



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Avaliação do Método da Quebra do Grafite para Estimação da
Sensibilidade de Transdutores Piezelétricos Utilizados na Técnica
da Impedância Eletromecânica**

VINICIUS AUGUSTO DARE DE ALMEIDA

Bauru – SP
2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Avaliação do Método da Quebra do Grafite para Estimação da Sensibilidade de Transdutores Piezelétricos Utilizados na Técnica da Impedância Eletromecânica”

VINICIUS AUGUSTO DARE DE ALMEIDA

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
2015

Almeida, Vinicius Augusto Dare.

Avaliação do método da quebra do grafite para
estimação da sensibilidade de transdutores
piezelétricos utilizados na técnica da impedância
eletromecânica / Vinicius Augusto Dare de Almeida,
2015

52 f. : il.

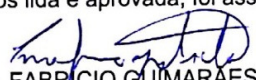
Orientador: Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista

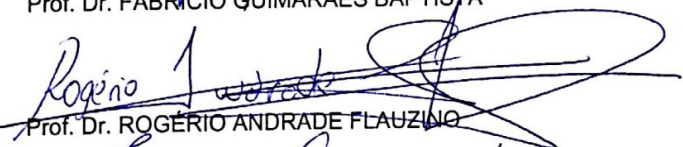
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015

1. Quebra do grafite. 2. Detecção de dano. 3.
Sistemas de monitoramento estrutural. 4. Transdutores
Piezelétricos. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE VINICIUS AUGUSTO DARE DE ALMEIDA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de junho do ano de 2015, às 09:30 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ROGÉRIO ANDRADE FLAUZINO do(a) Departamento de Engenharia Elétrica/EESC/USP, Prof. Dr. JOSE ALFREDO COVOLAN ULSON 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 VINICIUS AUGUSTO DARE DE ALMEIDA, intitulado "AVALIAÇÃO DO MÉTODO DA QUEBRA DO GRAFITE PARA ESTIMAÇÃO DA SENSIBILIDADE DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS UTILIZADOS NA TÉCNICA DA 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


Prof. Dr. ROGÉRIO ANDRADE FLAUZINO


Prof. Dr. JOSE ALFREDO COVOLAN ULSON

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela vida.

Aos meus pais, Jorge e Stela, os quais foram imprescindíveis para elaboração deste trabalho, bem como meu irmão Alexandre.

Ao meu orientador Fabricio, o qual foi fundamental e decisivo em todas as etapas do trabalho.

À comissão examinadora.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa (processo 2013/16434-0) e auxílio financeiro (Processo 2012/10825-4) a esta pesquisa.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo comparativo da sensibilidade de diferentes tipos de transdutores piezelétricos na detecção de dano em sistemas de SHM (*Structural Health Monitoring* – monitoramento de integridade estrutural) baseados na técnica da impedância eletromecânica (E/M). Foi realizada uma comparação de três transdutores piezelétricos: cerâmica de PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate* – titanato zirconato de chumbo), dispositivo MFC (*Macro Fiber Composite* – compósito de macro fibra) e diafragma piezelétrico, comumente conhecido como *buzzer*. Todos os testes foram realizados em barras de alumínio.

A avaliação experimental da sensibilidade dos transdutores de PZT e MFC foi feita de uma maneira alternativa, utilizando o método PLB (*Pencil Lead Break* – quebra do grafite), o qual é muito simples e utilizado em sistemas de emissão acústica. Tem, como princípio, a quebra do grafite contra a estrutura a ser analisada. Os testes foram realizados em barras de alumínio de diferentes tamanhos. O dano estrutural foi induzido utilizando-se massas metálicas (porcas de aço), as quais foram fixadas, com cola a base de cianoacrilato, nas barras.

A avaliação dos resultados foi feita a partir da comparação dos índices de dano, obtidos das assinaturas da impedância elétrica dos transdutores de PZT e MFC, acoplados à estrutura a ser monitorada, e nos cálculos da PSD (*Power Spectral Density* – densidade espectral de potência), obtida do método PLB e calculada usando o método Welch. Os resultados experimentais indicaram que os transdutores possuem sensibilidades diferentes para a detecção de dano, as quais também dependem da faixa de frequência. Em conclusão, os resultados mostraram uma boa relação entre os índices de dano e a PSD, indicando, dessa forma, que o método PLB pode ser uma boa ferramenta para estimar a sensibilidade na detecção de dano baseada na técnica da impedância E/M.

Palavras-chave: quebra do grafite, PLB, sensibilidade, detecção de dano, transdutores piezelétricos, impedância eletromecânica, PZT, MFC, diafragmas piezelétricos.

ABSTRACT

This dissertation presents a comparative study of the sensitivity of different types of piezoelectric transducers for damage detection in structural health monitoring (SHM) systems, based on the electromechanical impedance (EMI) technique. A comparison of three piezoelectric transducers was performed: PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate*) ceramic, MFC (*Macro Fiber Composite*) device and piezoelectric diaphragm, also known as buzzer.

The experimental evaluation of the sensitivity of the PZT and MFC transducers was performed in an alternative way using the pencil lead break (PLB) method, which is very simple and used in acoustic emission (AE) systems. It is based on the break of a lead against the structure to be analyzed. The tests were carried out on aluminum beams of different sizes. The structural damage was induced by metallic mass (steel nuts), which were fixed in the beams with cyanoacrylate glue.

The evaluation of the results was made by comparing the damage indices obtained from the electrical impedance signatures of the PZT and MFC transducers coupled to the structure to be analyzed and the power spectral density (PSD) calculations obtained using the PLB and the Welch method. The experimental results indicated that the transducers have different sensitivities for the detection of damage, which also depend on the frequency range. The conclusion is that the results showed a good relationship between the damage indices and the PSD, indicating that the PLB method can be a useful tool to estimate the sensitivity in damage detection applications based on the EMI technique.

Keywords: pencil lead break, PLB, sensitivity, damage detection, piezoelectric transducers, electromechanical impedance, PZT, MFC, piezoelectric diaphragms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de um capacitor plano de placas paralelas utilizado para determinar as relações constitutivas de um material piezelétrico.....	17
Figura 2.2 - Transdutores piezelétricos analisados.....	19
Figura 2.3 - Configuração básica da técnica da impedância E/M.....	21
Figura 2.4 - Configuração básica do método PLB.....	27
Figura 3.1 - (a) barra estreita e (b) barra larga com a cerâmica de PZT, (c) barra larga com o transdutor MFC, (d) porca de aço pequena e (e) porca grande.....	29
Figura 3.2 – Esquema do sistema de aquisição e analisador de dados: transdutor PZT, dispositivo DAQ e PC.....	30
Figura 3.3 - Lapiseira utilizada nos experimentos de quebra do grafite, bem como o diâmetro e comprimento do grafite e ângulo de quebra.....	31
Figura 4.1 - Sensibilidade teórica dos transdutores de PZT fixados nas barras estreita e larga.....	33
Figura 4.2 - Parte real das assinaturas da impedância elétrica, para cada transdutor.....	35
Figura 4.3 - Índices RMSD, para cada transdutor.....	36
Figura 4.4 - Índices CCDM, para cada transdutor.....	37
Figura 4.5 - (a) Sinal Tensão e (b) PSD, obtidos da cerâmica de PZT.....	38
Figura 4.6 - (a) Sinal de Tensão e (b) PSD, obtidos do dispositivo MFC.....	39
Figura 4.7 - Densidade espectral obtida utilizando o método PLB, no qual o transdutor foi fixado nas barras fina e larga.....	41
Figura 4.8 - Parte real da assinatura da impedância elétrica, com indução de dano e sem.....	42
Figura 4.9 - Índice RMSD e PSD, obtidos dos transdutores PZT fixados nas barras (a) estreita e (b) larga.....	42
Figura 4.10 - Índice CCDM e PSD obtidos a partir dos transdutores PZT fixados nas barras (a) estreita e (b) larga.....	43
Figura 4.11 - (a) PSDs obtidas para o transdutor de PZT e dispositivo MFC e (b) diferença das PSDs entre o dispositivo MFC e o transdutor PZT.....	45
Figura 4.12 - (a) Índice RMSD e (b) Índice CCDM, obtidos utilizando o transdutor de PZT e o dispositivo MFC. A linha contínua indica a diferença dos índices entre os dois transdutores.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela I - PROPRIEDADES DA CERÂMICA PZT 5H E DO ALUMÍNIO.....	31
--	----

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
E/M	Eletromecânica
FRF	Função de Resposta em Frequência
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MFC	<i>Macro Fiber Composite</i> – compósito de macrofibra
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
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

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
U	Diferença de Potencial	V
$\vec{F}, F$	Força e módulo	N
T	Tensão mecânica ou <i>stress</i>	N/m
S	Deformação mecânica ou <i>strain</i>	Adimensional
$\vec{E}, E$	Campo elétrico	V/ m
D	Vetor deslocamento elétrico	C/ m ²
ϵ	Permissividade dielétrica	F/ m
d	Constante piezelétrica	m/ V
Z_E	Impedância elétrica do transdutor	Ω
Z_T	Impedância mecânica do transdutor	N. s / m
Z_S	Impedância mecânica da estrutura	N. s / m
C_0	Capacitância estática do transdutor	F
k	Número de onda	rad / m
f	Frequência	Hz
ω	Velocidade angular	rad / s
ℓ	Dimensão do transdutor	m
ρ_T	Densidade em massa do transdutor	kg/ m ³
A_S	Área da secção transversal da estrutura	m ²
A_T	Área da secção transversal do transdutor	m ²
s	Constante de elasticidade	m ² / N
η	Sensibilidade do transdutor	Adimensional

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Artigos completos publicados em periódicos

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*, vol. 15, no. 2, pp. 693-702, 2015.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

ALMEIDA, V. A. D.; BAPTISTA, F. G.; MENDES, L. C.; BUDOYA, D. E. **Experimental analysis of piezoelectric transducers for impedance-based structural health monitoring.** In: *International Electronic Conference on Sensors and Applications*, 2014, Sciforum.net. *Proceedings of International Electronic Conference on Sensors and Applications*. Basel: MDPI. v. 2014. pp. f004-f004-6, 2014.

ALMEIDA, V. A. D.; BAPTISTA, F. G. **An experimental assessment of PZT patches for impedance-based SHM applications.** In: *Eighth International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 2014, Liverpool. *Proceedings of the 8th International Conference on Sensing Technology*, Sep. 2-4, pp. 495-499, 2014.

ALMEIDA, V. A. D.; MENDES, L. C.; BAPTISTA, F. G. **Deteção de dano baseada na impedância E/M com transdutores piezelétricos de baixo custo.** In: *Congresso Brasileiro de Autômática (CBA)*, 2014, Belo Horizonte. *Anais do XX-CBA*, 20 a 24 de set., 2014. pp. 379-384, 2014.

SUMÁRIO

1 Introdução	14
1.1 Objetivos e Motivação.....	15
2 Sistemas de SHM baseados na Impedância Eletromecânica.....	16
2.1 Sistemas de SHM.....	16
2.2 Efeito Piezelétrico.....	17
2.3 Transdutores Piezelétricos.....	19
2.4 Técnica da Impedância E/M.....	21
2.4.1. Detecção e Quantificação de Dano	23
2.4.2. Sensibilidade Teórica do Transdutor PZT.....	25
2.5 Método PLB.....	26
3 Metodologia.....	28
3.1. Metodologia da Técnica da Impedância Eletromecânica.....	27
3.2. Metodologia do Método PLB.....	29
4 Resultados.....	32
4.1. Sensibilidade Teórica do Transdutor de PZT.....	32
4.2. Comparação Inicial entre os Transdutores.....	34
4.3. Reprodutibilidade do Método da Quebra do Grafite (PLB).....	38
4.4. Eficácia do Método da Quebra do Grafite na Impedância E/M.....	41
5 Considerações Finais.....	49
6 Referências Bibliográficas.....	50

Capítulo 1

Introdução

Sistemas de monitoramento de integridade estrutural têm recebido crescente interesse nos últimos anos. Esses sistemas permitem que danos estruturais, ainda que em estágio inicial, sejam detectados e quantificados, aumentando, assim, a segurança dos usuários e reduzindo custos de manutenção. As aplicações da técnica abrangem desde infraestruturas civis a estruturas aeroespaciais e aeronáuticas, sendo estas últimas o principal foco na atualidade.

Para o monitoramento é desejável que a detecção do dano seja realizada através de ensaios não destrutivos ou NDT (*Non-Destructive Testing*), utilizando técnicas que sejam minimamente invasivas à estrutura monitorada. Dentre as técnicas NDT temos: emissão acústica, ondas de Lamb, vácuo comparativo, correntes parasitas e a técnica da impedância eletromecânica (E/M). Esta se destaca das demais pela sua simplicidade e por utilizar transdutores piezelétricos leves e de dimensões reduzidas (espessura na ordem de fração de milímetro). Esses dispositivos são como adesivos colados na estrutura, permitindo que uma vasta área seja monitorada com o uso de múltiplos sensores, sem alterar, significativamente, suas propriedades mecânicas. Tais características tornam a técnica da impedância eletromecânica adequada para o monitoramento de estruturas aeronáuticas (ROCHA et al., 2013; ROSIEK et al., 2013), nas quais existe uma maior preocupação como peso e com a aerodinâmica.

Os transdutores piezelétricos mais comumente utilizados na técnica da impedância E/M, são as cerâmicas de PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate* – titanato zirconato de chumbo) e os transdutores de MFC (*Macro Fiber Composite* – compósito de macro fibra). Esses dispositivos são difíceis de serem encontrados no mercado brasileiro com espessura suficientemente pequena para aplicação na técnica da impedância eletromecânica, necessitando-se de importação. Dessa maneira, o uso do diafragma piezelétrico ou pastilhas piezelétricas, comumente conhecidas como *buzzers*, representa uma alternativa para tal problema, visto que é facilmente encontrado e possui baixo custo.

Assim como em outros métodos de detecção de dano, os transdutores piezelétricos necessitam ser devidamente caracterizados. Através da caracterização, tem-se ganho de sensibilidade do sistema e confiança em seu uso.

Um método amplamente utilizado em Emissão Acústica (EA) para a caracterização de transdutores é o método da quebra do grafite (*Pencil Lead Break* – PLB). O método da quebra do grafite é um método padrão, o qual neste trabalho foi utilizado para avaliar a sensibilidade dos transdutores piezelétricos na detecção de dano, baseado no método da impedância E/M.

1.1 Objetivos e Motivação

Atualmente, garantir segurança, conforto e proporcionar um prolongamento da vida útil de um equipamento, reduzem custos e aumentam sua utilização. Este trabalho visa contribuir para a área do monitoramento estrutural, por meio de uma técnica não destrutiva, a qual utiliza transdutores piezelétricos de baixo custo.

