



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



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

**Análise Experimental de Diafragmas Piezelétricos
Comerciais para Detecção de Dano Estrutural Baseada
na Impedância Eletromecânica**

EVERALDO SILVA DE FREITAS

Bauru – SP
2016



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

**Análise Experimental de Diafragmas Piezelétricos
Comerciais para Detecção de Dano Estrutural Baseada
na Impedância Eletromecânica**

EVERALDO SILVA DE FREITAS

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. Fabrício Guimarães Baptista

Bauru – SP
2016

Freitas, Everaldo Silva de.
Análise Experimental de Diafragmas Piezelétricos
Comerciais para Detecção de Dano Estrutural Baseada na
Impedância Eletromecânica / Everaldo S. Freitas, 2016
70 f.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Diafragmas. 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 EVERALDO SILVA DE FREITAS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 30 dias do mês de maio do ano de 2016, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-Graduação, 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, Prof. Dr. PAULO SERGIO DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS DE MARQUI JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística / Universidade de São Paulo/São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de EVERALDO SILVA DE FREITAS, intitulada **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS COMERCIAIS PARA DETECÇÃO DE DANO ESTRUTURAL BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA**. 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. PAULO SERGIO DA SILVA



Prof. Dr. CARLOS DE MARQUI JUNIOR

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus porque me amou, a Jesus que me salvou e ao Espírito Santo que me guiou em todos os momentos. Se cheguei até aqui, é porque Deus proporcionou todas as coisas e a Ele seja toda honra e toda a glória.

À minha família, minha base, minha vida. Clícia te amo!! Obrigado pelo amor, paciência, alegria com as conquistas e elogios que me fortaleceram em cada passo. Aos meus filhos João Pedro e Arthur são a minha alegria e motivação.

Aos meus pais, Antônio e Lucia, obrigado pelos ensinamentos, pelo cuidado e por serem exemplo de simplicidade, amor e força. Aos meus irmãos Hélio, Everton e suas famílias.

Ao meu pastor, discipulador, amigo e irmão Esley por abrir os meus olhos em vários momentos e me ajudar sempre com seus conselhos.

Ao meu orientador Dr. Fabrício Guimarães Baptista por ter aceitado o desafio de me orientar e fez tudo com tanta excelência que não tenho palavras para expressar minha gratidão. Muito obrigado!

Aos meus amigos que sempre me incentivaram José Aparecido Queiroz e Adriano Souza Marques. E aos amigos que foram parceiros durante toda esta caminhada: Danilo Marcus Ribeiro, Felipe Alexandre, Wenderson Nascimento, Leandro Melo, Ricardo Zanni e Pedro Oliveira.

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

Esta dissertação de mestrado apresenta uma análise experimental da viabilidade do uso dos diafragmas piezelétricos comerciais de baixo custo (comumente conhecidos como *buzzers*) em sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM – *Structural Health Monitoring*) baseados na técnica da impedância eletromecânica (E/M). Esse tipo de aplicação tem recebido uma atenção especial nas últimas décadas por se basear no uso de transdutores piezelétricos pequenos e leves que operam simultaneamente como sensores e atuadores. Foram realizados vários testes em barras de alumínio utilizando diafragmas de diversos tamanhos; as assinaturas de impedância elétrica e os índices de dano foram comparados com os obtidos usando uma cerâmica convencional de PZT (*Pb-lead Zirconate Titanate* – titanato zirconato de chumbo), que é o transdutor mais comumente utilizado nessa aplicação. Os danos estruturais foram simulados utilizando-se massas metálicas (porcas de parafuso), as quais foram fixadas nas barras com cola a base de cianoacrilato. Quatro tipos de experimentos foram realizados para fins de comparação: estimativa da sensibilidade dos transdutores utilizando método da quebra do grafite (PLB – *Pencil Lead Break* – quebra do grafite); comparação dos índices de dano RMSD (*root mean square deviation* – desvio da raiz média quadrática) e CCDM (*correlation coefficient deviation metric* – métrica do desvio do coeficiente de correlação), calculados a partir das assinaturas de impedância; avaliação dos efeitos da temperatura; e a avaliação da reprodutibilidade dos resultados a longo prazo. Os resultados indicaram que a cerâmica convencional de PZT e um diafragma de tamanho semelhante apresentam características bem próximas em relação à reprodutibilidade dos resultados, sensibilidade ao dano e aos efeitos de temperatura, o que leva a conclusão de que os diafragmas são viáveis para sistemas de SHM baseados na impedância E/M.

Palavras-chave: Diafragmas piezelétricos, SHM, impedância eletromecânica, detecção de dano.

ABSTRACT

This dissertation presents an experimental analysis of the viability of low-cost commercial piezoelectric diaphragms (commonly known as *buzzers*) in structural health monitoring (SHM) systems based on the electromechanical impedance (EMI) technique. This application has received special attention in recent decades because it is based on the use of small, lightweight piezoelectric transducers operating as both sensors and actuators. Several tests were carried out on aluminum bars using diaphragms of different sizes; the electrical impedance signatures and damage indices were compared with those obtained using a conventional PZT (Pb-Lead Zirconate Titanate) ceramic, which is the most commonly employed transducer in this application. Structural damage was simulated using metallic bolts (steel nut), which were fixed in the bars using cyanoacrylate glue. Four types of experiments were carried out for comparison between the two transducers: sensitivity estimation using the pencil lead break (PLB) method, analysis of the feasibility to detect structural damage using conventional impedance signatures and damage indices, analysis of temperature effects, and determination of the long-term reproducibility of the results. The results indicated that conventional PZT ceramics and diaphragms with similar size exhibit very close characteristics in relation to reproducibility, sensitivity to damage and temperature effects, which leads to the conclusion that the piezoelectric diaphragms are feasible in SHM systems based on the EMI method.

