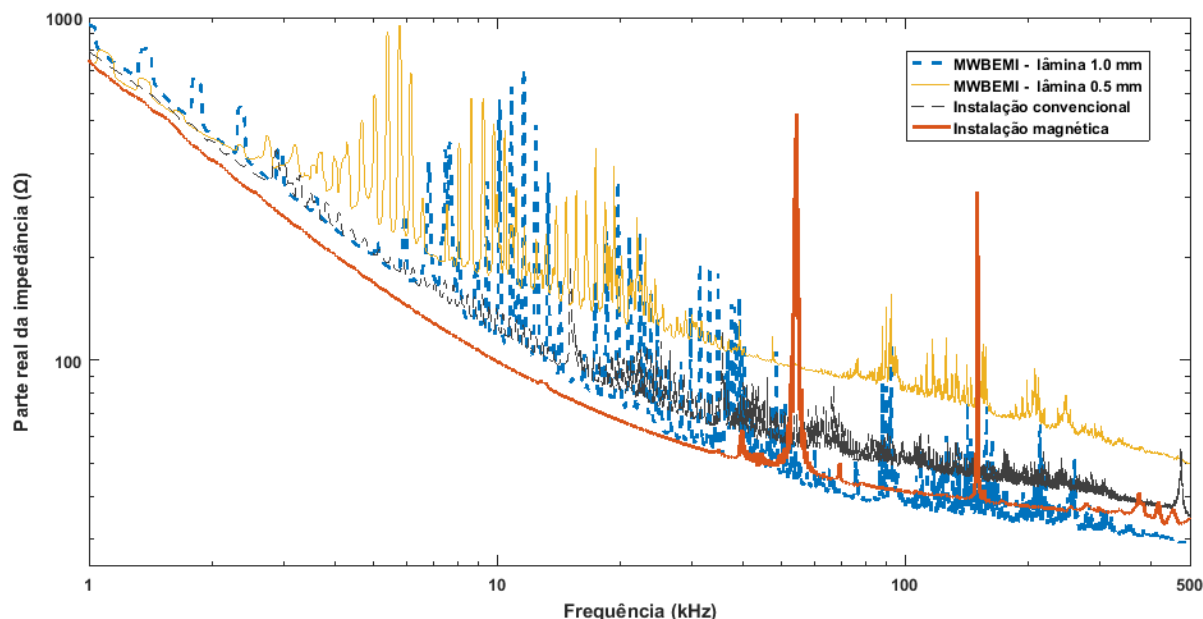


Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 13, as assinaturas de impedância apresentam picos de ressonância relacionados ao transdutor principal e a estrutura em cada método de instalação. A assinatura de impedância do transdutor apresenta poucos picos proeminentes de ressonância relacionados a sua base circular de latão. Semelhantemente, a assinatura de impedância da instalação magnética apresenta apenas dois picos significativos, nas frequências de aproximadamente 54 kHz e 150 kHz, e relacionados com o ímã utilizado. Em discordância, as assinaturas de impedância obtidas para o método MWBEMI têm um número maior de picos de ressonância, relacionados com as finas lâminas de alumínio.

Prosseguindo a análise, as assinaturas de impedância foram medidas com o transdutor e os métodos de instalação fixados na estrutura monitorada. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 14.

Figura 14: Parte real da assinatura de impedância obtida para cada método de instalação fixado na estrutura monitorada.



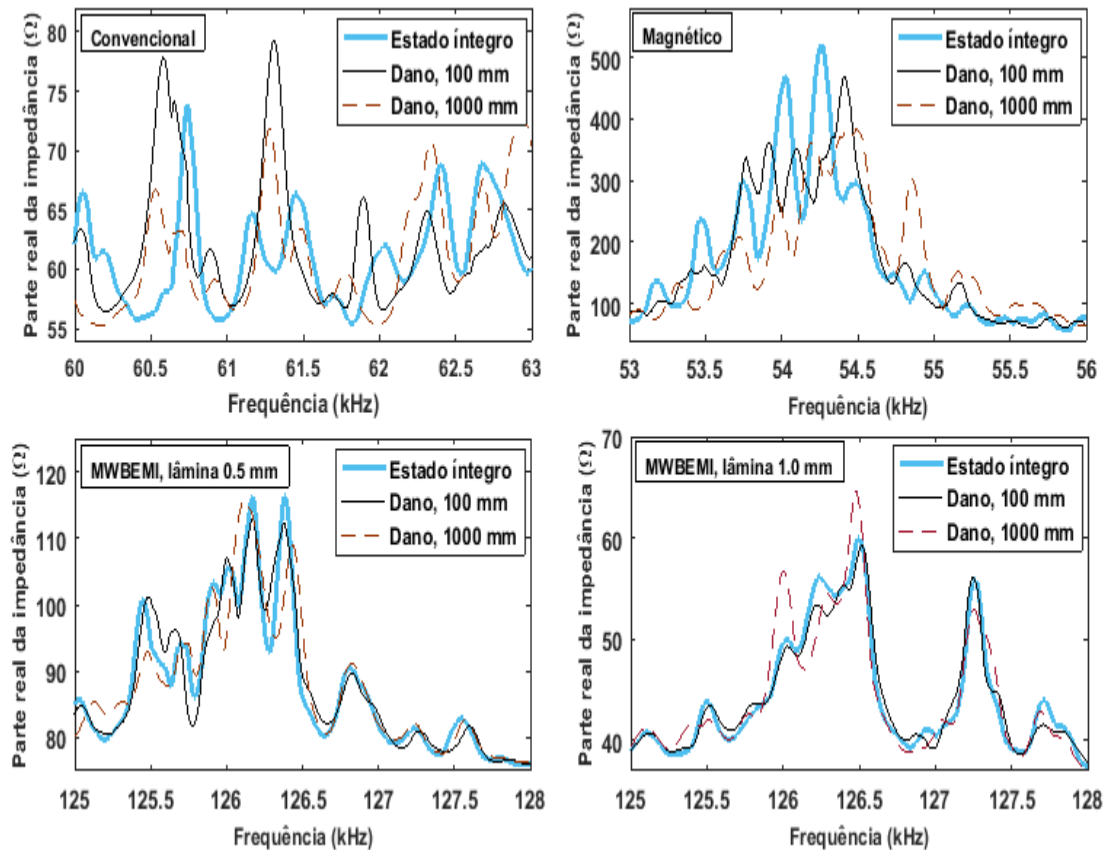
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com as Figuras 13 e 14, e realizando uma comparação com as assinaturas de impedância apresentadas, nota-se que a assinatura obtida para o transdutor é significativamente diferente quando está diretamente fixado à estrutura (instalação convencional), onde existe um aumento na quantidade de picos de ressonância, principalmente em frequências acima de 10 kHz. Esse resultado aponta um acoplamento eficaz entre o transdutor e a estrutura monitorada, visto que a assinatura de impedância começa a mostrar picos de ressonância relacionados principalmente com a estrutura. Em oposição, não são observadas variações significativas nas assinaturas de impedância para os outros métodos de instalação nas mesmas condições, assinalando um acoplamento menos eficaz entre o transdutor e a estrutura monitorada em comparação com o método da instalação convencional.