Com isso, o objetivo deste trabalho foi de analisar e caracterizar transdutores piezelétricos, bem como analisar a eficácia do método da quebra do grafite (PLB) para estimar a sensibilidade dos transdutores piezelétricos na detecção de dano baseada na técnica da impedância eletromecânica (E/M). Embora a técnica da impedância E/M venha sendo estudada há algumas décadas, diversos problemas têm dificultado a sua aplicação com eficiência, entre eles a caracterização de transdutores. A caracterização apropriada permite não apenas o correto dimensionamento dos transdutores para a máxima sensibilidade na detecção de dano, mas também aumenta a confiabilidade de todo o sistema, o que é imprescindível em estruturas críticas. Ainda, neste trabalho, três transdutores foram testados (cerâmica PZT, dispositivo MFC e diafragma piezelétrico, ou *buzzer*) e comparados entre si, experimentalmente e teoricamente, através de um modelo eletromecânico apropriado.

Capítulo 2

Sistemas de SHM Baseados na Impedância Eletromecânica

2.1 Sistemas de SHM

Os modernos sistemas de monitoramento de integridade estrutural, comumente conhecidos como SHM, do termo em inglês *Structural Health Monitoring*, estão sendo aplicados em muitos setores, desde as infraestruturas da engenharia civil à indústria aeronáutica, um dos setores mais focados na atualidade. Pontes, edifícios, estradas, plataformas petrolíferas, bem como aviões, helicópteros, satélites, estações espaciais, são apenas alguns exemplos. A motivação de seu uso é tanto científica, pois monitorando uma estrutura tem-se mais segurança e aumento de vida, quanto econômica, uma vez que tais sistemas contribuem para economia na manutenção.

A principal motivação para o uso de sistemas de SHM, segundo Visalakshi et. al (2013), incluem a detecção de danos estruturais a tempo de reparos, facilidade em monitoramentos de cargas externas e distribuição de tensão, validação do design de um projeto, uma vez que o design de uma estrutura é, geralmente, baseado em parâmetros que são afetados por variações estáticas.

Portanto, o objetivo principal de sistemas de SHM é detectar, em tempo real ou não, danos estruturais. Segundo Rytter (1993), em sistemas avançados há um processo de cinco passos a serem seguidos: (1) detectar a existência de dano; (2) localizá-lo na estrutura; (3) identificar o seu tipo; (4) avaliar a sua extensão; (5) determinar o tempo restante de vida útil da estrutura.

A definição de dano é importante em sistemas de SHM (SOHN et. al., 2004). Entende-se como dano, qualquer alteração da estrutura que afete o seu desempenho atual ou possa afetar o seu desempenho futuro. Nessa definição, a identificação de dano é baseada na comparação entre dois estados da estrutura, sendo que em um deles a estrutura é considerada íntegra. As alterações que um dano causa na estrutura podem ser, por exemplo, na massa, rigidez, dissipação de energia, impedância mecânica e na sua seção transversal. Estas, por sua vez, alteram a resposta dinâmica da estrutura. Deste conceito, surgem as técnicas baseadas na

Função de Resposta em Frequência (FRF).

As técnicas utilizadas em sistemas de SHM têm origem nos métodos de avaliação não destrutiva, comumente conhecida como NDT, do termo em inglês *Non-Destructive Testing*, tais como emissão acústica, vácuo comparativo, ondas de *Lamb*, inspeção por partícula magnética, correntes parasitas e aquelas baseadas em fibra óptica, (GIURGIUTIU, 1998).

Neste estudo, tem-se o uso da impedância eletromecânica (E/M), uma técnica NDT baseada na FRF que utiliza transdutores piezelétricos tanto para excitar como para coletar dados relacionados com a impedância mecânica da estrutura a ser monitorada.

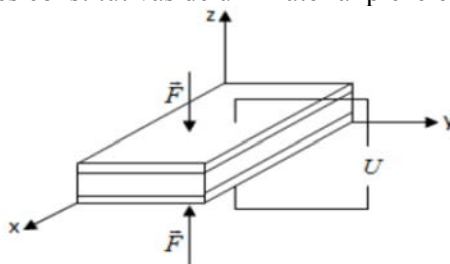
2.2 Efeito Piezelétrico

A palavra piezeletricidade vem do grego *piezein* e significa pressionar. Foi descoberta em 1880 pelos irmãos Jacques e Pierre Curie e refere-se à propriedade de certos cristais de se tornarem eletricamente polarizados quando o cristal é submetido a uma pressão mecânica, exibindo, assim, uma tensão através dele (FAWWAZ, 2006). Este estudo apresenta as características básicas do efeito; portanto para um estudo mais detalhado, recomenda-se a leitura de Meitzler et al. (1987).

Basicamente, a piezeletricidade é o surgimento de uma tensão elétrica em um material submetido a uma distribuição de tensão mecânica. Pode ocorrer o efeito reverso, ou seja, ao se aplicar uma tensão elétrica entre os dois lados de um material piezelétrico, surge uma deformação mecânica. Somente o efeito piezelétrico linear foi considerado neste estudo. Todo o estudo a seguir foi baseado em Baptista (2010), tese doutorado.

As relações constitutivas de um material piezelétrico podem ser determinadas a partir de um capacitor plano de placas paralelas, no qual são aplicadas uma força $\vec{F}$ e uma diferença de potencial elétrico U , como representado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Esquema de um capacitor plano de placas paralelas utilizado para determinar as relações constitutivas de um material piezelétrico.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Inicialmente, considera-se que o dielétrico do capacitor seja um material anisotrópico e não piezelétrico. A aplicação da força $\vec{F}$ produz uma deformação S e uma tensão mecânica T que se relacionam através da lei de Hooke dada pela Equação (2.1)

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta} T_\beta \quad (2.1)$$

sendo $s_{\alpha\beta}$ as constantes de elasticidade e $\alpha, \beta, = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

A diferença de potencial cria um campo elétrico $\vec{E}_k$ [V/m], para $k = 1, 2, 3$ e pode-se obter

$$\vec{D}_m = \varepsilon_{mk} \vec{E}_k \quad (2.2)$$

sendo $\vec{D}_m$ [C/m²], para $m = 1, 2, 3$, o vetor de deslocamento elétrico e ε_{mk} [F/m] o tensor de segunda ordem que representa as constantes de permissividade dielétrica.

Por outro lado, se o dielétrico é um material piezelétrico, ocorre uma interação entre as grandezas elétricas e mecânicas. A partir da energia livre de Gibbs do material, pode-se determinar que o deslocamento elétrico e a deformação mecânica são dados por

$$D_m = d_{m\beta}^{H,\theta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^{T,H,\theta} E_k + m_{mk}^{T,\theta} H_k + p_m^{T,H} d\theta \quad (2.3)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^{E,H,\theta} T_\beta + d_{\beta m}^{H,\theta} E_m + d_{mk}^{E,\theta} H_m + \alpha_\alpha^{E,H} d\theta \quad (2.4)$$

sendo $d_{m\beta}$ e $d_{\beta m}$ as constantes piezelétricas, m_{mk} as constantes magnetodielétricas, p_m as constantes piroelétricas, α_α os coeficientes de expansão térmica, H_k as componentes de campo magnético e θ a temperatura. Os sobrescritos E, H, θ e T indicam, respectivamente, campo elétrico, campo magnético, temperatura e tensão mecânica constantes.

Os efeitos térmicos e magnéticos não são considerados neste estudo e as Equações (2.3) e (2.4) podem ser simplificadas como

$$D_m = d_{m\beta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (2.5)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d_{\beta m} E_m \quad (2.6)$$

Na Equação (2.5), o efeito piezelétrico direto, as componentes do tensor $d_{m\beta}$

relacionam o deslocamento elétrico na direção m com a tensão mecânica na direção β . O mesmo raciocínio vale para o tensor $d_{\beta m}$ na Equação (2.6), o efeito piezelétrico reverso. Portanto, em um material piezelétrico há, também, uma tensão elétrica devido a uma tensão mecânica, e uma deformação devido a uma tensão elétrica aplicada, ou seja, há um acoplamento eletromecânico.

As expressões nas Equações (2.5) e (2.6) podem ser colocadas na forma matricial, como segue

$$[D] = [d][T] + [\varepsilon^T][E] \quad (2.7)$$

$$[S] = [s^E][T] + [d]^T[E] \quad (2.8)$$

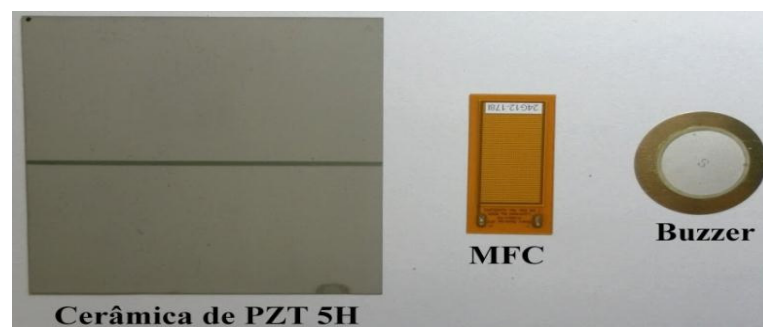
As expressões nas Equações (2.7) e (2.8) definem as relações constitutivas básicas de um material piezelétrico (MEITZLER et al., 1987).

2.3 Transdutores Piezelétricos

Cerâmicas de PZT (*Pb-lead Zirconate Titanate* – titanato zirconato de chumbo) são, comumente, as mais utilizadas em sistemas de SHM baseados na impedância E/M. Neste trabalho, três transdutores piezelétricos foram avaliados: cerâmica convencional de PZT, transdutor flexível MFC (*Macro Fiber Composite* – composto de macro fibra) e o diafragma piezelétrico, comumente conhecido como *buzzer*, os quais podem ser vistos na Figura 2.2.

Normalmente, as cerâmicas de PZT são fornecidas em placas delgadas, com espessura que pode variar, tipicamente, de 0,1 a 2 mm, embora uma espessura entre 0,1 a 0,3 mm seja recomendável (YAN; CHEN; 2010). Essas cerâmicas são revestidas em ambas as faces por um filme de níquel e podem ser cortadas no tamanho e na forma desejados.

Figura 2.2 - Transdutores piezelétricos analisados.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Em sistemas de SHM, as cerâmicas de PZT são as mais utilizadas, porém são muito rígidas e, por esse motivo, tornam-se muito quebradiças, característica que tem dificultado sua aplicação no monitoramento de muitas estruturas (principalmente as de superfícies irregulares ou sujeitas a carregamentos).

Dessa forma, para tentar solucionar esse problema, surgiram os transdutores MFC, os quais foram desenvolvidos pela NASA Langley Research Center, em 1996, e começaram a ser comercializados em todo o mundo a partir de 2002 (WILKIE, 2002; Smart Material, 2015). Esses dispositivos são constituídos por pequenas barras de cerâmicas de PZT dispostas entre camadas de um filme adesivo e interligadas por eletrodos interdigitais, o que lhes garantem alta flexibilidade. Devido a isto, os transdutores MFC passaram a ser investigados para a geração de energia elétrica a partir de vibrações mecânicas, (WANG; INMAN; 2013), e, também, para o desenvolvimento de sistemas de SHM baseados na impedância E/M e outras técnicas (CUI et al., 2014; Park et al. 2008). A grande desvantagem dos transdutores MFC, a qual também vale para as cerâmicas de PZT, é a dificuldade de serem encontrados com as dimensões desejadas, necessitando-se de importação, aumentando, assim, o custo.

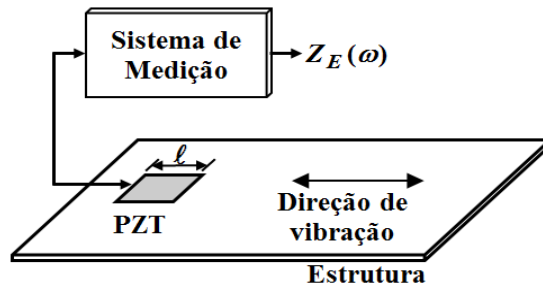
Uma alternativa para o problema acima é o uso de diafragmas piezelétricos ou cápsulas piezelétricas, comumente conhecidas como *buzzers*. São utilizados, há muitos anos, em uma grande variedade de aparelhos eletrônicos e a principal função tem sido a sinalização sonora. Esses dispositivos são fornecidos por fabricantes de componentes eletrônicos em geral e sua construção é simples, sendo constituídos por uma base de latão. Nesta base, o material piezelétrico é encontrado e revestido por um filme metálico. Possui formato circular com diâmetro variando, tipicamente, de 12 mm a 41 mm. As grandes vantagens desses componentes são o custo extremamente baixo e a facilidade de serem encontrados em muitos países sem a necessidade de importação.

No Brasil são facilmente encontrados em lojas de componentes eletrônicos a um custo que, dependendo do tamanho, varia de R\$ 0,05 a R\$ 10,00. Por outro lado, os transdutores convencionais têm um custo superior a US\$ 60,00. Além disso, a base de latão fornece uma proteção adicional, reduzindo a quebra do transdutor. Estas vantagens têm motivado o uso desses componentes em muitos trabalhos científicos recentes. As aplicações mais comuns têm sido o reaproveitamento de energia (*power harvesting*), como foi proposto por Sarker et al. (2013) e Mousselmal et al. (2013), e na utilização desses dispositivos como atuadores, como apresentado por Ducharne et al. (2013).

2.4. Técnica da Impedância E/M

Dentre as diversas técnicas NDT para o desenvolvimento de sistemas de SHM, a técnica da impedância E/M se destaca por sua metodologia simples e por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo. O princípio básico da técnica está na interação eletromecânica entre a impedância mecânica da estrutura a ser monitorada e a impedância elétrica do transdutor, fixado na estrutura. Uma configuração básica pode ser vista na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Configuração básica da técnica da impedância E/M.



Fonte: Elaboração do próprio autor

O transdutor, de medida ℓ , é conectado a um analisador de impedância (sistema de medição), o qual fornece a sua impedância elétrica ($Z_E(\omega)$) na frequência ω , sendo que esta deve variar dentro de uma faixa apropriada. Assim, o analisador de impedância deve excitar o transdutor em uma certa faixa de frequência, através de um sinal de excitação que pode ser, por exemplo, um sinal *chirp*, o qual realiza uma varredura desde uma frequência baixa até uma frequência alta. Desta forma, o transdutor opera, simultaneamente, como atuador e como sensor e, devido ao efeito piezelétrico, ocorre uma interação entre a impedância elétrica do transdutor e a impedância mecânica da estrutura.

Existem diversos sinais, porém, neste trabalho foi utilizado um sinal *chirp*, o qual ofereceu melhores resultados para o estudo em questão. Este faz uma varredura, desde uma frequência inicial, de baixo valor, até uma frequência final de valor mais alto, ou vice-versa. A sequência $x[n]$ de um sinal *chirp* é dada por

$$x[n] = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{F_s} n \left(\frac{(f_2 - f_1)}{2N} n + f_1\right)\right) \quad (2.9)$$

sendo $n = 0, 1, \dots, N - 1$.

Na Equação (2.9), f_1 e f_2 representam a frequência inicial e final, respectivamente, A é

a amplitude, N é o número de amostras e F_s é a taxa de amostragem. O transdutor deve ser excitado em uma faixa de frequência alta, para permitir a detecção de falhas pequenas e restringir a sua região de atuação, facilitando a localização das mesmas.