Keywords: piezoelectric diaphragms, SHM, electromechanical impedance, damage detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquemático do capacitor plano e respectivo sistema de coordenadas	20
Figura 2: Uma cerâmica de PZT colada em uma estrutura e sua representação como um modelo eletromecânico.....	24
Figura 3: Cerâmica de PZT (<i>Pb-lead Zirconate Titanate</i> – Titanato Zirconato de Chumbo).....	25
Figura 4: Diafragma piezelétrico ou pastilha piezelétrica, comumente conhecido como <i>buzzer</i>	26
Figura 5: Configuração básica do método PLB.	29
Figura 6: Montagens dos transdutores nas barras.....	32
Figura 7 : Formato do Sinal chirp utilizado para excitar a estrutura	35
Figura 8: Diagrama básico do sistema de medição.	36
Figura 9: Estrutura do procedimento para medição.	36
Figura 10: Esquemático de ligação do transdutor no DAQ para método PLB.	38
Figura 11: Material para Método da Quebra do Grafite.....	38
Figura 12: Dimensões do grafite para Método PLB.....	39
Figura 13: Ângulo de quebra do grafite Método PLB.....	39
Figura 14: Porca de parafuso simulando dano na barra.	40
Figura 15: Esquemático de ligação do transdutor no DAQ para medição da Impedância Eletromecânica.	42
Figura 16: Equipamentos para variação e medição de temperatura.	43
Figura 17: Medição de temperatura através do termopar ligado à barra.....	43
Figura 18: PSDs obtidas para cerâmica PZT convencional e diafragma 7BB-20-6.	44
Figura 19: PSDs obtidas para diafragmas de tamanhos diferentes.....	45
Figura 20: Comparação das assinaturas de Impedância da cerâmica convencional e do diafragma 7BB-20-6 em baixa frequência.	46
Figura 21: Comparação das assinaturas de Impedância da cerâmica convencional e do diafragma 7BB-20-6 em alta frequência.	47
Figura 22: Comparação das assinaturas de Impedância dos diafragmas de tamanhos diferentes em baixa frequência.	48
Figura 23: Comparação das assinaturas de Impedância dos diafragmas de tamanhos diferentes em alta frequência.	48
Figura 24: Índices RMSD obtidos para cerâmica convencional e diafragma 7BB-20-6 (análise nas baixas frequências).	49
Figura 25: Índices RMSD obtidos para cerâmica convencional e diafragma 7BB-20-6 (análise nas altas frequências).	50
Figura 26: Índices RMSD obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise frequências de 0 a 125 kHz).	50
Figura 27: Índices RMSD obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 125 a 250 kHz).	51
Figura 28: Índices RMSD obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 250 a 375 kHz).	51

Figura 29: Índices RMSD obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 375 a 500 kHz).	52
Figura 30: Índices CCDM obtidos para cerâmica convencional e o diafragma 7BB-20-6 (análise nas baixas frequências).	53
Figura 31: Índices CCDM obtidos para cerâmica convencional e o diafragma 7BB-20-6 (análise nas altas frequências).	53
Figura 32: Índices CCDM obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 0 a 125kHz)	54
Figura 33: Índices CCDM obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 125 a 250kHz)	54
Figura 34: Índices CCDM obtidos para cerâmica diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 250 a 375kHz).	55
Figura 35: Índices CCDM obtidos para cerâmica diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 375 a 500kHz)	55
Figura 36: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para a Cerâmica PZT 5A.	56
Figura 37: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para o <i>Buzzer</i> 7BB-20-6.	57
Figura 38: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para o <i>Buzzer</i> 7BB-12-9.	57
Figura 39: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para o <i>Buzzer</i> 7BB-27-4.	58
Figura 40: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para o <i>Buzzer</i> 7BB-35-3.	58
Figura 41: Parte real das assinaturas de impedância obtidas a partir da cerâmica convencional para medições realizadas durante uma semana.	60
Figura 42: Parte real das assinaturas de impedância obtidas a partir do diafragma 7BB-20-6 para medições realizadas durante uma semana.	60
Figura 43: Índices RMSD obtidos a partir da cerâmica convencional e o diafragma 20-6-7BB para as medições realizadas durante uma semana.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões dos Transdutores.....	33
Tabela 2: Propriedades dos Transdutores.....	34
Tabela 3: Método de análise dos efeitos de temperatura.....	43

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
EMI	Impedância Eletromecânica
FRF	Função de Resposta em Frequência
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
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
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Barramento Serial Universal

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
<i>D</i>	<i>Deslocamento elétrico</i>	<i>C/ m²</i>
<i>E</i>	<i>Campo Elétrico</i>	<i>V/ m</i>
<i>H</i>	<i>Campo Magnético</i>	<i>A/ m</i>
<i>R_s</i>	<i>Resistor Série</i>	Ω
<i>S</i>	<i>Tensor de deformação mecânica (strain)</i>	<i>Adimensional</i>
<i>T</i>	<i>Tensão mecânica ou stress</i>	<i>N/ m</i>
<i>Z_e</i>	<i>Impedância elétrica do transdutor</i>	<i>Ohm</i>
<i>Z_{in}</i>	<i>Impedância de entrada do DAQ</i>	Ω
<i>Z_p</i>	<i>Impedância mecânica do transdutor</i>	<i>N.s/ m</i>
<i>Z_s</i>	<i>Impedância mecânica da estrutura</i>	<i>N.s/ m</i>
<i>α</i>	<i>Coefficiente de expansão térmica</i>	<i>°C⁻¹</i>
<i>c</i>	<i>Rigidez</i>	<i>N/m²</i>
<i>d</i>	<i>Constante Piezelétrica</i>	<i>m/ V</i>
<i>ϵ</i>	<i>Permissividade dielétrica</i>	<i>F/ m</i>
<i>f</i>	<i>Frequência</i>	<i>Hz</i>
<i>k</i>	<i>Número de Onda</i>	<i>rad/ m</i>
<i>θ</i>	<i>Temperatura</i>	<i>°C</i>
<i>s</i>	<i>Constante de elasticidade ou compliance</i>	<i>m²/ N</i>
<i>u</i>	<i>Diferença de Potencial</i>	<i>V</i>
<i>ω</i>	<i>Velocidade angular</i>	<i>rad/ s</i>
<i>x(t)</i>	<i>Sinal de excitação do transdutor</i>	<i>V</i>
<i>y(t)</i>	<i>Sinal de resposta do transdutor</i>	<i>V</i>

PUBLICAÇÕES

Artigos completos publicados em periódicos

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**, v. 238, p. 220-228, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.031>

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

FREITAS, E.; BAPTISTA, F. An Initial Study of Commercial Piezoelectric Diaphragms for Damage Detection Based on the Electromechanical Impedance Principle. In: **Proceedings of the 2nd Int. Electron. Conf. Sens. Appl.**, 15–30 November 2015; Sciforum Electronic Conference Series, Vol. 2, 2015, E010;

<http://dx.doi.org/10.3390/ecsa-2-E010>

SUMÁRIO

Introdução	15
1.1 Objetivos	16
1.2 Justificativa e Motivação	17
1.3 Organização do trabalho	18
Detecção de dano baseado na Impedância Eletromecânica.....	20
2.1 Materiais Piezelétricos	20
2.2 Técnica da Impedância Eletromecânica (E/M).....	23
2.3. Principais Transdutores Piezelétricos	25
2.4. Método da Quebra do Grafite	28
2.5. Análise da Sensibilidade por Índices de Dano.....	30
Materiais e Métodos	32
3.1 Método da Quebra do Grafite (PLB)	37
3.2 Método de Avaliação por Índices de Dano.....	40
3.3 Método de análise dos efeitos de temperatura	42
3.4 Método de análise da reprodutibilidade de longo prazo	43
Resultados e Discussão.....	44
4.1 Avaliação pelo método PLB	44
4.2 Avaliação da sensibilidade ao dano	46
4.2.1 RMSD	49
4.2.2 CCDM	52
4.3 Avaliação dos efeitos de temperatura	56
4.4 Avaliação da reprodutibilidade de longo prazo	59
Conclusão	62
Sugestão para trabalhos futuros.....	64
Referências Bibliográficas.....	65