Portanto, de acordo com os resultados experimentais, o método de instalação do transdutor altera significativamente as assinaturas de impedância. Com o ímã de neodímio ou as lâminas de alumínio fixados na estrutura, os picos de ressonância se tornam predominante relacionados com essas estruturas de instalação e não com a estrutura monitorada. Além das alterações nas assinaturas de impedância ocasionadas pelo método de instalação, é importante investigar o impacto de cada método em relação à sensibilidade de detecção de danos estruturais. Uma análise qualitativa da sensibilidade característica de cada método de instalação afim de detectar danos estruturais pode ser realizada comparando as alterações nas assinaturas de impedância

devido à ocorrência do dano. Na Figura 15 apresenta-se uma comparação entre as assinaturas de impedância obtidas para a estrutura em um estado íntegro e após a ocorrência de danos causados pela adição de massa nas distâncias de 100 mm e 1000 mm de cada método de instalação.

Figura 15: Assinaturas de impedância obtidas para a estrutura em condições íntegra e danificada.



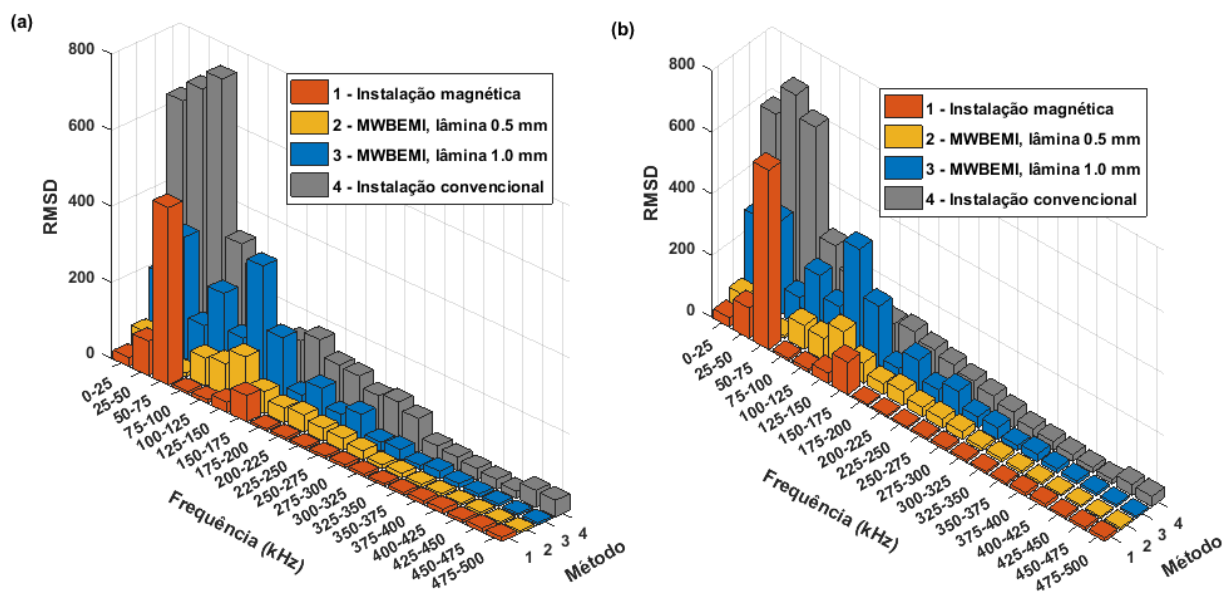
Fonte: Elaborado pelo autor

Para assegurar uma comparação adequada, na Figura 15 são mostradas apenas as faixas de frequência mais sensíveis ao dano para cada método de instalação. De acordo com os resultados, os três métodos de instalação são capazes de detectar danos estruturais e essa conclusão se deve às variações observadas nas assinaturas de impedância em razão da ocorrência de danos. Porém, o método da instalação convencional fornece variações mais significativas tanto em amplitude como na forma das assinaturas. Além disso, os métodos de instalação alternativos fazem com que a detecção de dano seja mais seletiva em determinadas faixas de frequência. Um exemplo é o que ocorre com o método de instalação magnético, no qual verifica-se maior sensibilidade ao dano em faixas estreitas de frequência em torno dos picos de ressonância para as frequências

de aproximadamente 54 kHz e 150 kHz, de acordo com as assinaturas apresentadas nas Figuras 13 e 14.