Vários modelos eletromecânicos, bidimensionais e tridimensionais, foram propostos para relacionar a impedância elétrica da pastilha PZT com as propriedades mecânicas da estrutura a ser monitorada (ZUO et al., 2013; KAMAS et al., 2013). Conforme proposto por Baptista e Vieira Filho (2010), se a pastilha for suficientemente fina e a propagação no meio tiver um baixo coeficiente de amortecimento, como ocorre com estruturas metálicas, um modelo unidimensional pode ser satisfatório. Neste estudo, adotamos um modelo unidimensional para um transdutor PZT, o qual pode ser expresso em termos da impedância elétrica:

$$Z_E(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} \parallel jZ_T \left(\frac{s_{11}}{d_{31}\ell} \right)^2 \left[\frac{1}{2} \operatorname{tg} \left(\frac{k\ell}{2} \right) - \frac{1}{\operatorname{sen}(k\ell)} + \frac{Z_S}{j2Z_T} \right] \quad (2.10)$$

sendo $Z_E(\omega)$ a impedância elétrica, Z_S a impedância mecânica da estrutura a ser monitorada, Z_T a impedância mecânica da cerâmica, ω a frequência angular, $\parallel$ indica uma conexão paralela, s_{11} a constante de elasticidade para um campo elétrico constante, d_{31} a constante piezelétrica, j é a unidade imaginária, C_0 a capacitância estática de uma cerâmica quadrada de lado ℓ e k é o número de onda dado por

$$k = \omega \sqrt{s_{11}\rho_T} \quad (2.11)$$

sendo ρ_T a densidade de massa da cerâmica PZT.

Para um coeficiente de amortecimento desprezível, a impedância mecânica da cerâmica de PZT é, aproximadamente, dada por

$$Z_T = A_T \sqrt{\frac{\rho_T}{s_{11}}} \quad (2.12)$$

em que A_T é a área da secção transversal da cerâmica.

De forma similar, a impedância mecânica da estrutura a ser monitorada pode ser obtida como segue

$$Z_S = A_S \sqrt{\frac{\rho_S}{s_S}} \quad (2.13)$$

em que s_s e ρ_s são, respectivamente, a elasticidade e densidade de massa da estrutura. Ainda, A_s é a área da secção transversal da estrutura, a qual é ortogonal à principal direcção de vibração, como pode ser visto na Figura 2.3.

De acordo com a Equação (2.10), existe uma relação entre a impedância eléctrica do transdutor ($Z_E(\omega)$) e a impedância mecânica da estrutura monitorada (Z_s). Logo, qualquer variação na impedância mecânica da estrutura devido a um dano estrutural, tal como uma trinca ou corrosão, implica em uma variação correspondente na impedância eléctrica do transdutor. Portanto, a integridade da estrutura pode ser avaliada através da medição da impedância eléctrica, a qual é simples de ser realizada.

Deve-se, também, levar em consideração o fato de que variações na temperatura podem alterar as propriedades do transdutor de PZT e da estrutura (BAPTISTA et al. 2014), resultando em um desafio em aplicações da técnica da impedância E/M. Entretanto, uma análise dos efeitos da temperatura não é o foco da proposta deste estudo.

A impedância eléctrica é, usualmente, medida em laboratório utilizando um analisador de impedância com alta exatidão e precisão. Entretanto, esses instrumentos são caros, volumosos e contêm várias funções que não são necessárias na técnica da impedância E/M. Levando tais fatos acima em consideração, vários pesquisadores propuseram sistemas mais acessíveis e baratos de medição (CORTEZ et. al., 2013; ZHOU, 2013).

No tópico a seguir, apresenta-se como é realizada a detecção de dano, na qual são comparadas duas assinaturas de impedância eléctrica.

2.4.1. Detecção e Quantificação de Dano

A detecção de dano estrutural é realizada comparando-se duas curvas (ou assinaturas) de impedância eléctrica do transdutor em uma faixa de frequência apropriada, sendo que uma delas é obtida quando a estrutura está em um estado considerado íntegro. Essa comparação é feita através de índices de falha métrica e pode utilizar a parte real, parte imaginária ou o valor absoluto da impedância eléctrica.

Os índices mais utilizados são o desvio da raiz média quadrática, RMSD (*root mean square deviation*), e o desvio do coeficiente de correlação, CCDM (*correlation coefficient deviation metric*). O índice RMSD é baseado na norma Euclidiana e é dado por

$$RMSD = \sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[Z_{E,D}(k) - Z_{E,H}(k)]^2}{Z_{E,H}^2(k)}} \quad (2.14)$$

em que $Z_{E,H}(k)$ e $Z_{E,D}(k)$ são as partes reais das assinaturas da impedância elétrica adquiridas pelo sistema de medição para a estrutura sem dano e com dano, respectivamente, medidas numa frequência k que varia de ω_I (frequência inicial) até ω_F (frequência final). Utilizou-se a parte real da impedância por esta ser mais sensível para a detecção de dano, (NA et. al., 2013).

Já o índice CCDM é baseado no coeficiente de correlação e é dado por

$$CCDM = 1 - C_c \quad (2.15)$$

sendo C_c o coeficiente de correlação que é calculado pela seguinte equação

$$C_c = \frac{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}][Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]}{\sqrt{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}]^2} \sqrt{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]^2}} \quad (2.16)$$

em que $Z_{E,H}(k)$ e $Z_{E,D}(k)$ são as assinaturas das impedâncias elétrica definidas anteriormente e $\bar{Z}_{E,H}$ e $\bar{Z}_{E,D}$ as médias dessas assinaturas na faixa de frequência selecionada entre ω_I (frequência inicial) a ω_F (frequência final).

Ambos os índices exibem comportamentos diferentes, uma vez que o RMSD é mais sensível a variações na amplitude das assinaturas de impedância elétrica. Por outro lado, o índice CCDM é mais sensível a mudanças na forma das assinaturas, como deslocamentos em frequência. Mas ambos os índices sofrem variações com a temperatura (BAPTISTA et al., 2014), exigindo um método de compensação na prática.

Teoricamente é possível estimar a sensibilidade do transdutor PZT na detecção do dano estrutural. A análise teórica é feita no próximo item.

2.4.2. Sensibilidade Teórica do Transdutor PZT

De acordo com a Equação (2.10), o princípio da técnica da impedância E/M está baseado na relação entre a impedância mecânica da estrutura a ser monitorada e a impedância elétrica do transdutor de PZT, fixado nela. O dano estrutural, como trincas e corrosões, causa variações na impedância mecânica da estrutura, a qual pode ser detectada de uma maneira simples medindo-se a impedância elétrica do transdutor.

Portanto, como proposto por Baptista e Viera Filho (2010), a variação teórica na impedância elétrica do transdutor de PZT pode ser estimada assumindo uma variação (Δ) na impedância mecânica (Z_s) da estrutura na Equação (2.10), como segue:

$$Z_{E,\Delta}(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} \|jZ_T \left(\frac{s_{11}}{d_{31}\ell}\right)^2 \left[\frac{1}{2} \tan\left(\frac{k\ell}{2}\right) - \frac{1}{\sin(k\ell)} + \frac{(1+\Delta)Z_s}{j2Z_T}\right] \quad (2.17)$$

em que $Z_{E,\Delta}(\omega)$ representa a impedância elétrica após a variação Δ na impedância mecânica.

Devido à detecção e quantificação do dano serem fundamentadas na variação da impedância elétrica, a sensibilidade teórica do transdutor PZT na detecção de dano pode ser estimada pela comparação das duas impedâncias elétricas nas Equações (2.10) e (2.17), como segue

$$\eta(\omega) = 100 \frac{||Z_{E,\Delta}(\omega)| - |Z_E(\omega)||}{|Z_E(\omega)|} \quad (2.18)$$

na qual $\eta(\omega)$ é o percentual de variação da impedância elétrica do transdutor de PZT.

A Equação (2.18) permite uma estimacão da sensibilidade para a detecção de dano como uma função da frequência, com relação a uma estrutura e um transdutor de PZT.

O propósito deste estudo é uma comparação entre a PSD (*Power Spectral Density* – densidade espectral de potência) obtida pelo método da quebra do grafite, PLB (*Pencil Lead Break*), com a sensibilidade teórica do transdutor, assim como com a variação das assinaturas da impedância elétrica experimental, a qual pode ser obtida com os índices de dano.

O método PLB é apresentado na próxima seção.

2.5. Método da Quebra do Grafite

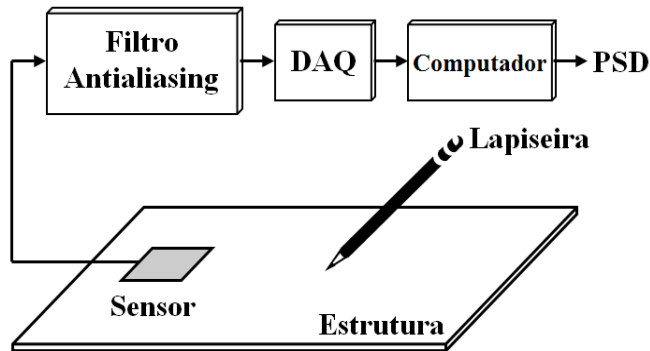
Assim como em outros métodos de detecção de dano, os transdutores piezelétricos usados na técnica de impedância E/M precisam ser propriamente caracterizados, visando melhorar a sensibilidade e confiabilidade. Um método muito comum em aplicações de emissão acústica (EA) é o método da quebra do grafite ou PLB.

Os transdutores, em geral, na prática, possuem muitos obstáculos e problemas que influenciam nos resultados. De acordo com Higo e Inaba (1991), os três principais problemas são: efeitos das condições de montagem na sensibilidade; sensibilidade do sensor; degradação da sensibilidade e seu método de avaliação. Assim, devido a esses problemas, as medidas dos sinais provenientes dos transdutores podem apresentar alterações no pico da tensão e no tempo de duração. Dessa maneira, um método eficiente de avaliação dos transdutores é o método PLB.

O PLB é um método padrão estabelecido há muito tempo, o qual foi primeiramente proposto por Hsu (1975). Pode, também, ser chamado de teste de Hsu-Nielsen e neste trabalho foi utilizado para avaliar a sensibilidade do transdutor piezelétrico na detecção de dano baseada no princípio da impedância E/M. Como transdutor foi utilizada uma pastilha piezocerâmica de PZT, a qual é comumente usada na técnica da impedância E/M.

O princípio básico do método PLB consiste em quebrar o grafite contra a estrutura a ser analisada, na qual o transdutor está instalado. A quebra libera um impulso e uma onda elástica com uma banda larga de frequência no espectro. Os sinais obtidos são muito reprodutivos. Porém, pequenos desvios no manuseio, tipo de lapiseira e tipo do grafite utilizado podem resultar em diferenças nos sinais obtidos. Desta forma, podemos considerar o PLB um método simples e uma maneira confiável para obtenção de uma fonte de sinal impulsivo com uma grande largura de banda que pode ser usado para a caracterização de transdutores. A configuração básica do método pode ser vista na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Configuração básica do método PLB.



Fonte: Elaboração do próprio autor

De acordo com a figura acima, o procedimento consiste em obter o sinal de tensão proveniente do transdutor instalado na estrutura, utilizando um dispositivo de aquisição de dados, DAQ (*Data Acquisition*), enquanto ocorre a quebra do grafite. Assim, pode-se processar e analisar o sinal obtido. A análise é geralmente feita no domínio da frequência. Neste trabalho, realizou-se a análise no domínio da frequência utilizando a PSD.

O comprimento e diâmetro do grafite, bem como o ângulo de quebra mudam a força de ruptura e, conseqüentemente, os resultados, como foi analisado por Sause (2011). Por isso, esses fatores devem ser levados em consideração para obtenção de uma boa reprodutibilidade.

Devido a sua implementação simples e popularidade nos laboratórios, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) adotou o método PLB como padrão, E976 (*Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response*, ASTM Standard E976-10, 2010.).

Neste trabalho, foram avaliadas a viabilidade e eficiência do método PLB para estimar a sensibilidade dos transdutores piezelétricos na detecção de dano baseada na técnica da impedância E/M.

Capítulo 3

Metodologia

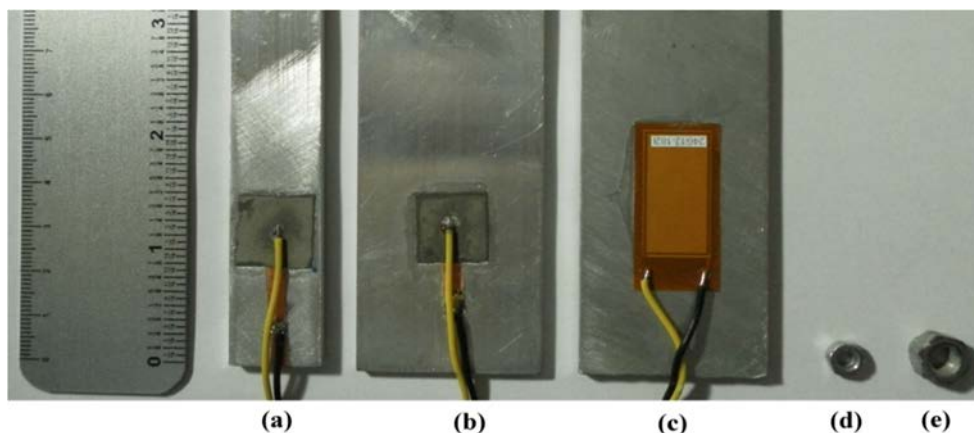
3.1. Metodologia da Técnica da Impedância E/M

Com o objetivo de confirmar toda a teoria apresentada, os testes experimentais foram realizados em três barras de alumínio de diferentes tipos. Uma das barras era mais estreita, com um comprimento de 500 mm, espessura de 3,18 mm e largura de 19,05 mm. As outras duas utilizadas possuem o mesmo comprimento e espessura, porém uma largura de 38,10 mm.

A cerâmica de PZT utilizada foi a do tipo 5H com dimensões de 15 x 15 x 0,267 mm. Para o transdutor MFC foi escolhido o modelo M2814-P2 fornecido pela Smart Material (SMART MATERIAL, 2015) de dimensões 37 x 18 mm, com efeito d_{31} , e elemento ativo de dimensões 28 mm x 14 mm, o qual também foi avaliado e fixado em uma das barras citadas acima. O MFC, com o efeito d_{31} , foi escolhido por este possuir um modo de vibração similar ao apresentado pelas cerâmicas PZT utilizadas em aplicações da técnica da impedância E/M. As barras foram apoiadas sobre uma mesa através de pequenos blocos de borracha para minimizar os efeitos de eventuais vibrações externas. Tanto a cerâmica de PZT quanto o MFC foram fixados a 20 mm de distância de uma das extremidades de cada barra de alumínio. Ainda, o diafragma piezoelétrico (*buzzer*) também foi utilizado, o qual possui um diâmetro externo de 27 mm.

Danos estruturais foram induzidos nas barras através de adição de massa, que consistiu em fixar duas pequenas porcas de parafuso de aço. Uma, de menor tamanho, com dimensões de 5 mm x 2 mm e massa de 0,312 g, a qual resultou em um carregamento de massa de 0,35% na barra de alumínio mais estreita. Já a outra, de um tamanho maior, com dimensões de 8 mm x 4 mm e massa de 0,988 g, resultou num carregamento de massa de 0,55% na barra de alumínio mais larga. A adição de massa altera a impedância mecânica da estrutura, podendo ser relacionada a um dano estrutural. Esse procedimento tem a vantagem de não causar dano permanente na estrutura. Os transdutores, fixados nas barras, bem como as porcas, podem ser vistos na Figura 3.1.