Capítulo 1

Introdução

Sistemas capazes de realizar o monitoramento de estruturas e detectar danos são conhecidos como Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural ou SHM, do termo em inglês *Structural Health Monitoring*. Esse tipo de aplicação tem chamado a atenção da comunidade científica em virtude dos benefícios que pode proporcionar, principalmente quando utilizam transdutores minimamente invasivos à estrutura monitorada, ou seja, quando estão associadas a técnicas de avaliação não destrutivas ou NDT (*Non-Destructive Testing*) (GIURGIUTIU, 2013). Há um grande interesse da indústria aeronáutica e aeroespacial nesse assunto, uma vez que o peso e a dimensão dos componentes são fatores importantes e especialmente desejáveis em aeronaves. Os benefícios são vários, mas pode-se destacar a redução de custos de manutenção, a estimativa da vida útil e, principalmente, o aumento da segurança das pessoas que utilizam ou trabalham com essas estruturas. E, de fato, ao se avaliar os benefícios que esse tipo de aplicação traz, logo nota-se o motivo do assunto ser tão relevante na área aeronáutica.

Os sistemas SHM são importantes para várias áreas e não são restritos a aplicações da indústria aeronáutica e aeroespacial. Nos últimos anos tem sido comum esse tipo de aplicação no monitoramento de estruturas que são consideradas críticas como pontes, barragens, oleodutos, turbinas eólicas, navios, plataformas de petróleo, máquinas de grande porte, entre outras. O objetivo principal é detectar danos, tais como fissuras, trincas, corrosão, fadiga e desgaste, preferencialmente durante as condições normais de operação da estrutura, evitando que o seu funcionamento seja interrompido, o que pode gerar grandes prejuízos em alguns casos.

O monitoramento de integridade estrutural é caracterizado como um processo de detecção de dano, e pode-se definir dano como uma alteração adversa causada na estrutura, que afeta o seu desempenho presente ou futuro (LI *et al.*, 2015; INMAN *et al.*, 2005). Entende-se também por dano qualquer alteração na estrutura que possa afetar o seu desempenho seja ele no seu funcionamento diário ou após algum tempo (futuro). Há um conceito implícito nessa definição que está relacionado à forma de identificação de dano, que é baseada na comparação entre dois estados da estrutura que são: com dano e considerado sem dano. 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. Desse conceito, surgiram as técnicas baseadas na Função de Resposta em Frequência (FRF). Nessas técnicas, os dados para a avaliação da estrutura são coletados enquanto ela está em condição dinâmica por meio de excitação natural (vibração produzida pelo ambiente em condições normais de operação) ou forçada (introduzida de forma controlada por meio de atuadores como *shakers* e transdutores piezelétricos).

Existem muitos métodos para a detecção de danos em estruturas, tais como o de emissão acústica (ABDELRAHMAN; ELBATANOUNY; ZIEHL, 2014; HAN; XU; CARPINTERI, 2015), correntes parasitas (ARJUN *et al.*, 2015), ondas de Lamb (LI; PENG; MENG, 2014; GORGIN *et al.*, 2014), os métodos baseados em sensores de fibra óptica (ZHAO; BAO; AMJAD, 2015), e de vácuo comparativo (ROACH, 2009; RULLI; DOTTA; DA SILVA, 2013). Nesse trabalho de mestrado foi utilizada uma das técnicas mais comuns em aplicações de detecção de dano em sistemas de SHM que é a da impedância eletromecânica (E/M) (MARTOWICZ; ROSIEK, 2013; ANNAMDAS; SOH, 2010; ZHANG *et al.*, 2015). Trata-se de uma técnica NDT baseada na FRF que tem metodologia simples, utiliza transdutores piezelétricos pequenos e leves, de baixo custo que são instalados na estrutura como adesivos, permitindo que seja monitorada uma vasta área com vários transdutores sem que as características da estrutura sejam significativamente alteradas. Esses transdutores podem funcionar como sensor e como atuador ao mesmo tempo, pois são utilizados tanto para excitar como para coletar dados relacionados com a impedância mecânica da estrutura monitorada. Ao fixar esses transdutores em algumas estruturas é possível detectar alterações nas propriedades mecânicas da estrutura, causadas por danos, simplesmente através da medição da impedância elétrica do transdutor. Isso é feito com base no efeito piezelétrico que promove uma interação entre a propriedade mecânica da estrutura e a impedância elétrica do transdutor.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho de mestrado foi analisar a viabilidade da aplicação de diafragmas piezelétricos comerciais (*buzzers*), na detecção de dano em sistemas de SHM utilizando a técnica da impedância eletromecânica. Essa análise consistiu de um estudo

experimental que envolveu quatro tipos de testes e cinco tipos de transdutores, sendo quatro *buzzers* de dimensões distintas e uma cerâmica de PZT (transdutor piezelétrico convencional mais utilizado em sistemas SHM). Todos esses testes tinham como objetivo avaliar o desempenho e a confiabilidade dos *buzzers* em relação aos transdutores piezelétricos convencionais. Os testes deveriam proporcionar formas de avaliar as características e comportamentos dos transdutores ensaiados, e por isso o primeiro teste realizado foi o da análise de sensibilidade ao dano usando o método 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, o terceiro teste analisou os efeitos de temperatura e no quarto teste foi avaliada a reprodutibilidade dos resultados de longo prazo.

1.2 Justificativa e Motivação

Os materiais e transdutores piezelétricos são amplamente utilizados em uma grande variedade de dispositivos eletrônicos. As aplicações são diversas, desde as mais simples, tais como em microfones e alto-falantes piezelétricos utilizados em aparelhos portáteis, às mais sofisticadas, como em tomografia ultrassônica na medicina. Nas últimas décadas, esses transdutores têm sido empregados na detecção de danos estruturais (SUN *et al.*, 2013), que é a aplicação de interesse deste estudo.

O interesse por sistemas de detecção de danos em estruturas tem crescido significativamente nos últimos anos. E a motivação vem tanto de pesquisadores como de vários setores da indústria que buscam principalmente segurança, confiabilidade e a diminuição da parada das máquinas e sistemas para manutenção. A parada para manutenção representa para algumas indústrias custos relativamente altos que devem ser evitados. É desejável que a avaliação seja feita constantemente (monitoramento periódico) e de forma menos invasiva possível às estruturas. Deste conceito surgiram os modernos sistemas de monitoramento de integridade estrutural ou SHM (OSTACHOWICZ; GÜEMES, 2013; FARRAR; WORDEN, 2007).