Os resultados da instalação do transdutor relativos as detecções de dano podem ser avaliados de forma mais efetiva e quantitativa quando calculados os índices básicos de dano RMSD e CCDM representados pelas Equações (8) e (9), respectivamente. Como é de conhecimento, a seleção da faixa de frequência de maior sensibilidade para caracterizar a detecção ao dano é um processo trabalhoso (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010b) que depende da estrutura, do transdutor e do método de instalação. Para analisar os efeitos da instalação do transdutor através de toda a faixa de frequência, os índices de dano foram calculados em subfaixas de 25 kHz em toda a faixa de 0 – 500 kHz, na qual foram medidas as assinaturas de impedância. Os índices RMSD obtidos para o dano induzido nas distâncias de (a) 100 mm e (b) 1000 mm do transdutor ou método de instalação equivalente são apresentados na Figura 16.

Figura 16: Índices RMSD obtidos para danos a distâncias de (a) 100 mm e (b) 1000 mm do transdutor ou método de instalação.



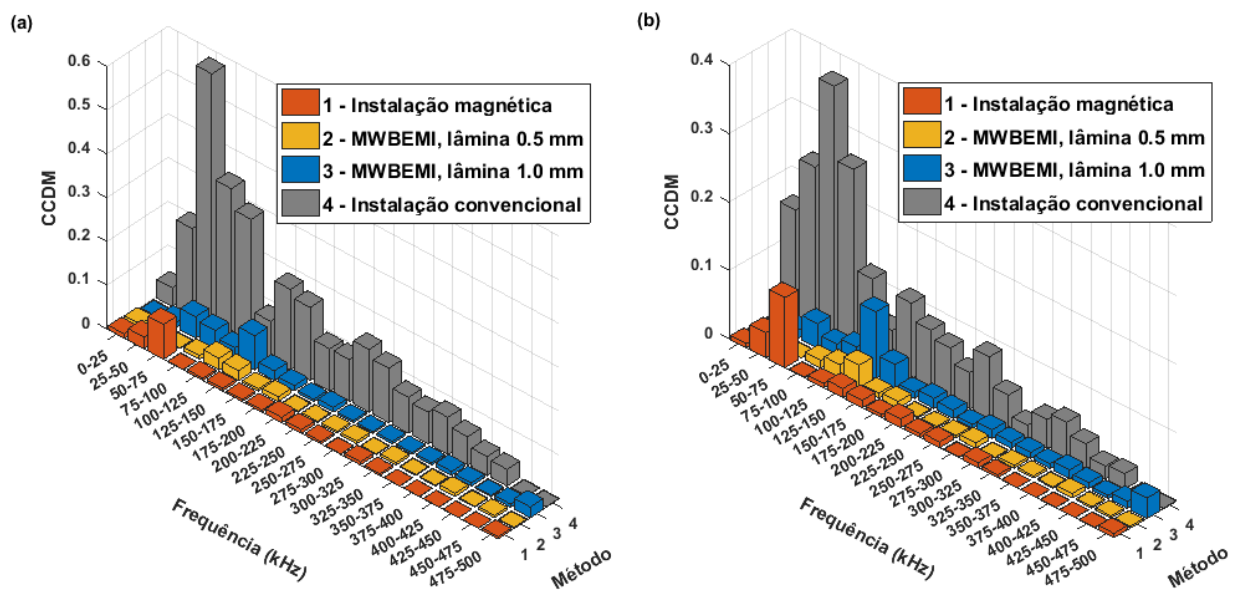
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com Figura 16, nos métodos de instalação convencional e MWBEMI, existe uma elevada predominância de índices RMSD em baixas frequências. Esse resultado está em concordância com as PSDs exibidas na Figura 12, onde os maiores valores são concentrados principalmente em frequências baixas, e também com as assinaturas de impedância mostradas nas Figuras 13 e 14, onde existe uma grande quantidade de picos de ressonância em baixas frequências. De modo geral, em comparação com os outros métodos de instalação, a instalação

magnética revelou baixos índices RMSD, exceto nas subfaixas de 50 kHz – 75 kHz e 150 kHz – 175 kHz, onde são observados altos índices RMSD. Esse resultado é também comprovado com as assinaturas de impedância e de PSD observadas nas Figuras 12, 13 e 14. Considerando as condições experimentais deste estudo, a distância entre o dano e o transdutor ou o método de instalação não causou alterações significativas nos índices RMSD.

Os resultados obtidos com o índice CCDM são mostrados na Figura 17.

Figura 17: Índices CCDM obtidos para danos a distâncias de (a) 100 mm e (b) 1000 mm do transdutor ou método de instalação.



Fonte: Elaborado pelo autor

As respostas obtidas com base no índice CCDM são semelhantes aos resultados obtidos com o índice RMSD, embora as diferenças entre os índices resultantes da instalação convencional e dos demais métodos de instalação foram mais significativas. A distância entre o dano estrutural e o transdutor ou método de instalação equivalente não causou alterações significativas na detecção de dano. Entretanto, foram observadas alterações na amplitude dos índices.