Figura 3.1 - (a) barra estreita e (b) barra larga com a cerâmica de PZT, (c) barra larga com o transdutor MFC, (d) porca de aço pequena e (e) porca grande.

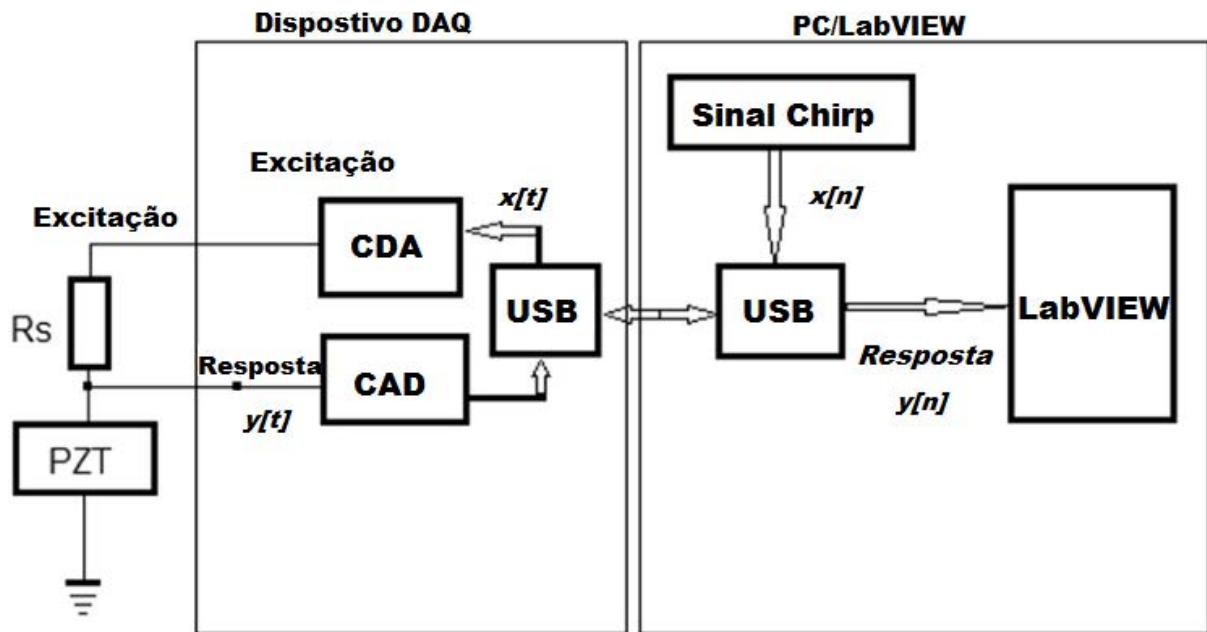


Fonte: Elaboração do próprio autor

A impedância elétrica dos transdutores foi medida através de um sistema desenvolvido por Baptista e Vieira Filho (2009), o qual consiste em um dispositivo de aquisição de dados (DAQ – *Data Acquisition*) multifuncional, controlado por LabVIEW, e um computador pessoal. O dispositivo DAQ utilizado foi o modelo NI USB-6361 da *National Instruments*, o qual foi configurado para uma taxa de amostragem de 2 MS/s (*mega-samples/second* – amostras/segundo) e resolução de 16 bits. O transdutor piezelétrico foi excitado com um sinal *chirp* com amplitude de 1 V. O sistema de medição foi ajustado para gerar as assinaturas de impedância elétrica na faixa de frequência de 0-500 kHz, com passo de 2 Hz.

A Figura 3.2 apresenta um esquema do sistema de aquisição, juntamente com o transdutor, DAQ e PC, no qual foi utilizado o *software* LabVIEW. No diagrama, a partir da FRF e levando-se em consideração os parâmetros do circuito, obtém-se com precisão a impedância do transdutor. O software de controle e operação foi desenvolvido em LabVIEW. A conexão entre o dispositivo e o PC é feita através de um porta USB, proporcionando uma melhor versatilidade para o sistema. O dispositivo DAQ é multifuncional, pois permite tanto a aquisição de sinal de resposta através do CAD (Conversor Analógico-Digital), como também a geração do sinal de excitação através do CDA (Conversor Digital-Analógico). O CAD tem entrada diferencial que oferece uma boa imunidade ao ruído e permite a aquisição de sinais de pequena amplitude. O sinal de excitação é gerado por software e, além de permitir a escolha entre uma ampla variedade de sinais, evita que este precise ser reamostrado.

Figura 3.2 – Esquema do sistema de aquisição de dados e medição de impedância: transdutor de PZT, dispositivo DAQ e PC.



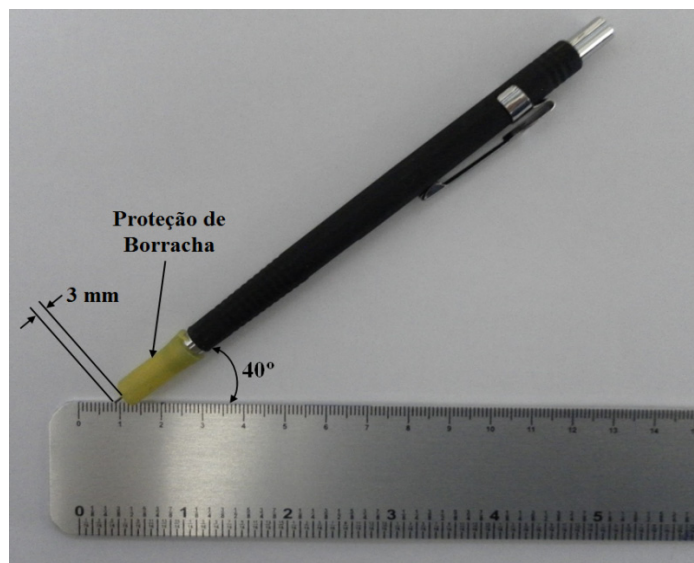
Fonte: Elaboração do próprio autor

A comparação da sensibilidade dos diferentes transdutores, para a detecção do dano estrutural, foi feita através dos índices RMSD e CCDDM.

3.2. Metodologia do Método PLB

Para o método da quebra do grafite (PLB), testes foram realizados utilizando uma lapiseira comum, com grafite de 0,5 mm de diâmetro, comprimento de 3 mm e ângulo de contato, entre o grafite e a barra, de 40°, para todos os testes. O grafite foi quebrado a uma distância de 100 mm do sensor de PZT, que é a mesma distância de posicionamento da massa (porca) para a indução de dano estrutural. De acordo com a norma padrão E976 da ASTM International (ASTM E976-10, 2010), um anel de Teflon deveria ser colocado na lapiseira para promover uma quebra mais consistente. Entretanto, neste estudo, substituiu-se o anel por uma proteção de borracha, a qual é utilizada na proteção de bicos de sugadores de solda. Na Figura 3.3 pode-se visualizar o que foi apresentado.

Figura 3.3 - Lapiseira utilizada nos experimentos de quebra do grafite, bem como o diâmetro e comprimento do grafite e ângulo de quebra.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os resultados mostraram que essa configuração adotada forneceu sinais consistentes e reproduzíveis. O sinal de tensão obtido do método PLB foi adquirido utilizando o dispositivo DAQ, no qual a taxa de amostragem foi de 2 MS/s. Um filtro passivo RC de antialiasing, com frequência de corte de 584 kHz, foi implementado conforme o diagrama apresentado na Figura 2.4. Tal configuração permitiu dados reproduzíveis e confiáveis até a frequência de 250 kHz. Todas as medidas foram obtidas à temperatura ambiente. Ainda, as barras de alumínio foram colocadas sob um bloco de espuma.

A efetividade do método PLB para avaliar a sensibilidade da pastilha de PZT para a detecção de dano estrutural foi analisada comparando a PSD, obtida por meio do método PLB, com a variação das assinaturas de impedância elétrica através dos índices RMSD e CCDDM.

As assinaturas de impedância foram obtidas, utilizando o sistema de medição com a mesma configuração apresentada na Seção 3.1.

Os resultados experimentais são apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 4

Resultados

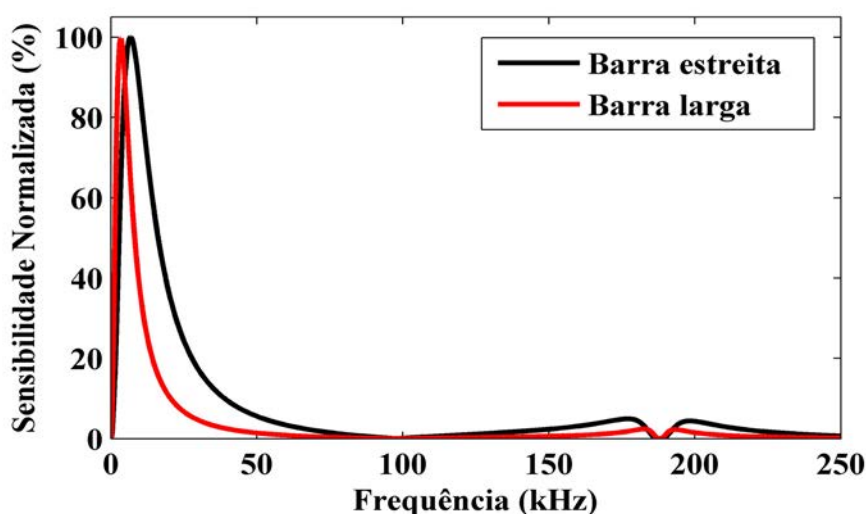
4.1. Sensibilidade Teórica do Transdutor de PZT

A estimação teórica da sensibilidade do transdutor de PZT na detecção de dano estrutural foi baseada no modelo unidimensional eletromecânico apresentado no Capítulo 2. De acordo com esse modelo, a sensibilidade do transdutor de PZT depende do tamanho e das propriedades do material (tanto do transdutor, quanto da estrutura a ser monitorada). Portanto, deve-se calcular a sensibilidade do transdutor para cada um dos tipos a ser testado (barra de alumínio estreita e larga). As propriedades da cerâmica de PZT 5H da Piezo Systems (PIEZO SYSTEMS, 2015) e do alumínio utilizado neste estudo são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 PROPRIEDADES DA CERÂMICA PZT 5H E DO ALUMÍNIO		
Cerâmica PZT 5H		
Constante Piezelétrica (d_{31})		-320×10^{-12} m/V
Elasticidade (s_{11})		$16,1 \times 10^{-12}$ m ² /N
Capacitância Estática (C_0)		26,2 nF
Densidade (ρ_T)		7800 kg/m ³
Alumínio		
Elasticidade (s_s)		$13,6 \times 10^{-12}$ m ² /N
Densidade (ρ_s)		2700 kg/m ³

Substituindo os valores na Tabela 1 e as dimensões do transdutor de PZT nas Equações (2.10) e (2.17), pode-se obter o valor da sensibilidade $\eta(\omega)$, na Equação (2.18), como uma função da frequência para as barras de alumínio estreita e larga. Os resultados são mostrados na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Sensibilidade teórica dos transdutores de PZT fixados nas barras estreita e larga.



Fonte: Dados do próprio autor

A sensibilidade teórica, mostrada na Figura 4.1, foi obtida para uma variação $\Delta = 1\%$ da impedância mecânica da estrutura (Z_s) na Equação (2.17), sendo os valores normalizados por um ajuste de $\eta = 100\%$ como a máxima sensibilidade. Um valor baixo foi escolhido para a variação Δ porque, normalmente, em estruturas reais, os danos causam pequenas variações na impedância mecânica da estrutura.

De acordo com os resultados, a sensibilidade do transdutor de PZT para a detecção do dano possui pontos de mínimos e máximos, ao longo de toda a faixa de frequência, na qual os valores de máximo tendem a decair com o aumento da frequência. Porém, o transdutor tem uma alta sensibilidade para baixas frequências, principalmente na faixa de 2 – 40 kHz, na qual o máximo global ocorre. A sensibilidade é menor que 10% da sensibilidade máxima global, para frequências acima de, aproximadamente, 40 kHz para a barra de alumínio estreita e, aproximadamente, 20 kHz para a barra de alumínio larga.

Embora os transdutores de PZT fixados nas barras estreita e larga apresentem, praticamente, a mesma sensibilidade máxima de 100 %, para frequências de 6,7 kHz e 3,3 kHz, respectivamente, o transdutor fixado na barra larga apresenta, no geral, uma sensibilidade mais baixa ao longo de toda a faixa de frequência. Dessa forma, é esperado que a sensibilidade do transdutor diminua com o aumento da frequência e tamanho da estrutura, como previamente demonstrado no trabalho de Baptista e Viera Filho (2010).

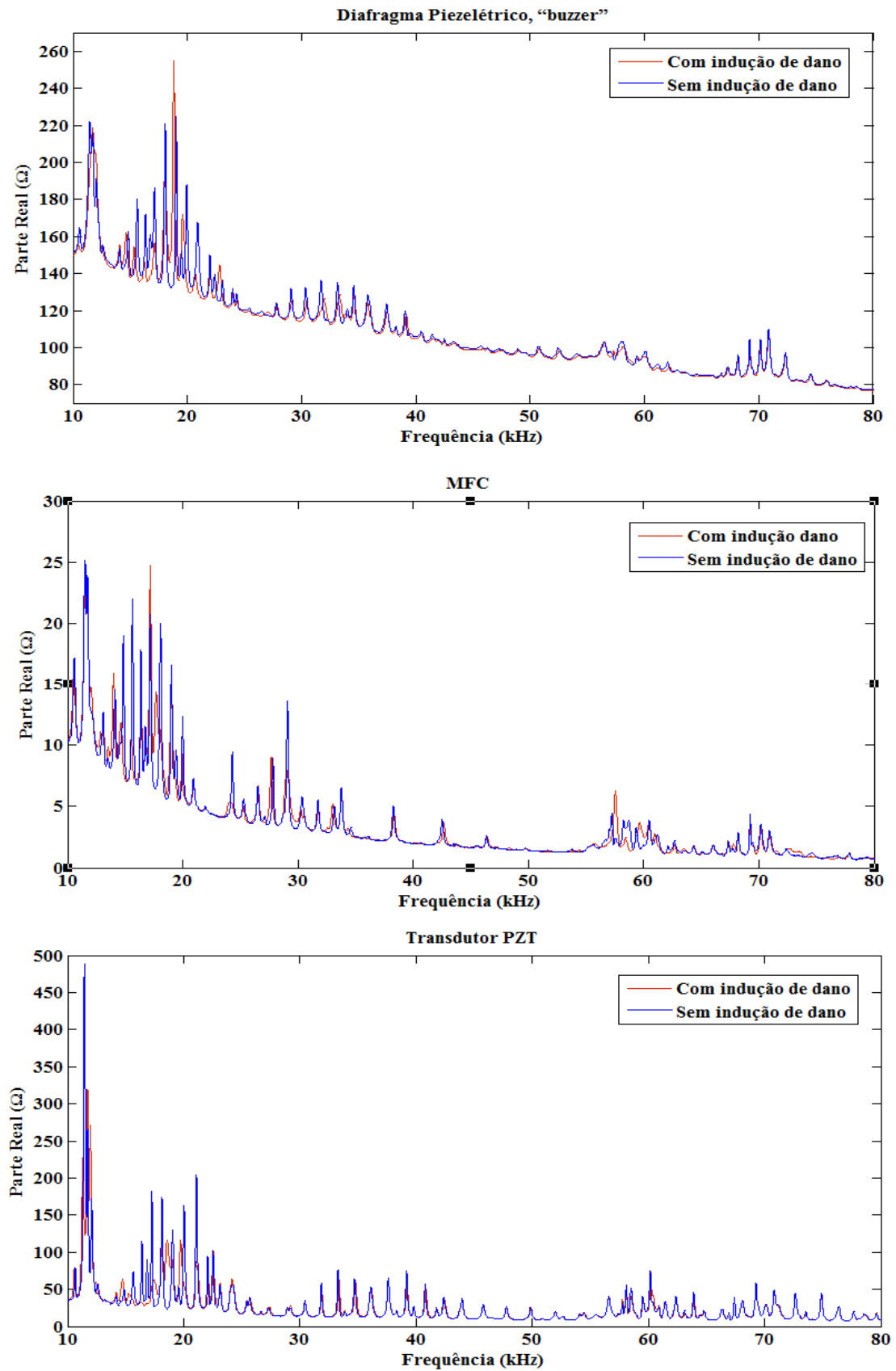
Neste estudo comparou-se a sensibilidade teórica dos transdutores com os sinais experimentais obtidos com o método PLB por meio da PSD, para avaliar a efetividade deste na caracterização de transdutores piezelétricos aplicados a técnica da impedância E/M.