Entre os campos mais importantes de aplicação estão a engenharia civil (HARIK; PEIRIS, 2013) e a indústria aeronáutica (ROCHA *et al.*, 2013), que é um dos setores mais focado na atualidade. Desde a década passada, vários trabalhos demonstraram o uso bem sucedido da técnica da impedância E/M tanto em estruturas simples, tais como barras de alumínio, como em estruturas mais complexas (PARK; CUDNEY; INMAN,

2000, 2001). A técnica da impedância E/M se destaca por causa do baixo custo e das dimensões reduzidas dos transdutores (espessura na ordem de frações de milímetro), permitindo que uma vasta área seja monitorada sem que as características da estrutura sejam significativamente alteradas. Isso é especialmente desejável em aeronaves, onde o peso e a dimensão dos componentes são fatores importantes. Segundo Gyekenyesi *et al.* (2005), a técnica da impedância E/M é a única que possui características favoráveis para o desenvolvimento de sistemas de SHM em tempo real e embarcados em aeronaves.

Existem outros campos de aplicação importantes como as grandes estruturas marítimas (submarinos, navios e dutos de petróleo no fundo do mar). A motivação é tanto científica como econômica. Do ponto de vista científico, monitorar e detectar danos estruturais significa conquistar um elevado nível de segurança. Do ponto de vista econômico, sistemas com essa capacidade permitem uma economia significativa com manutenção uma vez que é possível se antecipar às falhas e problemas. Isso é possível quando se aplica um tipo de manutenção conhecida como preditiva.

Existem vários tipos de manutenção das quais podem ser citadas como principais a corretiva, a preventiva e a preditiva. Das três, a que atende aos interesses desse estudo é a manutenção preditiva que é realizada com base em monitoramento de parâmetros de condição ou desempenho. Seu objetivo é permitir a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível. As intervenções no equipamento são realizadas somente quando os sinais monitorados indicam a existência de uma falha incipiente, antes do equipamento interromper a produção. É o tipo de manutenção que possui maior eficiência e sua evolução está relacionada com a evolução tecnológica. Essa ferramenta é fundamental para as indústrias que querem garantir disponibilidade, qualidade, custos e vida útil adequada aos equipamentos e sistemas num mercado globalizado e altamente competitivo como o atual. (TEIXEIRA *et al.*, 2014)

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em 5 capítulos como segue:

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

- Capítulo 2: Detecção de dano baseado na Impedância Eletromecânica, fundamentação teórica dos materiais piezelétricos e principais transdutores, técnicas da impedância eletromecânica, quebra do grafite e análise da sensibilidade dos transdutores pelos índices de dano.
- Capítulo 3: Apresentação dos transdutores envolvidos nos ensaios (cerâmica PZT 5A, diafragmas “*buzzers*” nos modelos 7BB-12-9, 7BB-20-6, 7BB-27-4 e 7BB-35-3) e da metodologia empregada para detecção de danos. Descrição das principais técnicas utilizadas (quebra do grafite, índices de dano, análise dos efeitos de temperatura e reprodutibilidade de longo prazo).
- Capítulo 4: Apresentação dos resultados dos experimentos, comparando o comportamento dos transdutores envolvidos. O primeiro teste realizado foi o da análise de sensibilidade ao dano usando o método 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, o terceiro teste analisou os efeitos de temperatura e no quarto teste foi avaliada a reprodutibilidade dos resultados de longo prazo.
- Capítulo 5: Considerações finais, perspectivas para trabalhos futuros e referências bibliográficas utilizadas.

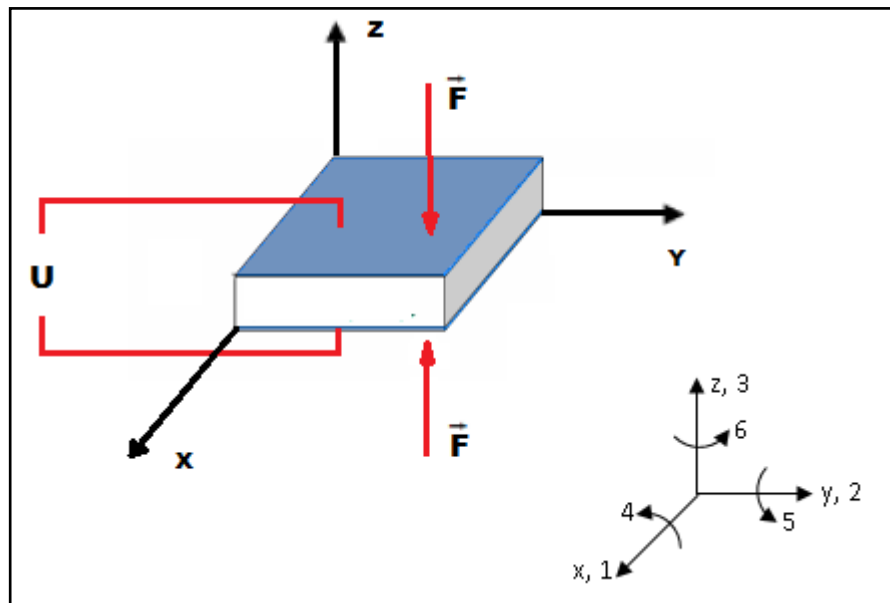
Capítulo 2

Detecção de dano baseado na Impedância Eletromecânica

2.1 Materiais Piezelétricos

Os materiais piezelétricos têm a propriedade de converter energia mecânica em energia elétrica (efeito piezelétrico direto) e energia elétrica em energia mecânica (efeito piezelétrico reverso). 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 . A figura 1 apresenta o esquemático do capacitor plano de placas paralelas para determinação das relações constitutivas do material piezelétrico e respectivo sistema de coordenadas indicativo do seu sentido de elongação e torção.