Por esse motivo, os resultados indicam que o método de instalação convencional, baseado na técnica da impedância E/M, tem mais sensibilidade em detectar dano estrutural. O método de instalação MWBEMI possui uma sensibilidade média, que depende significativamente da espessura da lâmina de alumínio, de acordo com a observação realizada nas diferenças obtidas entre os índices RMSD e CCDM a partir da utilização das lâminas de alumínio de espessuras

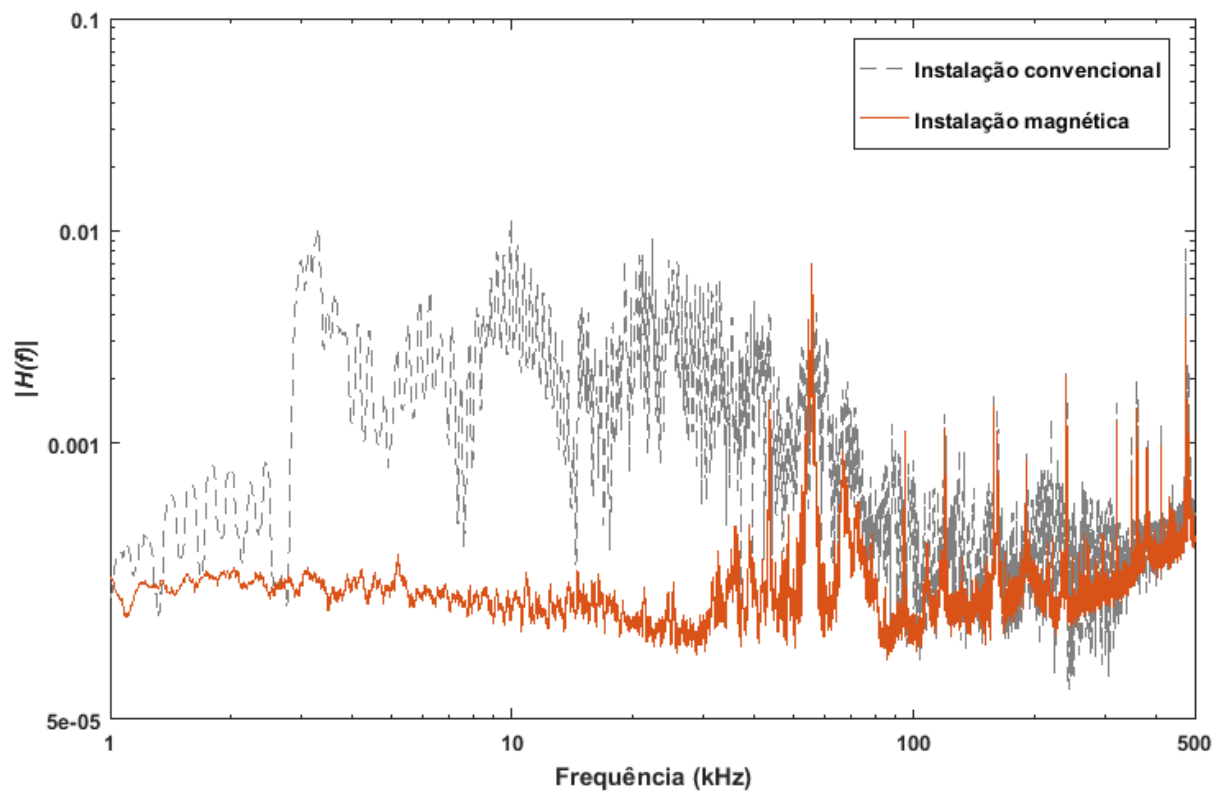
0,5 mm e 1,0 mm. Por fim, o método da instalação magnética tem menor sensibilidade, apesar de apresentar boa sensibilidade em determinadas faixas de frequência.

4.3 Método da FRF

A análise dos efeitos da montagem do transdutor na detecção de danos com base no método da FRF foi conduzida de forma semelhante à análise realizada para o método da impedância E/M convencional. Portanto, a sensibilidade de cada método de instalação do transdutor para a detecção de danos foi avaliada com base nos índices de danos calculados usando as assinaturas de FRF.

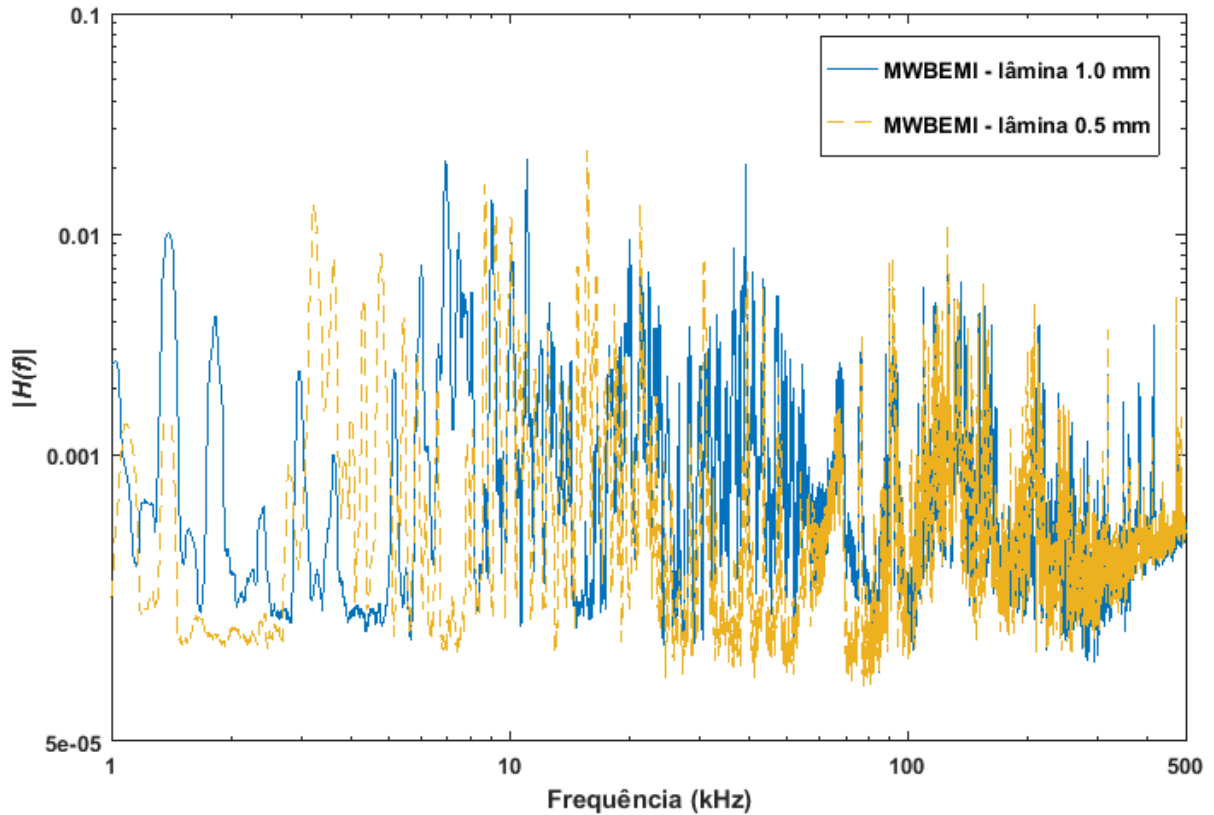
A relevância das magnitudes das assinaturas de FRF obtidas para os diferentes métodos de instalação do transdutor são mostradas na Figura 18 para os métodos de instalação convencional e instalação magnética e, na Figura 19, para o método de instalação MWBEMI.