4.2. Comparação Inicial entre os Transdutores

Conforme já mencionado anteriormente, a detecção do dano pode ser realizada utilizando o valor absoluto, a parte real ou parte imaginária da impedância elétrica. Neste trabalho foi utilizada a parte real que, como já mencionado, é conhecida na literatura como a que apresenta maior sensibilidade ao dano e menor sensibilidade às variações de temperatura. A parte real das assinaturas da impedância elétrica dos três transdutores é apresentada na Figura 4.2. Embora as assinaturas tenham sido obtidas na faixa de frequência entre 0-500 kHz, uma faixa mais estreita é mostrada para permitir uma boa análise, pois os picos são melhores observados em baixas frequências e tendem a decair com o aumento da frequência.

De acordo com a Figura 4.2, temos picos de ressonância nas assinaturas relacionadas com as frequências naturais da estrutura. O dano estrutural, induzido com as porcas de aço, causou variações na frequência e amplitude dos picos, os quais podem ser detectados e quantificados por índices de dano. O transdutor de PZT foi o que melhor apresentou assinaturas de impedância com amplitude alta. Já o dispositivo MFC foi o que apresentou as assinaturas de impedância com as amplitudes mais baixas. O diafragma piezelétrico apresentou assinaturas com amplitude intermediária, quando comparado com os outros transdutores.

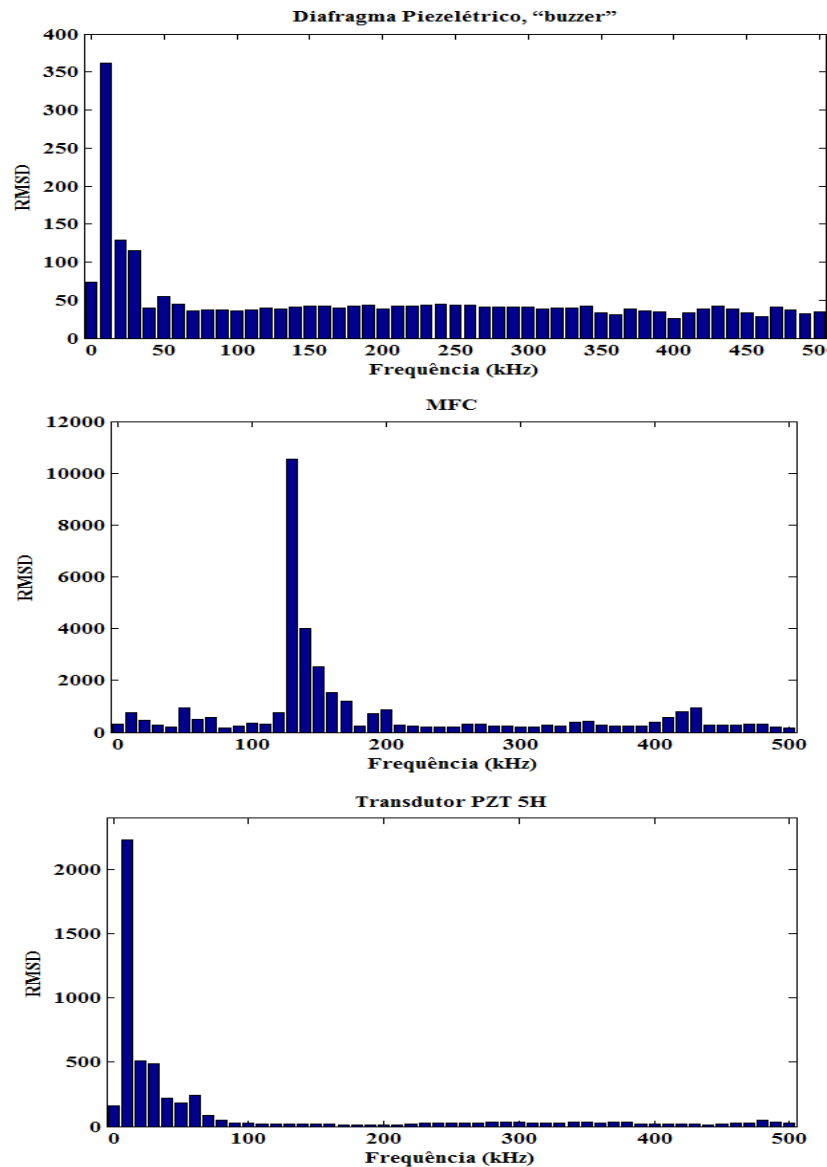
Figura 4.2 - Parte real das assinaturas da impedância elétrica, para cada transdutor.



Fonte: Dados da pesquisa do autor

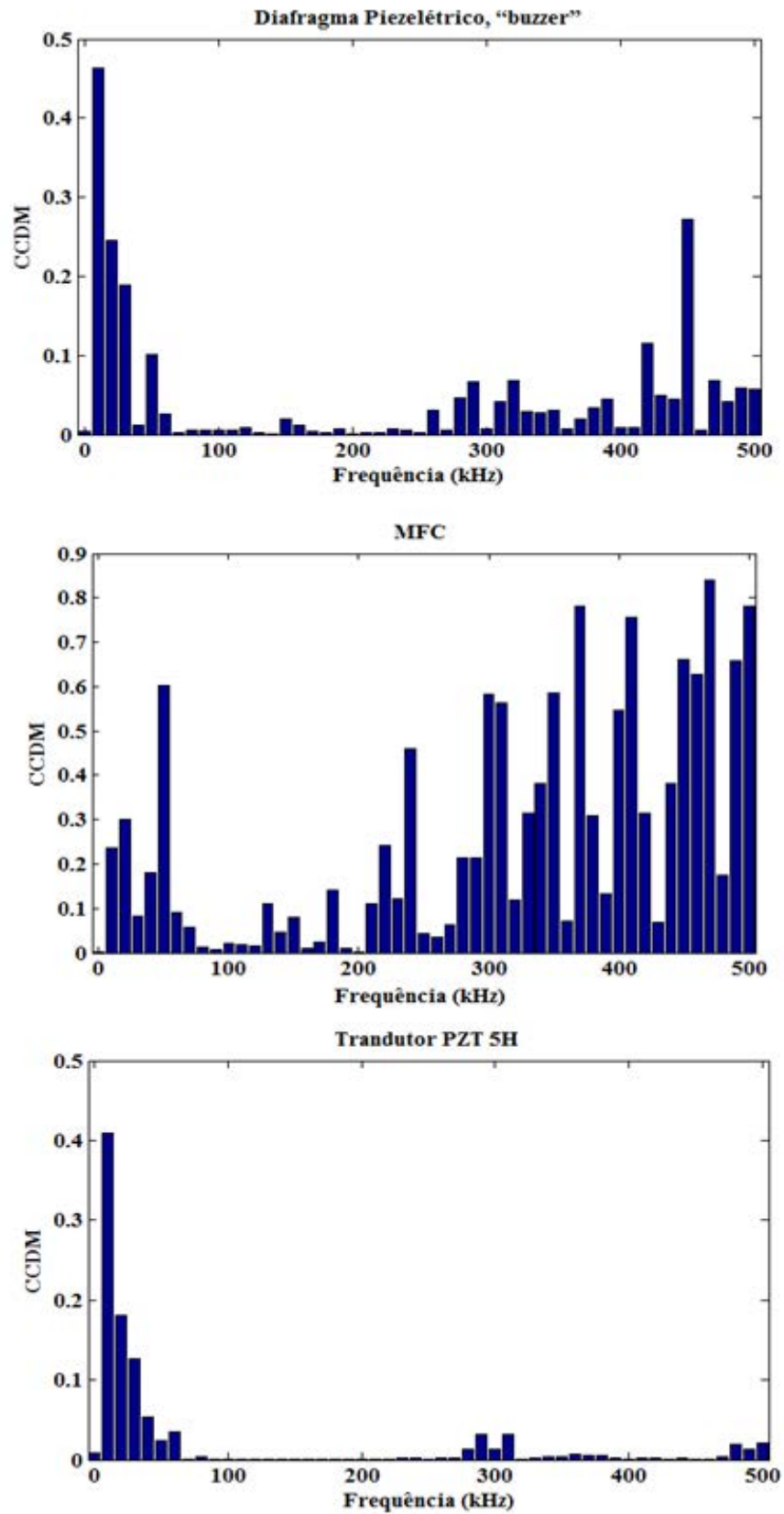
As variações nas assinaturas da impedância elétrica devido ao dano estrutural podem ser melhor comparadas e quantificadas utilizando-se os índices RMSD e CCDM. Os índices foram calculados na faixa de frequência de 0-500 kHz, com sub-bandas de 10 kHz. Na Figura 4.3 temos os índices RMSD e na Figura 4.4 os índices CCDM obtidos para os três transdutores. Da análise de ambas, temos que o transdutor de PZT e o *buzzer* apresentaram os maiores índices para baixas frequências, em torno de aproximadamente 10-70 kHz. Em contrapartida, o dispositivo MFC apresentou os maiores índices para altas frequências. O *buzzer* apresentou uma sensibilidade moderada para a detecção de dano, sendo os índices inferiores em relação aos outros transdutores na maioria das sub-bandas. Porém, esse transdutor tem a vantagem de possuir um preço muito baixo e ser facilmente encontrado.

Figura 4.3 - Índices RMSD, para cada transdutor.



Fonte: Dados do próprio autor

Figura4.4 - Índices CCDM, para cada transdutor.



Fonte: Dados do próprio autor

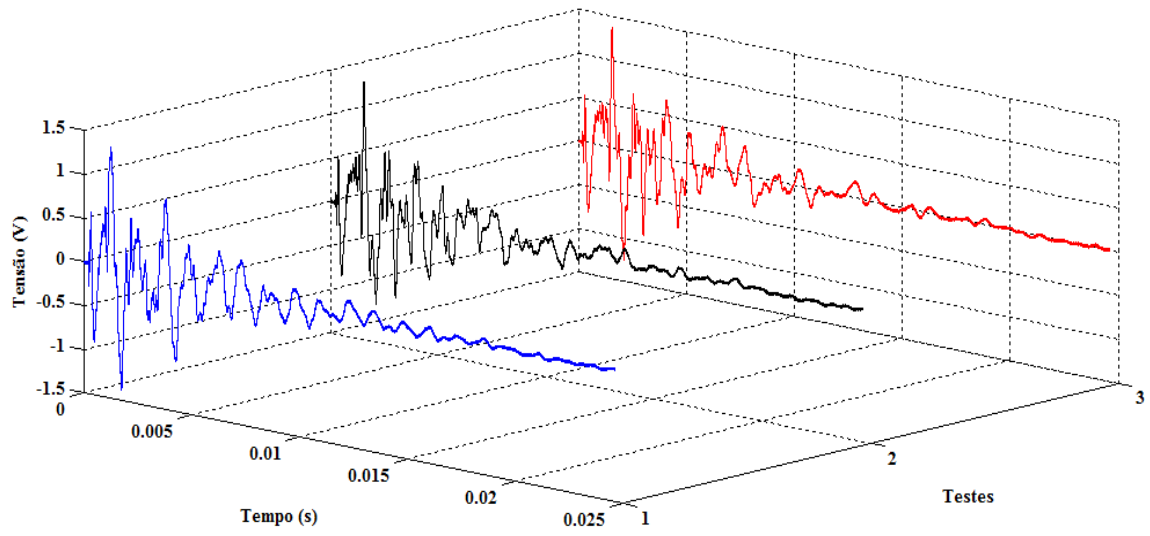
4.3. Reprodutibilidade do Método da Quebra do Grafite (PLB)

O método PLB é um método padrão para o fornecimento de fontes reprodutíveis de EA, o qual é usado para caracterização e calibração de sensores de EA. Apesar de ser muito popular em EA, não é um método muito utilizado em outras aplicações, tais como na técnica da impedância E/M. Ainda temos pouquíssimas informações na literatura sobre a eficiência do método PLB em aplicações da impedância E/M.

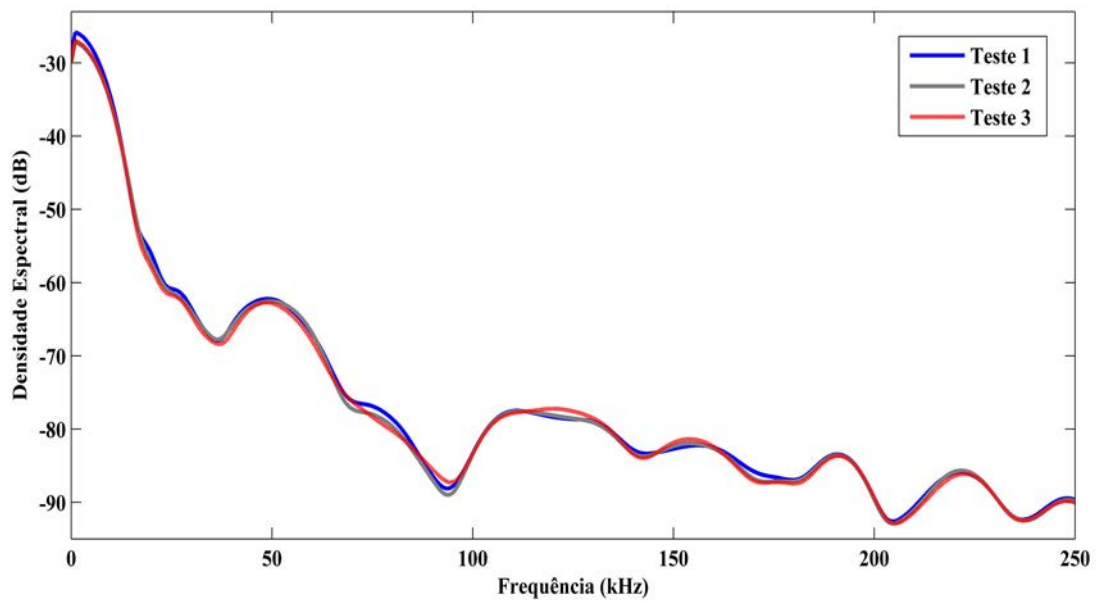
É importante analisar a reprodutibilidade do método PLB aplicado à técnica da impedância E/M, dentro das condições experimentais deste estudo. Como já mencionado, foi feita uma substituição do anel de Nielsen, previsto na norma padrão, por um protetor de borracha, fato que pode influenciar na reprodutibilidade dos resultados. Os testes de reprodutibilidade foram realizados na barra de alumínio estreita e com os transdutores de PZT e MFC, que são os dois tipos tradicionalmente utilizados na técnica da impedância E/M, mediante as condições apresentadas no Capítulo 3.