Figura 1: Esquemático do capacitor plano e respectivo sistema de coordenadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Se o dielétrico do capacitor é um material piezelétrico, ocorre uma interação entre as grandezas elétricas e mecânicas. E se a amplitude do campo elétrico imposto pela diferença de potencial é suficientemente baixa, o efeito piezelétrico que causa essa interação pode ser considerado linear. Neste caso, as seguintes relações constitutivas

podem ser determinadas a partir da energia livre de Gibbs do material (BUSCH-VISHNIAC, 1998)

$$D_m = d_{m\beta}^{H,\theta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^{T,H,\theta} E_k + m_{mk}^{T,\theta} H_k + p_m^{T,H} d\theta \quad (1)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^{E,H,\theta} T_\beta + d_{\beta m}^{H,\theta} E_m + d_{\beta m}^{E,\theta} H_m + \alpha_\alpha^{E,H} d\theta \quad (2)$$

Nas Equações (1) e (2), $d_{m\beta}$ e $d_{\beta m}$ são as constantes piezelétricas, m_{mk} são as constantes magnetodielétricas, p_m são as constantes piroelétricas, α_α são os coeficientes de expansão térmica, H_k e H_m são as componentes de campo magnético, θ é a temperatura, S_α é o tensor de deformação mecânica (*strain*), T_β é o tensor de tensão mecânica (*stress*), $S_{\alpha\beta}$ é o tensor de elasticidade do material, também conhecido como tensor de *compliance*, E é o campo elétrico, D_m é o deslocamento elétrico e ε_{mk} é o tensor de segunda ordem que representa as constantes de permissividade dielétrica do material. Os sobrescritos E , H , θ e T indicam campo elétrico, campo magnético, temperatura e tensão mecânica constantes, respectivamente. Os índices α e β estão relacionados com o tipo de deformação que ocorre no material. Quando $\alpha, \beta = 1, 2, 3$, há uma alongação do material na direção dos eixos x, y e z que estão associados com os índices 1, 2, e 3, respectivamente, conforme ilustra o sistema de coordenadas da Figura 1. Por outro lado, se $\alpha, \beta = 4, 5, 6$, ocorre uma torção do material em torno de x, y e z, respectivamente. Considerando-se a simetria dos tensores, tem-se que $\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6$ e $m, k = 1, 2, 3$.

Na detecção de danos estruturais e geração de energia, os efeitos térmicos e magnéticos são comumente desprezados e as Equações (1) e (2) podem ser simplificadas como:

$$D_m = d_{m\beta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (3)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d_{\beta m} E_m \quad (4)$$

A Equação (3) representa o efeito piezelétrico direto (sensor), em que uma tensão mecânica T_β no material causa um deslocamento elétrico D_m . As componentes do tensor $d_{m\beta}$ dessa equação relacionam o deslocamento elétrico na direção “ m ” com a

tensão mecânica na direção “ β ”. Já no efeito piezoeletrico reverso (atuador) representado pela Equação (4), a aplicação de um campo elétrico E_m causa uma correspondente deformação mecânica S_α . As componentes do tensor $d_{\beta m}$ dessa equação relacionam tensão mecânica na direção “ β ” com o deslocamento elétrico na direção “ m ”. Portanto, em um material piezoeletrico 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.

Na detecção de danos estruturais, os transdutores piezoeletricos mais utilizados são constituídos de cerâmicas de PZT (*Pb-lead Zirconate Titanate* – Titanato Zirconato de Chumbo). Essas cerâmicas têm a simetria dos cristais hexágonos da classe 6 mm (MEITZLER *et al.*, 1987). Utilizando-se essa simetria e considerando-se apenas a deformação longitudinal e transversal ($\alpha, \beta = 1, 2, 3$), as Equações (3) e (4) podem ser desenvolvidas como segue:

$$D_3 = d_{31}(T_1 + T_2) + d_{33}T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (5)$$

$$S_1 = S_{11}^E T_1 + S_{12}^E T_2 + S_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (6)$$

$$S_2 = -S_{12}^E T_1 - S_{11}^E T_2 + S_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (7)$$

$$S_3 = S_{12}^E (T_1 + T_2) + S_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \quad (8)$$

As Equações (5) a (8) definem as relações constitutivas básicas das cerâmicas de PZT. Um estudo mais aprofundado seria o ideal para entendimento dos equacionamentos acima, porém o presente trabalho apresenta apenas as características básicas das propriedades do efeito piezoeletrico, necessárias para o entendimento da aplicação dos transdutores piezoeletricos na detecção de danos estruturais. Para um estudo mais detalhado, recomenda-se a leitura de MEITZLER *et al.* (1987). A aplicação desses transdutores para a detecção de danos estruturais baseada na técnica da impedância eletromecânica (E/M) é apresentada na próxima seção.

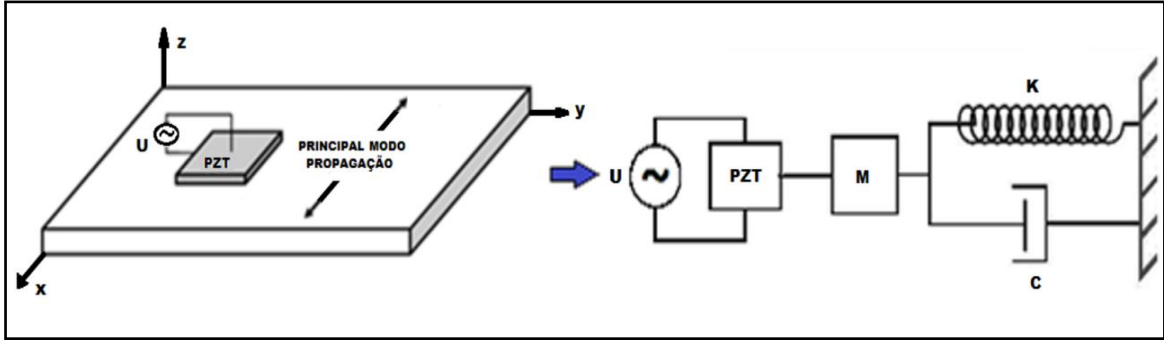
2.2 Técnica da Impedância Eletromecânica (E/M)

Uma das técnicas mais promissoras para a detecção de dano em sistemas de SHM é a da impedância eletromecânica (E/M). Trata-se de uma técnica que tem metodologia simples e que pode utilizar transdutores piezelétricos com dimensões reduzidas, leves e que, ao serem colados na estrutura, não alteram significativamente suas propriedades. O princípio da técnica é baseado no efeito piezelétrico, que proporciona um acoplamento eletromecânico com a estrutura monitorada e, portanto, permite avaliar as condições mecânicas da estrutura a partir das propriedades elétricas do transdutor. (STEPINSKI; UHL; STASZEWSKI, 2013; CAWLEY, 1984).

A principal característica do método é a utilização do transdutor piezelétrico como sensor e atuador simultaneamente. O transdutor tanto excita como coleta os dados relacionados com a impedância mecânica da estrutura monitorada, permitindo detectar danos em estágio inicial. Além disso, a técnica da impedância E/M permite a detecção de dano através de ensaios não destrutivos ou NDT (*Non-Destructive Testing*), pois os transdutores são leves e pequenos, sendo minimamente invasivos à estrutura monitorada.