Figura 18: Relevância das assinaturas de FRF obtidas para os métodos convencional e magnético.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19: Relevância das assinaturas de FRF obtidas para o método de instalação MWBEMI.

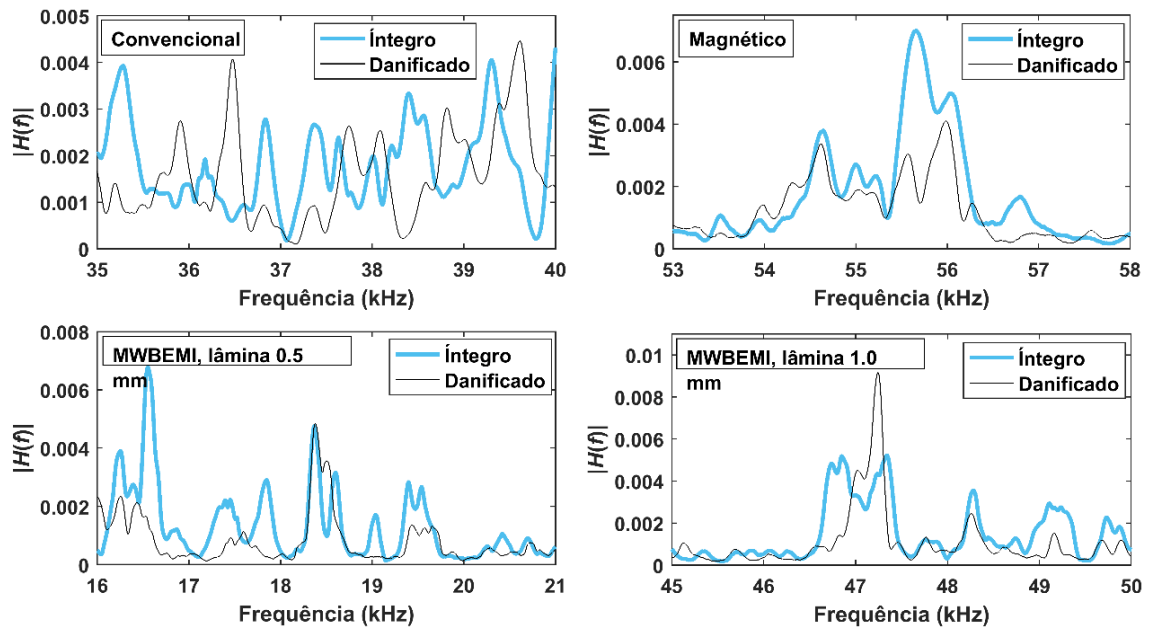


Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 18 e com a Figura 19, em geral, quando se utiliza a instalação magnética a assinatura obtida apresenta valores menores em comparação com os outros métodos de instalação, com exceção em torno da frequência de 54 kHz, onde a FRF é mais significativa, como também é observado na assinatura de impedância.

Uma comparação entre as assinaturas de FRF obtidas para a estrutura em seu estado íntegro e para danos localizados no centro da estrutura, conforme detalhado anteriormente, é mostrada na Figura 20. Para evidenciar as diferenças, apenas faixas estreitas de frequência mais sensíveis ao dano para cada método de instalação são mostradas.

Figura 20: Assinaturas de FRF obtidas para a estrutura sob a condição íntegra e sob a condição danificada.