Os sinais de tensão e PSD obtidos de três medições para os transdutores de PZT e MFC são apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente. Os sinais de tensão no domínio do tempo apresentados na Fig. 4.5 (a) e Fig. 4.6 (a) foram adquiridos diretamente do sensor de PZT e dispositivo MFC, respectivamente, no instante em que o grafite foi quebrado, mediante o procedimento apresentado no Capítulo 3. Os sinais de tensão obtidos dos sensores foram usados no cálculo dos sinais correspondentes de PSD e são apresentados nas Fig. 4.5 (b) e Fig. 4.6 (b). A PSD foi calculada utilizando-se o método Welch (Welch, 1967) com uma janela Hanning de 256 amostras e sobreposição de 50%.

Figura 4.5 - (a) Sinal Tensão e (b) PSD, obtidos da cerâmica de PZT.



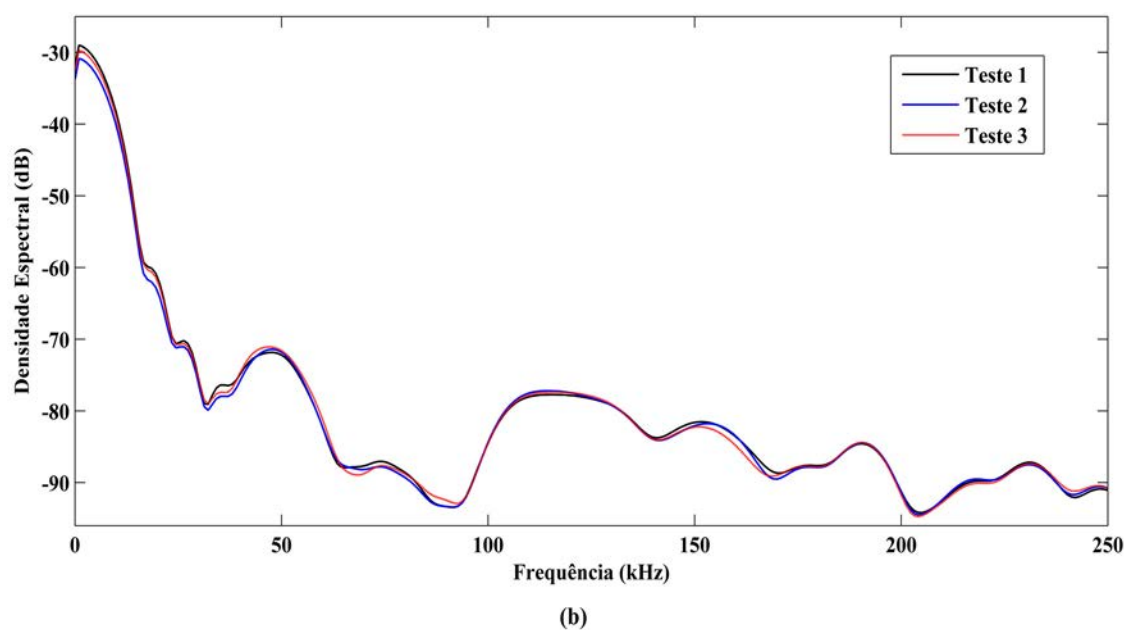
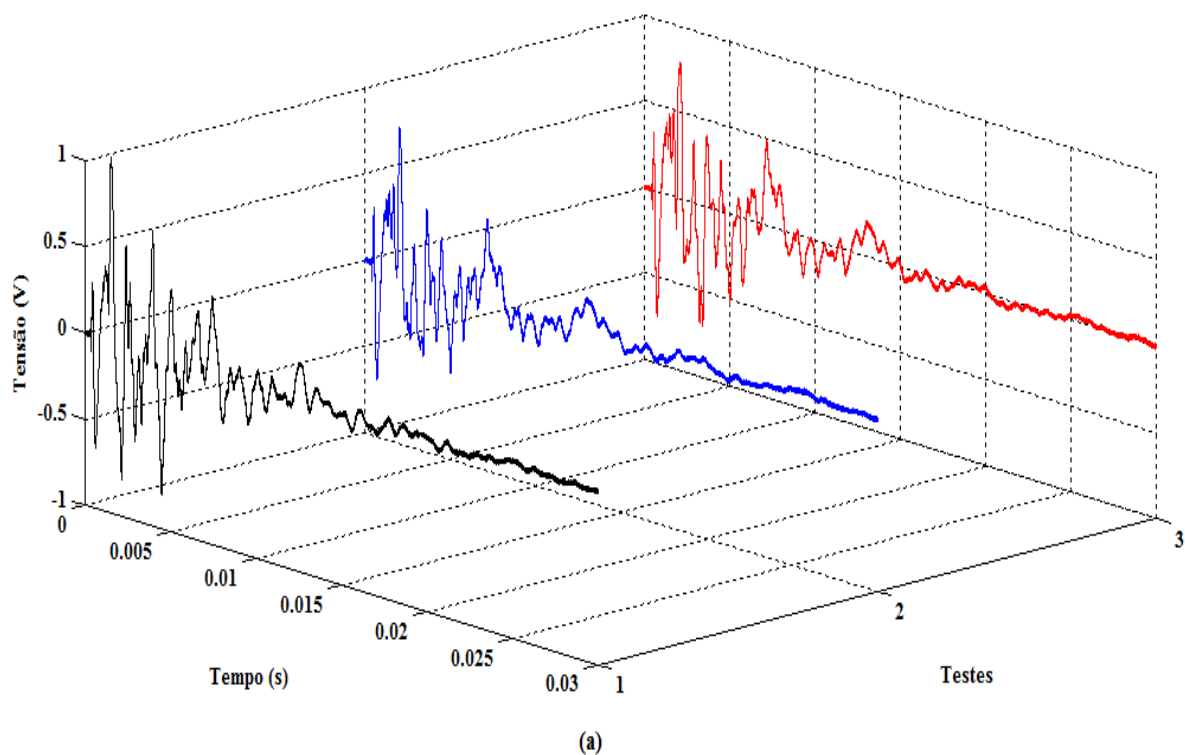
(a)



(b)

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Figura 4.6 - (a) Sinal de Tensão e (b) PSD, obtidos do dispositivo MFC.



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Dessa maneira, os resultados mostraram uma boa consistência entre as três medições. Observamos variações na amplitude das PSDs, obtidas usando os dois transdutores, mas as

tendências das PSDs, obtidas das três medições são muito próximas, indicando uma boa reprodutibilidade.

Apesar da boa reprodutibilidade, obtivemos os resultados seguintes pela média de três medidas, visando a uma boa consistência dos resultados. Ainda, todos os cuidados foram feitos para que o ângulo de quebra do grafite com a estrutura, o comprimento do grafite e a posição de quebra fossem, aproximadamente, as mesmas para todas as experimentações, embora pequenas variações nesses parâmetros serem inevitáveis.

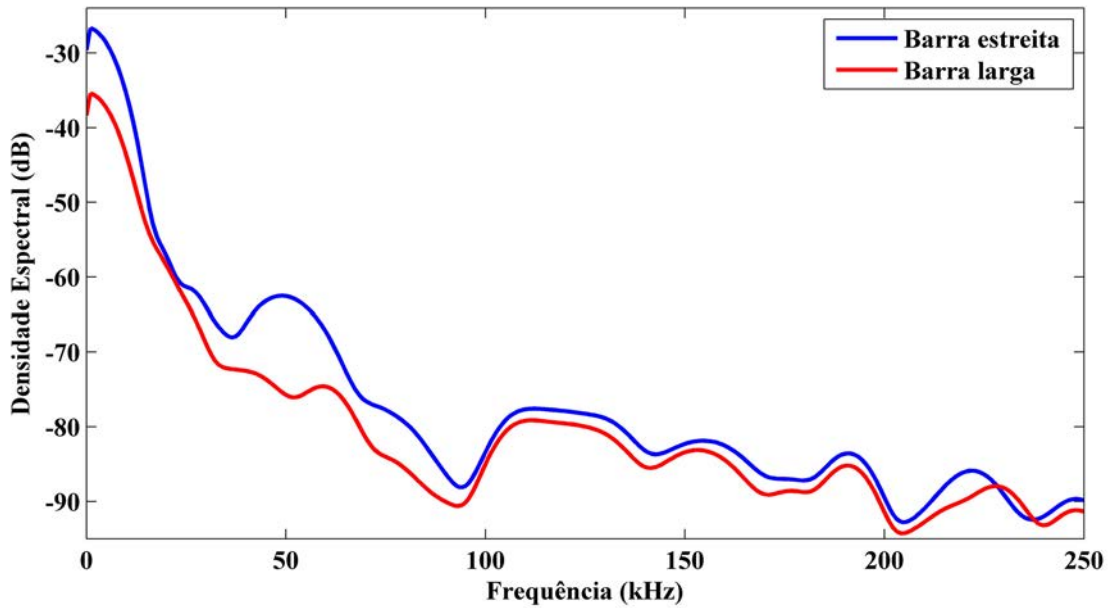
Portanto, conclui-se que os resultados experimentais apresentados nesta seção indicam que, apesar das mínimas variações, a metodologia utilizada foi confiável para a caracterização de transdutores piezelétricos em aplicações de monitoramento estrutural baseado no método da impedância E/M e promoveram uma boa reprodutibilidade.

4.4. Eficácia do Método da Quebra do Grafite (PLB) na impedância E/M

Nesta seção é feita uma análise do método PLB para, experimentalmente, estimar a sensibilidade do transdutor piezelétrico na detecção de dano estrutural baseada no princípio da impedância E/M.

Pode-se fazer uma análise das PSDs obtidas para as barras estreita e larga apresentadas na Figura 4.7. Nela, as PSDs, obtidas experimentalmente pelo método da quebra do grafite, seguem uma tendência similar à da sensibilidade teórica, a qual foi apresentada na Figura 4.1. Assim como na sensibilidade teórica, a PSD é maior para baixas frequências. Se a frequência aumenta, a PSD tende a decair. Com isso, tem-se o aparecimento de picos, os quais apesar de não corresponderem, exatamente, com as mesmas frequências dos picos da sensibilidade teórica, são bem próximos. Além disso, a PSD obtida do sensor de PZT fixado na barra estreita é maior quando comparada com a barra larga, fato já previsto pela teoria.

Figura 4.7 - Densidade espectral obtida utilizando o método PLB, no qual o transdutor foi fixado nas barras fina e larga.



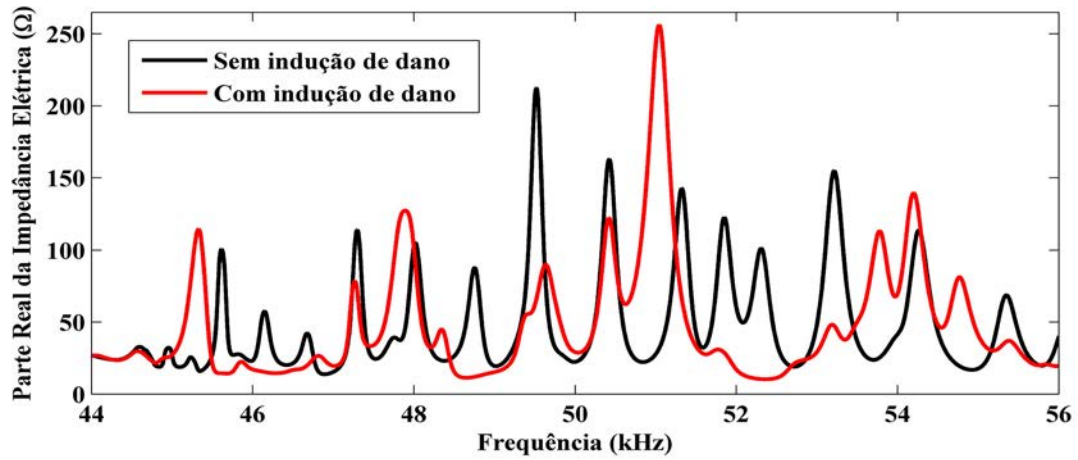
Fonte: Dados do próprio autor

Uma maneira melhor de avaliar a eficiência do método da quebra do grafite na impedância E/M é pela comparação da PSD com os índices RMSD e CCDM. Conforme já mencionado, os índices de dano foram calculados a partir da parte real das assinaturas de impedância elétrica.

Como um exemplo, as assinaturas obtidas do transdutor de PZT fixado na barra estreita sem a indução de dano (sem a porca de aço) e com a indução de dano (com a porca de aço) são apresentadas na Figura 4.8. Embora a impedância tenha sido medida na faixa de 0 a 250 kHz, somente uma faixa estreita foi apresentada para uma melhor comparação.

De acordo com a Figura 4.8, as alterações na impedância elétrica são causadas com o aparecimento do dano, o qual é detectado e quantificado por índices de dano. Para avaliar a variação dos índices com respeito à frequência, os índices RMSD e CCDM foram calculados utilizando-se as Equações (2.14) e (2.15), respectivamente, em sub-bandas de 10 kHz com uma frequência inicial (ω_l) variando de 0 a 240 kHz.