Para esse tipo de aplicação o transdutor mais comum é a cerâmica de PZT (*Pb-lead Zirconate Titanate* – Titanato Zirconato de Chumbo) que é produzida em poucos países com as características adequadas para a técnica, o que torna sua aquisição muito custosa e burocrática em virtude de ter que ser importada. Portanto a alternativa é a utilização de transdutores mais acessíveis, e os diafragmas piezelétricos comerciais atendem aos quesitos porque são de baixo custo e podem ser encontrados facilmente em qualquer loja de eletrônica. Para utilização desse transdutor na técnica da impedância eletromecânica, ele é fixado na estrutura e esse sistema pode ser representado por um modelo eletromecânico (LIANG; SUN; ROGERS, 1994), como ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Uma cerâmica de PZT colada em uma estrutura e sua representação como um modelo eletromecânico.



Fonte: Elaborado pelo autor

É bastante conhecido e se baseia em um modelo em que a cerâmica de PZT e a estrutura podem ser representadas por um sistema equivalente do tipo massa-mola com um grau de liberdade. A cerâmica de PZT colada em uma estrutura é excitada por uma tensão alternada U em uma faixa de frequência apropriada. No modelo eletromecânico equivalente do tipo massa-mola, k é a constante da mola, C é o coeficiente de amortecimento e M é a massa. Várias soluções para esse sistema em termos da impedância elétrica do transdutor piezelétrico têm sido propostas baseando-se em modos de propagação bidimensional e tridimensional. No entanto, se a espessura do transdutor é pequena, na ordem de frações de milímetro, a deformação na direção de sua espessura (eixo z da Figura 2) é pouco expressiva. Além disso, para uma suposição unidimensional, pode-se considerar apenas a deformação na direção do eixo x do material. Portanto, o principal modo de propagação é na direção do eixo x , conforme indicado na Figura 2, e pode-se fazer $S_2=S_3=T_2=T_3=0$ nas Equações (5) a (8). Logo, as equações piezelétricas para esse modo de propagação ficam:

$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (9)$$

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad (10)$$

A partir das Equações (9) e (10), a impedância elétrica do transdutor pode ser determinada por (LIANG; SUN; ROGERS, 1994):

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

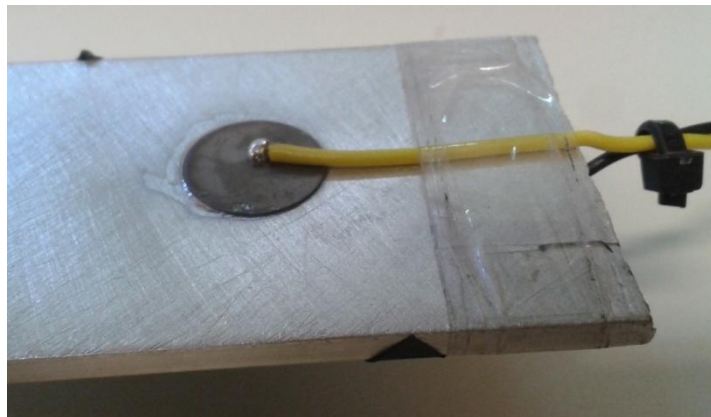
Sendo que $Z_E(\omega)$ é a impedância elétrica do transdutor, τ é uma constante geométrica que depende do tamanho e da forma do transdutor, $Z_S(\omega)$ é a impedância mecânica da estrutura, $Z_P(\omega)$ é a impedância mecânica do transdutor e ω é a frequência angular.

De acordo com a Equação (11), qualquer variação na impedância mecânica $Z_S(\omega)$ da estrutura causada por algum dano, tal como trincas e corrosões, implica em uma variação correspondente na impedância elétrica $Z_E(\omega)$ do transdutor. Portanto, um dano estrutural pode ser detectado por meio da análise da variação da impedância elétrica do transdutor em uma faixa de frequência apropriada.

2.3. Principais Transdutores Piezelétricos

A cerâmica de PZT é apresentada na Figura 3. É atualmente o transdutor mais comumente utilizado em sistemas de SHM baseados na técnica da impedância E/M.

Figura 3: Cerâmica de PZT (*Pb-lead Zirconate Titanate* – Titanato Zirconato de Chumbo).



Fonte: Elaborado pelo autor

As cerâmicas de PZT são fornecidas em pequenas placas delgadas ou em recortes em formato de discos. Um fornecedor bastante conhecido é a Piezo Systems Inc. (<http://www.piezo.com>), que fornece suas cerâmicas com tamanho padrão de 72,4 mm x 72,4 mm, espessura variando de 0,127 mm a 2,03 mm e revestidas por finas camadas de níquel em ambas as faces que constituem os eletrodos. Essas cerâmicas são cortadas no

tamanho desejado e instaladas na estrutura a ser monitorada. Para acoplamento das cerâmicas de PZT nas barras são utilizadas colas de epóxi ou a base de cianoacrilato. Tal procedimento inutiliza a cerâmica que tem um custo relativamente elevado. Uma cerâmica típica de PZT 5A ou 5H no tamanho padrão informado anteriormente é cotada em cerca de USD 120,00 e o custo pode ser bem maior se for acrescido de taxa de importação, custo de envio e demais impostos.

Visando contornar essa dificuldade, alguns pesquisadores propuseram métodos alternativos que permitem o reaproveitamento da cerâmica. Yang; Divsholi; Soh (2010) propuseram um transdutor reutilizável de PZT para monitorar a integridade e a hidratação inicial de estruturas de concreto. Já Na; Tawie; Lee (2012) propuseram um transdutor reutilizável por meio de um acoplamento magnético com a estrutura a ser monitorada. Os autores testaram o novo dispositivo em estruturas de fibra de vidro. Apesar de serem comumente utilizadas em sistemas de SHM, há muitos fatores que justificam a busca por uma alternativa ao uso da cerâmica de PZT. Além do preço já citado, aplicações em estruturas com superfícies irregulares são uma grande limitação para esse transdutor. Por esse motivo, estudos foram feitos com o transdutor MFC para o desenvolvimento de sistemas de SHM baseados na impedância E/M e outras técnicas (CUI *et al.*, 2014; Park *et al.* 2008). As desvantagens dos transdutores MFC são justamente as mesmas das cerâmicas de PZT, que são a dificuldade de serem encontrados com as dimensões desejadas, necessidade de importação e alto custo. A alternativa então foi utilizar um diafragma piezelétrico comercial, comumente conhecido como *buzzer* (Figura 4) que se adapta melhor a todas essas condições.

Figura 4: Diafragma piezelétrico ou pastilha piezelétrica, comumente conhecido como *buzzer*.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os *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, como a Murata Manufacturing (<http://www.murata.com>). A construção dos *buzzers* é simples, sendo constituídos por uma base de latão sobre a qual se encontra o material piezelétrico revestido por um filme metálico. Tem formato circular com diâmetro variando de 12 mm a 41 mm. A grande vantagem desses componentes são o custo extremamente baixo e a facilidade de serem encontrados sem a necessidade de importação.