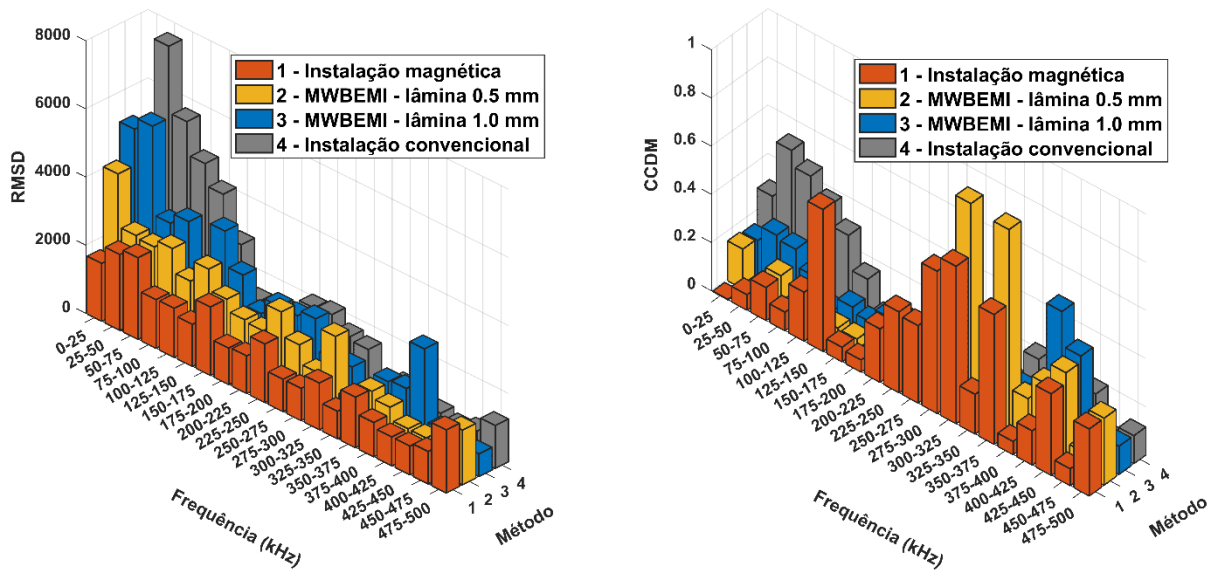


Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 20, o dano estrutural causou variações nas assinaturas de FRF de todos os métodos de instalação, indicando assim, a viabilidade para a detecção de danos. Qualitativamente, a instalação convencional proporciona variações ligeiramente mais significativas na forma e na amplitude entre as assinaturas íntegra e danificada. Semelhante aos resultados obtidos com o método da impedância E/M convencional, a instalação magnética possibilita uma variação menos significativa entre as duas assinaturas de FRF.

Para realizar uma análise quantitativa da sensibilidade a danos estruturais de cada método de instalação, os índices RMSD e CCDDM foram calculados em subfaixas de frequência de 25 kHz. Os resultados são mostrados na Figura 21.

Figura 21: Índices RMSD e CCDM obtidos para o método da FRF.



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme a análise dos resultados, o método de instalação do transdutor baseado na FRF causa influência na detecção de danos estruturais. Em geral, os índices RMSD são maiores quando se utiliza o método de instalação convencional, o que aponta para uma maior sensibilidade a danos para este tipo de instalação. Em contraste, a instalação magnética apresentou índices mais baixos, indicando uma baixa sensibilidade a danos. Os índices obtidos com a instalação MWBEMI apresentaram níveis intermediários, indicando que este tipo de instalação possui uma sensibilidade intermediária em relação a outros tipos de instalação. Portanto, as consequências da instalação do transdutor na detecção de danos com base no método da FRF são semelhantes aos que utilizam o método convencional da impedância E/M. Contudo, como se observa na Figura 20, as diferenças nos índices RMSD são menores entre os tipos de instalação, indicando um efeito menos significativo sobre a sensibilidade em comparação com o método convencional da impedância E/M. Do mesmo modo, as diferenças nos índices CCDM são menos proeminentes entre os métodos de instalação e são sem subfaixas de frequência seletivas mais sensíveis aos danos, como observado com a técnica convencional da impedância E/M.

Além disso, os índices RMSD e CCDM obtidos para o método da FRF são significativamente maiores em comparação com a técnica convencional da impedância E/M, principalmente em frequências altas. Na técnica da impedância E/M, o transdutor opera simultaneamente como atuador e sensor, e as assinaturas de impedância estão diretamente

relacionadas à sua reatância capacitiva, como mostrado na Equação (3). Consequentemente, as variações nas assinaturas de impedância são menos significativas, principalmente em frequências mais altas, onde a reatância capacitiva é menor, como teoricamente detalhado em estudos anteriores (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2011; BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010b). Isto explica a diminuição observada nos índices RMSD e CCDM com o aumento da frequência, como mostrado nas Figuras 16 e 17, respectivamente. Em oposição, o método da FRF utiliza dois transdutores, sendo um dos quais usado como sensor passivo. Portanto, as assinaturas de FRF não estão diretamente relacionadas com a reatância capacitiva do transdutor como nas assinaturas de impedância, permitindo variações mais significativas no que se refere a danos, especialmente em frequências altas, como ilustrado pelos índices RMSD e CCDM na Figura 20.

Os resultados para todos os métodos de instalação estão resumidos na Tabela I, que destaca a PSD mais elevada obtida no teste PLB e os índices RMSD e CCDM mais elevados obtidos utilizando os métodos da impedância E/M convencional e da FRF.

Tabela I. Valores máximos obtidos para cada método de instalação em todos os ensaios.

Método de instalação do transdutor	Teste PLB PSD (dB)	Método Convencional E/M				FRF	
		RMSD		CCDM			
		Dano em 100 mm	Dano em 1000 mm	Dano em 100 mm	Dano em 1000 mm	RMSD	CCDM
Convencional	-45,9	739,0	676,1	0,580	0,369	7616	0,528
Instalação magnética	-61,0	465,9	581,2	0,079	0,102	2393	0,653
MWBEMI, 1.0 mm	-34,5	341,6	359,7	0,078	0,097	5509	0,547
MWBEMI, 0.5 mm	-36,0	124,2	129,4	0,026	0,033	4082	0,868

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme observado na Tabela I e nos gráficos apresentados anteriormente, a distância entre o dano e os métodos de instalação não exercem influência significativa sobre os índices de danos. Em alguns casos, os índices obtidos para os danos a uma distância de 1000 mm foram superiores aos obtidos para os danos a uma distância de 100 mm. No entanto, é importante ressaltar que a estrutura utilizada neste estudo é uma barra de alumínio de pequeno tamanho, podendo-se obter diferentes resultados em estruturas maiores.