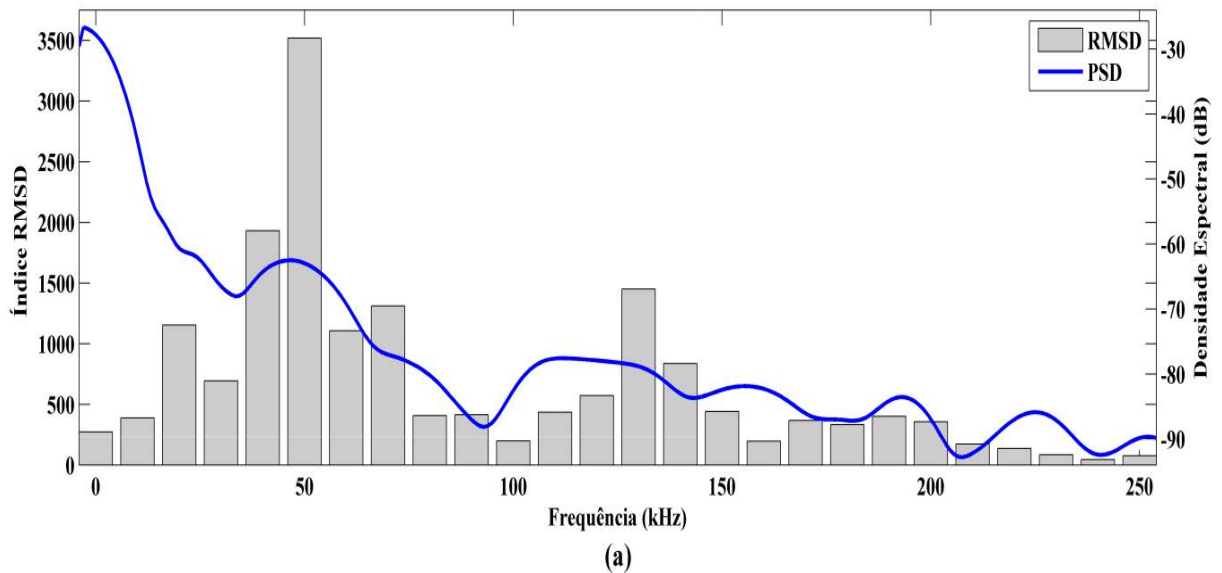
Figura 4.8 - Parte real da assinatura da impedância elétrica, com e sem indução de dano.

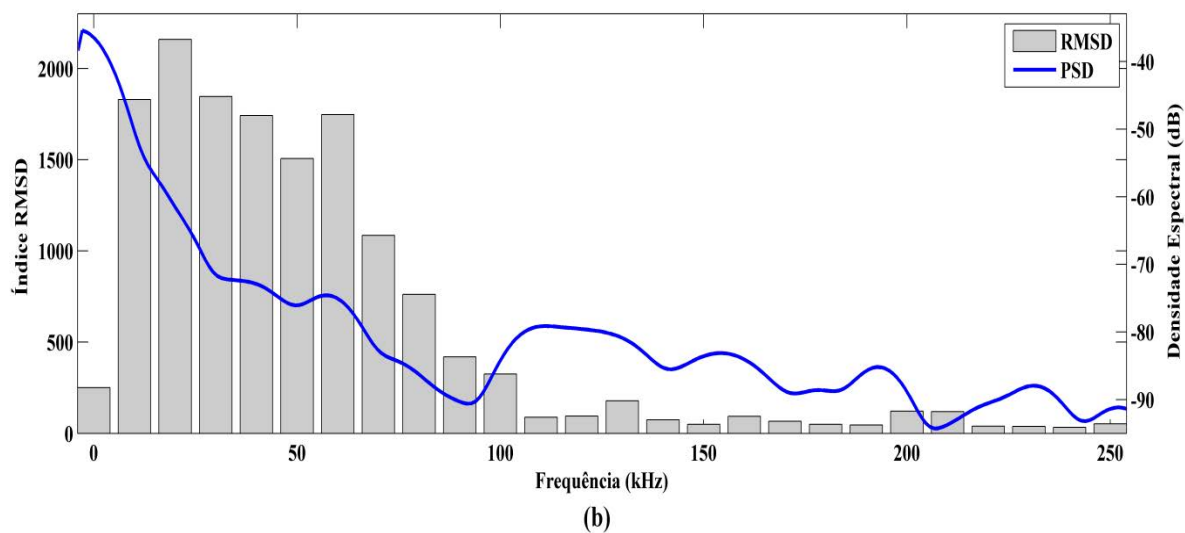


Fonte: Dados do próprio autor

A Figura 4.9 mostra uma comparação entre o índice RMSD e a PSD obtidos dos transdutores de PZT, fixados nas barras estreita e larga. Já na Figura 4.10, temos uma comparação entre os índices CCDM e a PSD.

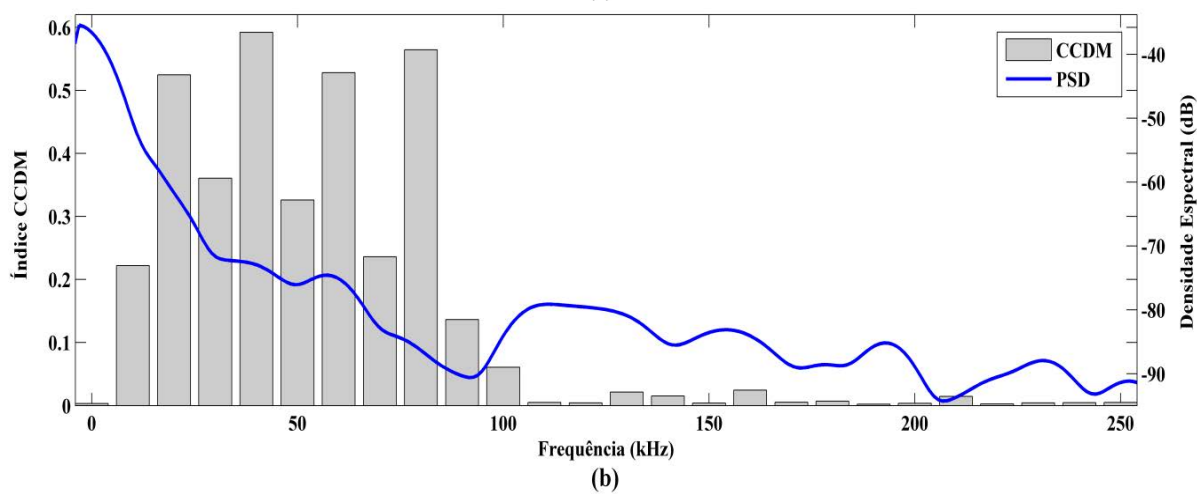
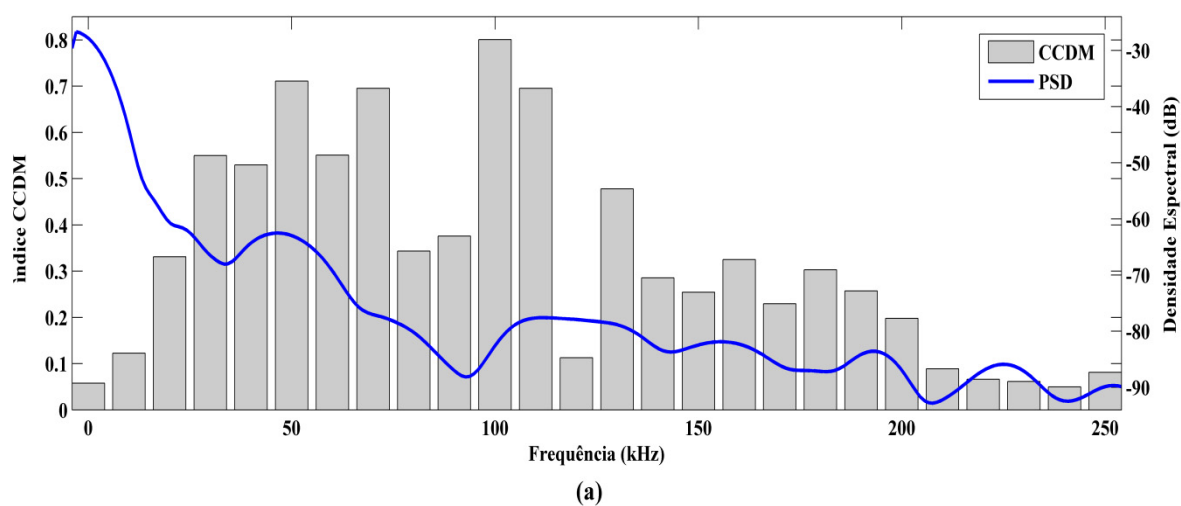
Figura 4.9 - Índice RMSD e PSD, obtidos dos transdutores PZT fixados nas barras (a) estreita e (b) larga.





Fonte: Dados da pesquisa do autor

Figura 4.10 - Índice CCDM e PSD obtidos a partir dos transdutores PZT fixados nas barras (a) estreita e (b) larga.



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Os resultados demonstraram uma boa relação das PSDs, obtidas pelo método PLB, e os índices de dano, obtidos das assinaturas da impedância elétrica, principalmente para a barra larga. Para ambos, PSD e índices de dano, os valores são significativamente maiores para baixas frequências e menores para frequências acima de, aproximadamente, 100 kHz. Frequências acima de 200 kHz apresentam valores significativamente menores. Portanto, os índices RMSD e CCDM apresentam uma tendência de decaimento com o aumento da frequência, similarmente à PSD. Além disso, os índices obtidos para a barra larga são, no geral, menores do que os obtidos para a barra estreita. Tal resultado está de acordo com as sensibilidades teóricas, apresentadas na Figura 4.1, e as PSDs, apresentadas na Figura 4.7, nas quais os valores obtidos para a barra larga são menores, mesmo com o nível de dano induzido ser maior (carregamento de massa de 0,55%).

O índice CCDM obtido a partir da barra estreita apresenta resultados discrepantes, quando comparado com a PSD, em que o máximo valor do índice ocorreu a, aproximadamente, 100 kHz, enquanto o máximo valor da PSD ocorre em baixa frequência. Também, ocorreram discrepâncias em baixas frequências. Embora a PSD tenha sido maior para baixas frequências (em torno de 0 Hz), os índices de dano são menores para frequências muito baixas. Porém, esse é um resultado esperado devido ao fato de, na técnica da impedância E/M, ser recomendado que o transdutor de PZT seja excitado com frequências superiores a 30 kHz, a fim de se monitorar as variações na impedância mecânica da estrutura (Park et. al., 2003).

Portanto, apesar de algumas discrepâncias, os resultados indicaram que a PSD, obtida pelo método PLB, pode ser uma boa ferramenta para avaliar a sensibilidade de transdutores piezelétricos para a detecção de dano estrutural, baseada na técnica da impedância E/M.

Além de comparar os resultados de diferentes estruturas, é de grande importância comparar os resultados de diferentes transdutores. Conforme mencionado anteriormente, neste estudo, também foi avaliado o transdutor MFC, o qual está sendo, atualmente, largamente utilizado em sistemas de monitoramento estrutural baseados na impedância E/M (Faria et. al., 2014), devido a sua flexibilidade, durabilidade e confiança. Na Figura 4.11 (a) apresenta-se uma comparação entre a PSD, obtida do transdutor de PZT, e do dispositivo MFC utilizando o método da quebra do grafite. Para essa análise, ambos os transdutores foram fixados na barra larga.

A diferença da PSD entre o dispositivo MFC e o transdutor de PZT é apresentada na Figura 4.11 (b), a qual indica que a PSD obtida do dispositivo MFC é significativamente

menor que a PSD obtida do transdutor de PZT para, praticamente, todas as frequências na faixa abaixo de 100 kHz. Por exemplo, em 23,4 kHz, a diferença entre as PSDs é de -12,5 dB. No entanto, a PSD obtida do dispositivo MFC é maior, quando comparada com o transdutor de PZT, para praticamente todas as faixas de frequência acima de 100 kHz. A máxima diferença entre as PSDs é de 3 dB e ocorre em 237,3 kHz.

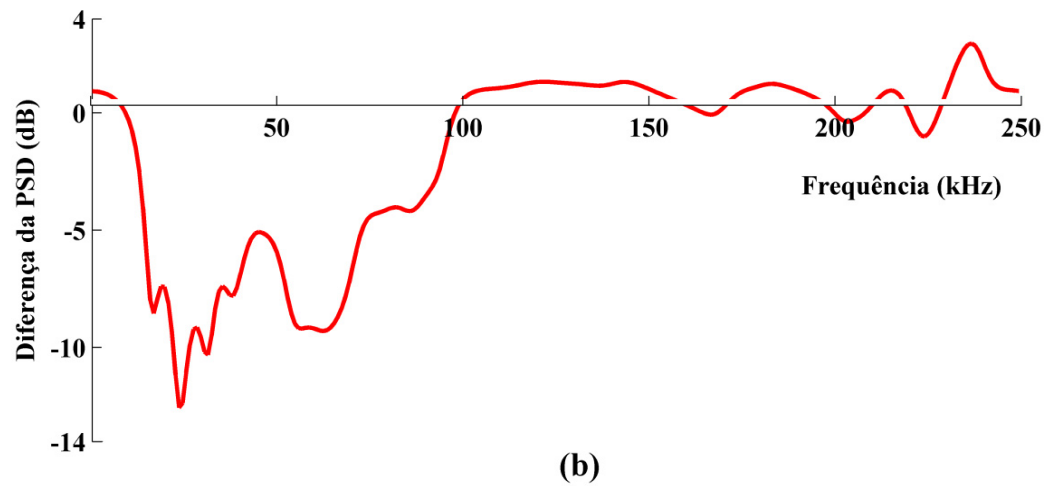
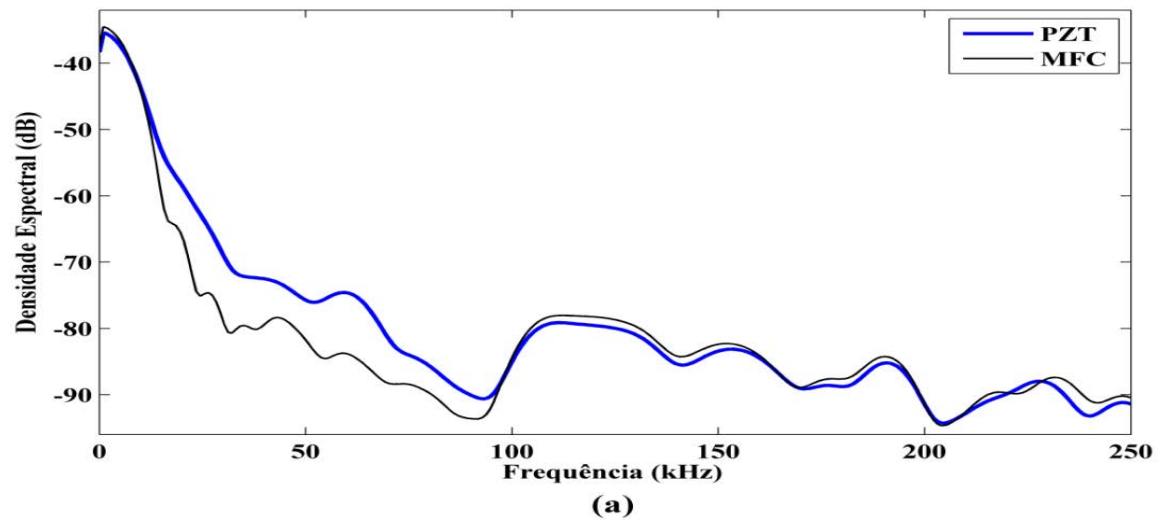
Similarmente ao caso anterior, a efetividade do método da quebra do grafite na avaliação da sensibilidade de diferentes transdutores na detecção de dano estrutural pode ser analisada pela comparação das densidades espectrais com os índices de dano. Os índices RMSD e CCDM, obtidos para os dois transdutores, são apresentados na Figura 4.12, a qual mostra, também, a diferença nos índices entre os dois tipos de transdutores. O dano foi induzido na estrutura utilizando o procedimento já descrito no Capítulo 3.