No Brasil são facilmente encontrados em lojas de eletrônicos a um custo que varia entre R\$ 0,05 e R\$ 1,00. Essas vantagens têm motivado o uso desses componentes em muitos trabalhos científicos com várias possibilidades e várias áreas de aplicação como no caso dos trabalhos desenvolvidos por Chang *et al.* (2008), que utilizaram os *buzzers* em mecanismos de embreagem. Também como aplicação comum desses dispositivos, podem ser citados o uso no reaproveitamento de energia (*power harvesting*), como foi proposto por Sarker *et al.* (2013), Mousselmal *et al.* (2013) e Guiffard; Guichon; Gundel (2012), e na utilização desses dispositivos como atuadores, como apresentado por Ducharme *et al.* (2013) e Mou (2012). Os *buzzers* também têm sido utilizados em sistemas de SHM baseados em diversas técnicas, conforme apresentados por Souza e Nobrega (2012), Ooijsaar *et al.* (2012) e Da Silva; Gonzalez; Lopes Junior (2011). Recentemente, aplicações de SHM com detecção de dano utilizando a técnica da impedância eletromecânica e índices métricos tem sido amplamente estudados como nas propostas dos trabalhos de Freitas e Baptista (2015) e Gonzalez *et al.* (2015) que apresentam resultados da análise dos danos estruturais em barras e painéis aeronáuticos e Tinoco e Marulanda (2015) que utilizaram os diafragmas para detecção de dano em placas através dos índices baseados nas elipses de confiança gaussianas.

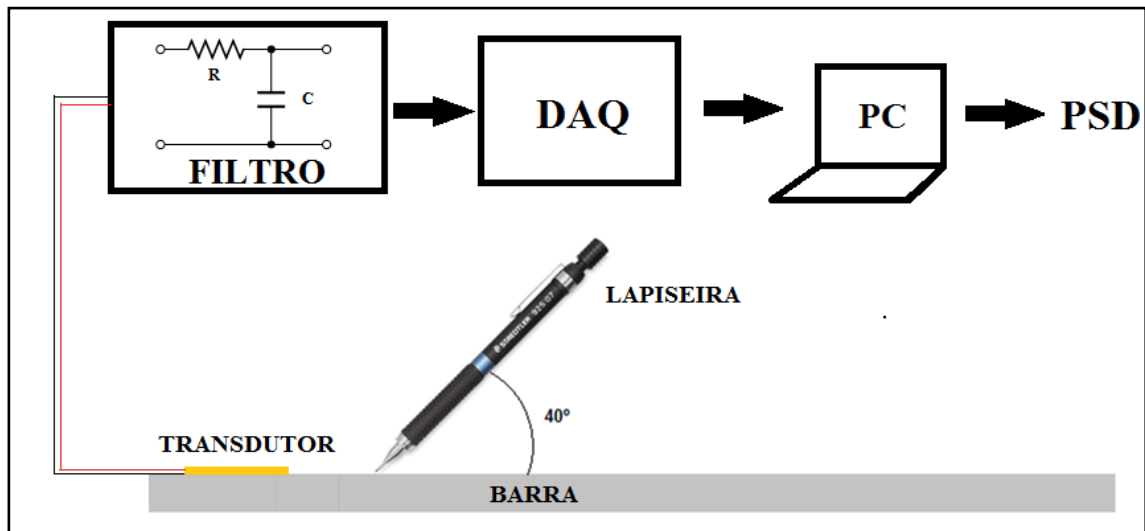
Outras aplicações recentes são as de Lamberti *et al.* (2015) que utilizaram os *buzzers* para desenvolvimento de um sensor tátil e Liang e Wang (2015) que propuseram o uso dos diafragmas para monitorar a magnitude de pressão em tubos de choque. São muitos os trabalhos propostos com resultados interessantes que indicam que os *buzzers* tem um desempenho semelhante às cerâmicas convencionas de PZT, porém esses componentes ainda carecem de uma análise mais criteriosa e caracterização apropriada.

2.4. Método da Quebra do Grafite

Todos os transdutores utilizados em detecção de danos na técnica da impedância E/M necessitam ser devidamente caracterizados, e por isso se faz necessário o uso de um método que faça isso de forma eficiente. Um método muito comum em aplicações de emissão acústica (EA), e que é interessante para realização desse procedimento, é o PLB (Método da Quebra do Grafite). É um método que vem se revelando uma boa ferramenta para aplicações que envolvem avaliação das características de transdutores conforme apresentado por Almeida; Baptista; Aguiar (2015). Mas isso não é suficiente pois na prática os transdutores ainda apresentam 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. O PLB é um método padrão estabelecido há muito tempo, primeiramente proposto por Hsu (1977). Pode, também, ser chamado de teste de Hsu-Nielsen e neste trabalho foi utilizado para estimar a sensibilidade do transdutor piezelétrico na detecção de dano baseada no princípio da impedância E/M.

O método do PLB consiste em realizar a quebra de um grafite sobre a estrutura que se pretende analisar. O transdutor deve ser acoplado a essa estrutura e irá captar o impulso liberado pela quebra. Essa quebra libera uma fonte de sinal impulsiva com uma grande largura de banda que pode ser usada para a caracterização dos transdutores. É um método muito simples, mas deve ser bem executado, pois pode haver desvios na forma de manuseio do material (lapiseira) que podem resultar em diferenças nos sinais obtidos. Quando bem executado, os sinais apresentam boa reprodutibilidade e por isso a metodologia é interessante e pode ser considerada uma forma confiável para obtenção de características dos transdutores ensaiados. A configuração básica do método pode ser vista na Figura 5.

Figura 5: Configuração básica do método PLB.



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 5, 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 utilizando a PSD (*Power Spectral Density* – Densidade Espectral de Potência). A densidade espectral de potência (PSD - *Power Spectral Density*) de um sinal descreve o conteúdo de potência do sinal como uma função da frequência. Representa o quanto de potência está presente em cada frequência que constitui o sinal. Para o cálculo das PSDs utilizou-se o método Welch (Welch, 1967) que é usado para estimar a potência de um sinal em frequências diferentes, isto é, é uma abordagem à estimativa da densidade espectral. A estimativa do espectro de potência de Welch é baseada no método de estimativa de periodograma desenvolvido por Bartlett. Welch alterou o periodograma de Bartlett introduzindo sobreposição aos segmentos e possibilitando o uso de uma janela em cada um dos segmentos da sequência original. Ele também introduziu a possibilidade de se utilizar uma janela diferente da retangular para a análise do periodograma, o resultado disso é um periodograma modificado (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996). Em resumo, se divide o sinal em N segmentos com um grau de sobreposição, aplica janelas no domínio do tempo a cada uma, e determina a DFT e sua magnitude quadrática, tirando então a média dos resultados ao longo do tempo. Os cálculos das PSDs pelo método Welch foram realizados utilizando-se uma implementação feita no software Labview, que faz parte do sistema de medição de

impedância proposto por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; 2009) que será descrito no próximo capítulo.