Conclusão

Este estudo apresenta uma análise comparativa dos efeitos de três métodos de instalação de transdutores piezelétricos em relação à sensibilidade para a detecção de danos estruturais com base nos métodos da impedância E/M convencional e da FRF. Os resultados experimentais indicam que o método de instalação do transdutor exerce influência na detecção de dano bem como as faixas de frequência mais sensíveis ao dano. Cada método de instalação do transdutor na estrutura monitorada apresenta uma sensibilidade diferente ao dano estrutural. Outra constatação relevante é que a faixa de frequência mais sensível ao dano é diferente para cada método de instalação. O método convencional de instalação, no qual o transdutor é fixado diretamente à estrutura usando um adesivo de alta rigidez, como cola a base de epóxi ou cianoacrilato, alcança uma maior sensibilidade ao dano.

Para o método convencional de instalação, a maior sensibilidade ao dano foi obtida em baixa frequência e para os demais métodos foram encontradas faixas de frequência mais altas. Os valores de índices RMSD e CCDM mais elevados também foram fornecidos pelo método de instalação convencional, o que está dentro da faixa de valores desejados e confirmando deste modo uma maior sensibilidade ao dano. Contudo, os demais métodos de instalação apresentados nesse trabalho podem conseguir uma maior sensibilidade ao dano se a faixa de frequências for corretamente selecionada e podem proporcionar as vantagens de permitir a reutilização do transdutor, o seu fácil reposicionamento e o monitoramento de estruturas inacessíveis ou sob condições adversas de operação.

Portanto, os resultados apresentados neste estudo podem ser uma boa referência para futuras pesquisas que desejam investigar sobre métodos de instalações alternativos de transdutores piezelétricos.

Sugestão para trabalhos futuros

Como proposta para um trabalho futuro pretende-se realizar uma análise dos métodos de instalação em estruturas maiores, de materiais diferentes e com outros níveis de excitação, utilizando sinais de diferentes tipos ou amplitude, estudar outros tipos de danos aplicados à estrutura ou, ainda, estudar outras abordagens de modelagem estrutural.

Referências Bibliográficas

- ALBAKRI, M; TARAZAGA, P. Electromechanical impedance–based damage characterization using spectral element method. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 1, p. 63–77, 2017. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X16642534>
- ALMEIDA V.A.D., BAPTISTA F.G., AGUIAR P.R., Piezoelectric transducers assessed by the pencil lead break for impedance-based structural health monitoring, **IEEE Sensors Journal**, v.15, p. 693-702, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2014.2352171>
- ANNAMDAS, V.G.M.; ANNAMDAS, K.K. Different types of piezoceramic-structure interaction models using electro mechanical impedance technique: a review, in: **Proceedings of SPIE 7292, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems**, San Diego, California, USA, pp. 1–12, 2009. <http://dx.doi.org/10.1117/12.817497>
- ARJUN, V.; SASI, B.; PURNA CHANDRA RAO, B.; MUKHOPADHYAY, C. K.; JAYAKUMAR, T. Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates, **Sensors and Actuators A: Physical**. v.226, p. 69–75, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.018>
- ASTM, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, **ASTM Standard E976-10**, 2010. <http://dx.doi.org/10.1520/E0976-10>
- BAKHT, B.; MUFTI, A. Structural Health Monitoring, in **B. Bakht, A. Mufti (eds.), Bridges: Analysis, Design, Structural Health Monitoring, and Rehabilitation**, Springer, Switzerland, pp. 307-354, 2015. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-17843-1_10
- BAPTISTA, F.G.; VIEIRA FILHO, J. A new impedance measurement system for pzt-based structural health monitoring, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.58, p.3602-3608, 2009. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2009.2018693>
- BAPTISTA, F.G.; VIEIRA FILHO, J. Transducer loading effect on the performance of PZT-based SHM systems. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 57(4): 933-941, 2010a. <http://dx.doi.org/10.1109/tuffc.2010.1497>
- BAPTISTA, F.G.; VIEIRA FILHO, J. Optimal frequency range selection for PZT transducers in impedance-based SHM systems. **IEEE Sensors Journal**, 10(8): 1297-1303, 2010b. <http://dx.doi.org/10.1109/jsen.2010.2044037>
- BAPTISTA, F.G.; BUDOYA, D.E.; ALMEIDA, V.A.D.; ULSON, J.A.C. An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance based structural health monitoring, **Sensors**, v.14, p. 1208-1227, 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/s140101208>
- BAPTISTA, F.G.; VIEIRA FILHO, J.; INMAN, D.J. Sizing PZT transducers in impedance-based structural health monitoring. **IEEE Sensors Journal**, 11(6): 1405-1414, 2011. <http://dx.doi.org/10.1109/jsen.2010.2098865>

BRUNNER, A.J.; BIRCHMEIER, M.; MELNYKOWYCZ, M.M.; BARBEZAT, M. Piezoelectric fiber composites as sensor elements for structural health monitoring and adaptive material systems. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 20(9): 1045-1055, 2009. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X08101196>

CAO, H.; THAKAR, S.K.; OSENG, M.L.; NGUYEN, C.M.; JEBALI, C.; KOUKI, A.B.; CHIAO, J.C.; Development and characterization of a novel interdigitated capacitive strain sensor for structural health monitoring. **IEEE Sensors Journal**, 15(11): 6542-6548, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2015.2461591>

CORTEZ, N.E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F.G.; A new microcontrolled structural health monitoring system based on the electromechanical impedance principle. **Structural Health Monitoring**, 12(1): 14-22, 2013. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921712461163>

FARRAR, C.R.; WORDEN, K.; Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective, **John Wiley & Sons**, Chichester, United Kingdom, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118443118>

FREITAS, E.S.; BAPTISTA, F.G.; Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, 238: 220-228, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.031>

GIURGIUTIU, V. Embedded NDT with piezoelectric wafer active sensors, in: O. Günes, Y. Akkaya (Eds.), *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, **RILEM Bookseries**, Springer, Netherlands, v.6, p. 987-992, 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-0723-8_138.