Para ambos os índices apresentados na Figura 4.12, foi observada uma boa relação com a PSD obtida pelo método da quebra do grafite. Analisando a diferença dos índices entre os transdutores (linhas na Figura 4.12), nota-se que o transdutor MFC forneceu menores índices para frequências abaixo de, aproximadamente, 100 kHz. Por outro lado, o transdutor MFC forneceu índices maiores para frequências acima desse valor.

Portanto, existe uma boa relação entre esses resultados e a diferença das PSDs, obtidas pelo método PLB, apresentada na Figura 4.11 (b). Os resultados foram, particularmente, satisfatórios para o índice CCDM. A máxima diferença do índice CCDM entre os dois transdutores ocorreu para a sub-banda em, aproximadamente, 240 kHz, a qual é próxima da frequência em que a máxima diferença entre as PSDs, de 3 dB, ocorre a 237,3 kHz.

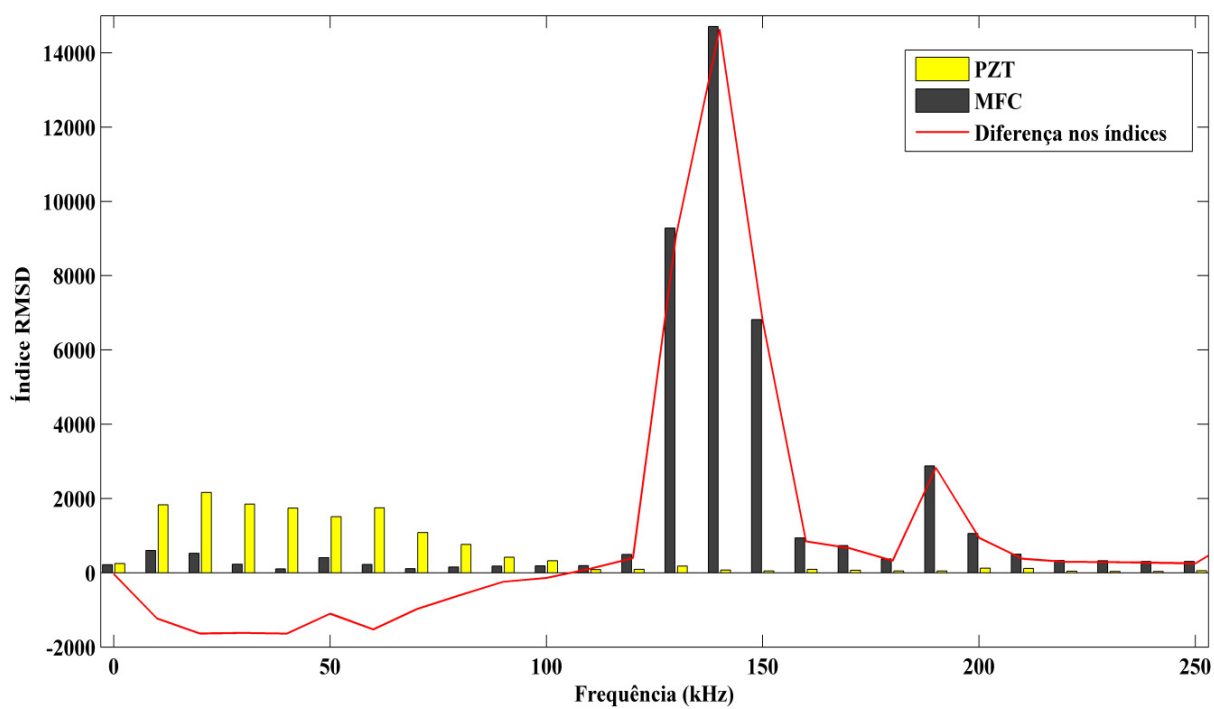
Dessa maneira, os resultados apresentados neste capítulo indicaram ser viável a utilização do método da quebra do grafite para a estimação da sensibilidade de transdutores piezelétricos para a detecção de dano estrutural baseada na técnica da impedância E/M.

Figura 4.11 - (a) PSDs obtidas para o transdutor de PZT e dispositivo MFC e (b) diferença das PSDs entre o dispositivo MFC e o transdutor PZT.

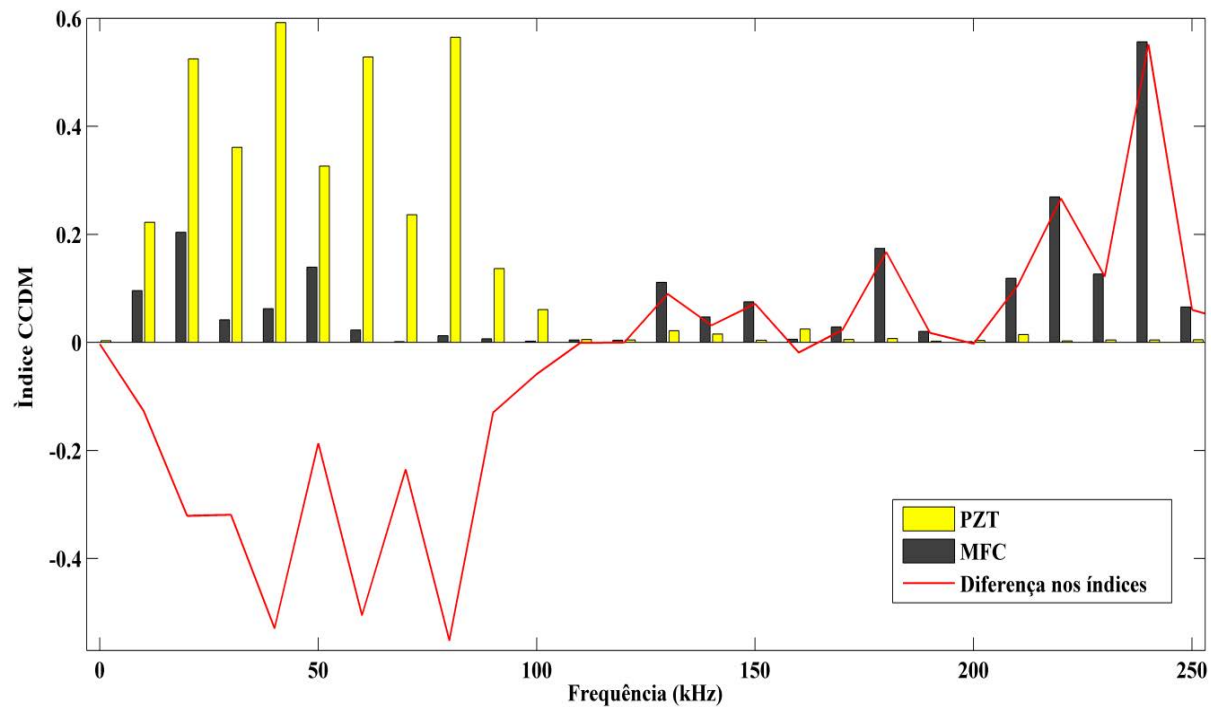


Fonte: Dados da pesquisa do autor

Figura 4.12 - (a) Índice RMSD e (b) Índice CCDM, obtidos utilizando o transdutor de PZT e o dispositivo MFC. A linha contínua indica a diferença dos índices entre os dois transdutores.



(a)



(b)

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Capítulo 5

Considerações Finais

O objetivo deste trabalho foi comparar a sensibilidade de diferentes tipos de transdutores piezelétricos na detecção de dano em sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM) baseados na técnica da impedância eletromecânica (E/M) e propor o uso do método da quebra do grafite (PLB), o qual é comumente utilizado em aplicações de emissão acústica, para estimar experimentalmente essa sensibilidade.

Testes foram realizados em barras de alumínio de tamanhos diferentes e três tipos de transdutores foram analisados: cerâmica de PZT, dispositivo MFC e diafragma piezelétrico (*buzzer*). Os resultados experimentais indicaram que os tradutores possuem sensibilidades diferentes para a detecção de dano, as quais também dependem da faixa de frequência. Uma observação importante pode ser feita em relação ao *buzzer*, o qual apresentou-se como uma excelente opção, mostrando uma sensibilidade moderada, porém com um custo bem menor do que os demais transdutores.

De acordo com os resultados, há uma boa relação entre a densidade espectral de potência (PSD), obtida pelo método PLB, e os índices de dano, computados a partir das assinaturas da impedância elétrica. Consequentemente, esse método permite uma estimativa experimental das faixas de frequências nas quais o transdutor é mais sensível e uma comparação das sensibilidades entre diferentes transdutores, os quais podem ser selecionados para cada tipo específico de aplicação.

Portanto, conclui-se, baseando-se nos resultados apresentados no Capítulo 4, que o método da quebra do grafite pode ser uma ferramenta simples e eficiente para avaliar experimentalmente a sensibilidade de transdutores piezelétricos na detecção de dano em sistemas baseados na técnica da impedância E/M.

Referências Bibliográficas

- BAPTISTA, F. G. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica**. Tese de Doutorado, Ilha Solteira, 2010.
- 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. 2014, no. 1, pp. 1208–1227, Jan. 2014.
- BAPTISTA F. G.; VIEIRA FILHO J. **A new impedance measurement system for PZT based structural health monitoring**. *IEEE Trans. Instrum. Measur*, v. 58, no.10, pp. 3602–3608, Oct. 2009.
- BAPTISTA F. G.; VIEIRA FILHO J. **Optimal frequency range selection for PZT transducers in impedance-based SHM systems**. *IEEE Sensors Journal*, v.10, no. 8, pp. 1297–1303, Aug. 2010.
- 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*, v.12, no. 1, pp. 14–22, Jan. 2013.
- CUI L. et al. **Macro-Fiber Composite–Based Structural Health Monitoring System for Axial Cracks in Cylindrical Structures**. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v.25, No. 3, pp. 332–341, 2014.
- DUCHARNE B. et al. **Nonlinear Technique for Energy Exchange Optimization in Piezoelectric Actuators**. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v.28, No. 8, pp. 3941–3948, 2013.
- FARIA C. T.; OWEN R. B.; Inman D. J. **Macro-fiber composites performance under thermal cycling for impedance-based SHM applications**. *Proceedings of SPIE 9057, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2014*, San Diego, CA, pp. 905726_1-11, 2014.
- FAWWAZ T. ULABY. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. Pag. 188, 1ª edição, BOOKMAN, 2006.
- GIURGIUTIU V.; Rogers C. A. **Recent advancements in the electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE**. In *Proceedings of the Conference on Smart Structures and Integrated Systems*, San Diego, CA, pp. 536–547, Mar. 1998.
- HIGO, Y.; INABA H. **The General Problems of AE Sensors, Acoustic Emission: Current Practice and Future Directions**. ASTM STP 1077, Philadelphia, 1991.
- HSU N. N. Acoustic emissions simulator, **U.S. Patent 4 018 084 A.**, Abr. 19, 1977.

KAMAS T.; LIN B.; GIURGIUTIU V. **Analytical modeling of PWAS in-plane and out-of-plane electromechanical impedance spectroscopy (EMIS)**. In *Proceedings of SPIE 8692, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2013*, San Diego, CA, pp. 869227_1-13, 2013.

MEITZLER, A. H. et al. *IEEE standard on piezoelectricity: an american national standard*. New York: **IEEE-ANSI**, 66 p. (Std, 176), 1987.

MOUSSELMAL H.D. et al. **A multiaxial piezoelectric energy harvester**. In: *Proceedings of Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*, San Diego, San Diego: SPIE, 8688, 2013.

NA S.; LEE H.K. **A multi-sensing electromechanical impedance method for non-destructive evaluation of metallic structure**. *Smart Materials and Structure*, v. 22, no.9, 095011, pp. 1-8, Aug. 2013.

PARK S. et al. **An Outlier Analysis of MFC-Based Impedance Sensing Data for Wireless Structural Health Monitoring of Railroad Tracks**. *Engineering Structures*, v. 30, No. 10, pp. 2792-2799, 2008.

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, no. 6, pp. 451–463, Nov. 2003.

PIEZO SYSTEMS, INC. **Piezoceramic Materials & Properties**. Disponível em: <<http://www.piezo.com>>. Acessado em 23 de junho de 2015.

ROCHA B. et al. **Structural Health Monitoring of Aircraft Structures**. *New Trends in Structural Health Monitoring*. v. 542. Springer, Viena, v. 542, pp. 81 – 148, 2013.

ROSIEK M. et al. **Damage Detection in Riveted Aircraft Elements Based on the Electromechanical Impedance Measurements**. *Key Engineering Materials*, v. 588, pp. 54 – 63, 2013.

RYTTER A. **Vibration based inspection of civil engineering structures**. Tese de Doutorado – Dept. of Building Technology and Structural Eng, Aalborg, Denmark, 1993.

SARKER M. R. et al. **Designing a Battery-Less Piezoelectric Based Energy Harvesting Interface Circuit with 300 mV Startup Voltage**. *Journal of Physics: Conference Series*, v.431, 8 p., 2013.

SAUSE, M.G. **Investigation of pencil-lead break as acoustic emission sources**. *Journal of Acoustic Emission*, 29, 2011.

SMART MATERIAL, CORP. **MFC Overview**. Disponível em: <<http://www.smart-material.com>>. Acessado em 23 de junho de 2015.

SOHN, H.; FARRAR, C.R.; HEMEZ, F. M.; CZARNECKI, J. J. **A review of structural health monitoring literature:1996–2001**. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2004. Disponível em <<http://www.lanl.gov>>. Acessado em: 9 de nov. 2014

STANDARD GUIDE FOR DETERMINING THE REPRODUCIBILITY OF ACOUSTIC EMISSION SENSOR RESPONSE. **ASTM Standard E976-10**, 2010.

VILAKSHI T.; DHAWAN S. K.; BHALLA S.; GUPTA A. **Recent Advances in Structural Health Monitoring Based on EMI Technique**. In *International Conference on Trends and Challenges in Concrete Structures*. Paper number 11501. 2013.

WANG Y.; INMAN D. J. **Experimental Validation for a Multifunctional Wing Spar with Sensing, Harvesting, and Gust Alleviation Capabilities**. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 18, No. 4, pp. 1289-1299, 2013.

WELCH P. D. **The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms**. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, v. 15, no. 2, pp. 70–73, Jun. 1967.

WILKIE W. **Reliability Testing of NASA Piezocomposite Actuators**. In *Proceedings of the 8TH International Conference On New Actuators*, Bremen, 10-12 June, 4 p., 2002.

YAN W.; CHEN W. Q. **Structural Health Monitoring Using High-Frequency Electromechanical Impedance Signatures**. *Advances in Civil Engineering*, v.2, 11p., 2010.

ZHOU G. D.; YI T. H. **Recent developments on wireless sensor networks technology for bridge health monitoring**. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, Article ID 947867, pp. 1–33, 2013.

ZUO C.; FENG X.; ZHOU J. **A three-dimensional model of the effective electromechanical impedance for an embedded PZT transducer**. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, Article ID 218026, pp. 1–10, 2013.