GYEKENYESI, A. L.; MARTIN, R. E.; SAWICKI, J. T.; BAAKLINI, G. Y. Damage assessment of aerospace structural components by Impedance based health monitoring. Hanover: **NASA Technical Memorandum TM - 2005-213579**, GLTRS, 2005.

HIGO, Y.; INABA H. The General Problems of AE Sensors, Acoustic Emission: Current Practice and Future Directions. **ASTM STP 1077**, Philadelphia, 1991.

KAMAS, T.; TEKKALMAZ, M. SHM of thick structures via E/M impedance of embedded PWAS for weight loss defects, in: **8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016)**, 5-8 July 2016, Spain, Bilbao. <http://www.ndt.net/?id=19848>

KAUR, N.; BHALLA, S.; SHANKER, R.; PANIGRAHI, R. Experimental evaluation of miniature impedance chip for structural health monitoring of prototype steel/RC structures. **Experimental Techniques**, 40(3): 981-992, 2016. <http://dx.doi.org/10.1111/ext.12146>

KIM, I.; CHATTOPADHYAY, A. Guided Lamb wave-based structural health monitoring using a novel wave packet tracing method for damage localization and size quantification. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 26(18): 2515-2530, 2015. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X15604406>

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive

material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 5, n. 1, p. 12-20, 1994.

MARTOWICZ, A.; SENDECKI, A.; SALAMON, M.; ROSIEK, M.; UHL, T. Application of electromechanical impedance-based SHM for damage detection in bolted pipeline connection. **Nondestructive Testing and Evaluation**, 31(1): 17-44, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2015.1058376>

MARUO, I.I.C.; GIACHERO, G.F.; STEFFEN JUNIOR, V.; FINZI NETO, R.M. Electromechanical impedance-based structural health monitoring instrumentation system applied to aircraft structures and employing a multiplexed sensor array. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 7(3): 294-306, 2015. <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v7i3.447>

MEITZLER, A. H. *et al.* IEEE standard on piezoelectricity: an american national standard. New York: **IEEE-ANSI**, 66 p. (Std, 176.), 1988.

MOHARANA, S.; BHALLA, S. Influence of adhesive bond layer on power and energy transduction efficiency of piezo-impedance transducer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 26(3): 247-259, 2015. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X14523858>

NA, S.; LEE, H. Steel wire electromechanical impedance method using a piezoelectric material for composite structures with complex surfaces. **Composite Structures**, 98(4): 79-84, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.10.046>

NA, S.; TAWIE, R.; LEE, H. Electromechanical impedance method of fiber-reinforced plastic adhesive joints in corrosive environment using a reusable piezoelectric device. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 23(7): 737-747, 2012. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X12440754>

NA, W.; PARK, K.T. A cost-effective impedance-based structural health monitoring technique for steel structures by monitoring multiple areas. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 2, pp. 154-162, 2017. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X16645866>

NASKAR, S.; BHALLA, S. Metal-wire-based twin one-dimensional orthogonal array configuration of PZT patches for damage assessment of two-dimensional structures. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 27(11): 1440-1460, 2016. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X15592480>

OHTSU, M.; ENOKI, M.; MIZUTANI, Y.; SHIGEISHI, M. Principles of the Acoustic Emission (AE) Method and Signal Processing, in **Practical Acoustic Emission Testing**, Springer, Japan, pp. 5-34, 2016. http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-55072-3_2

OVERLY, T.G.; GYUHAE, P.; FARINHOLT, K.M.; FARRAR, C.R. Piezoelectric active-sensor diagnostics and validation using instantaneous baseline data. **IEEE Sensors Journal**, 9(11): 1414-1421, 2009. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2009.2018351>

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C.R.; INMAN, D.J. Overview of piezoelectric impedance based health monitoring and path forward, **The Shock and Vibration Digest**, v.35, p. 451-463, 2003. <http://hdl.handle.net/10203/18828>

SHAHAB, S.; ERTURK, A. Coupling of experimentally validated electroelastic dynamics and mixing rules formulation for macro-fiber composite piezoelectric structures. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, (Online before print): 1–14, 2016. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X16672732>

TINOCO, H.A.; MARULANDA, D.J. Damage identification in active plates with indices based on Gaussian confidence ellipses obtained of the electromechanical admittance. **Journal of Nondestructive Evaluation**, 34:28: 1-16, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-015-0299-3>

VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F.G.; INMAN, D.J. Time-domain analysis of piezoelectric impedance-based structural health monitoring using multilevel wavelet decomposition. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 25(5): 1550-1558, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.12.003>

WAUGH, R.C. Non-destructive Evaluation, in RC Waugh (ed.), Development of Infrared Techniques for Practical Defect Identification in Bonded Joints, **Springer Thesis**, Switzerland, pp. 21-37, 2016. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-22982-9_3

ZHAO, J.; BAO, T.; AMJAD, U. Optical fiber sensing of small cracks in isotropic homogeneous materials, **Sensors and Actuators A: Physical**. v.225, p. 133–138, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.017>