No método do PLB, fatores como o comprimento e o diâmetro do grafite devem ser levados em consideração, bem como o ângulo de quebra que podem mudar a força de ruptura e, conseqüentemente, os resultados, como foi analisado por Sause (2011). Em relação à dureza do grafite utilizou-se o tipo HB que tem dureza média, que proporcionou um resultado satisfatório. O cuidado com esses fatores implica na 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).

2.5. Análise da Sensibilidade por Índices de Dano

A detecção de dano estrutural é realizada comparando-se duas curvas (ou assinaturas) de impedância elétrica 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, a parte imaginária ou o valor absoluto da impedância elétrica.

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

$$RMSD = \sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[Z_{E,D}(k) - Z_{E,H}(k)]^2}{Z_{E,H}^2(k)}} \quad (12)$$

Sendo $Z_{E,H}(k)$ e $Z_{E,D}(k)$ as assinaturas de impedância elétrica (parte real, parte imaginária ou valor absoluto) que são dadas pela Equação (11) para a estrutura íntegra (H - *health*) e após um possível dano (D - *damage*), respectivamente, ambas obtidas na frequência k que varia de ω_I (frequência inicial) a ω_F (frequência final).

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

$$CCDM = 1 - Cc \quad (13)$$

Sendo Cc o coeficiente de correlação que é calculado pela seguinte equação:

$$Cc = \frac{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}] [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]}{\sqrt{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}]^2 \sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]^2}} \quad (14)$$

Em que $Z_{E,H}(k)$ e $Z_{E,D}(k)$ são as assinaturas da impedância elétrica definidas anteriormente e $\bar{Z}_{E,H}$ e $\bar{Z}_{E,D}$ a média dessas assinaturas na faixa de frequência selecionada (de ω_I a ω_F).

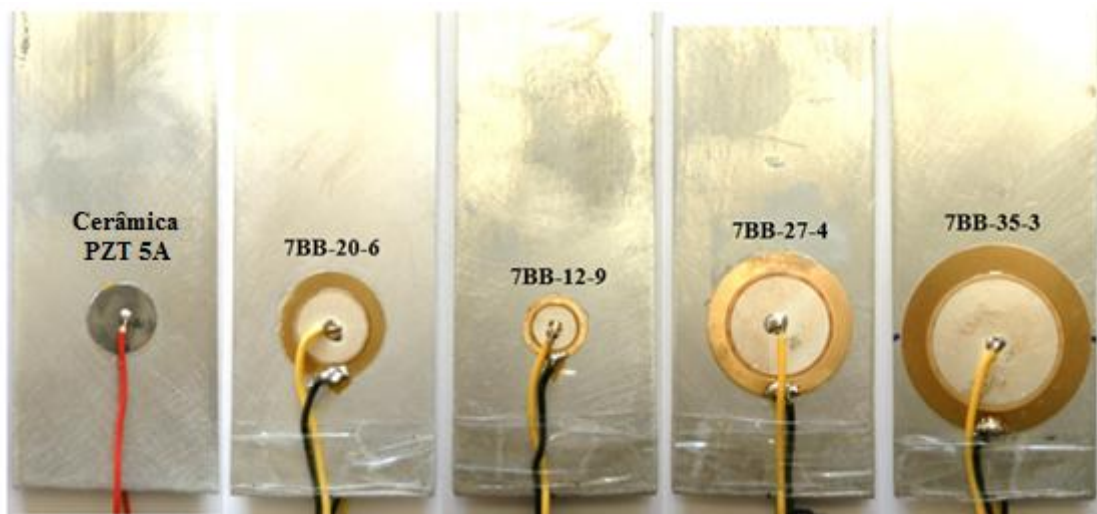
Portanto, a técnica da impedância E/M permite que a condição da estrutura seja avaliada de uma forma simples comparando-se duas assinaturas de impedância elétrica em uma faixa de frequência apropriada através de índices de falha métrica, sendo que uma das assinaturas é obtida para a estrutura considerada íntegra e utilizada como referência (*baseline*).

Capítulo 3

Materiais e Métodos


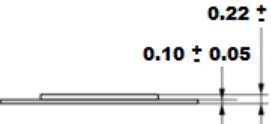
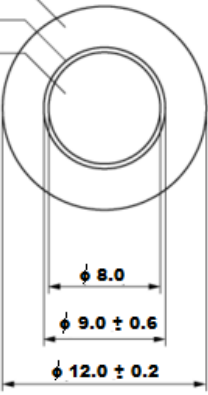

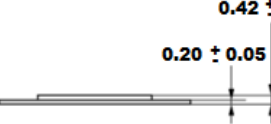
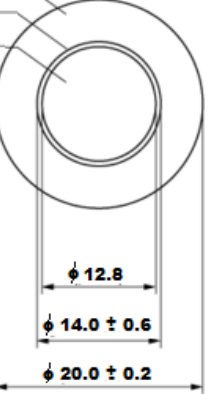

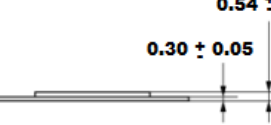
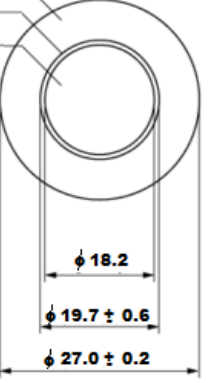
Para realização da análise experimental foram utilizados quatro modelos diferentes de transdutores, sendo uma cerâmica convencional de PZT, tipo 5A, modelo PSI-5A4E da *Piezo Systems* com recorte circular de diâmetro 12,7 mm e espessura de 0,191 mm, e quatro diafragmas “*buzzers*” nos modelos 7BB-12-9, 7BB-20-6, 7BB-27-4 e 7BB-35-3 da *Murata Manufacturing* com diâmetro externo de 12, 20, 27 e 35 mm, e elemento piezelétrico (ativo) com diâmetro de 9, 14, 19,7 e 25 mm, respectivamente. Para obter os resultados comparativos entre os diafragmas e a cerâmica convencional, foram utilizadas barras de alumínio com dimensões 500 mm x 38,10 mm x 3,18 mm onde esses transdutores foram colados a uma distância de 30 mm contados a partir do centro da pastilha até a extremidade da barra. Essa distância e também a forma de acoplamento dos transdutores nas barras foi padronizada para que fosse reproduzido o mesmo procedimento para todos os ensaios. O acoplamento foi feito utilizando-se uma cola a base de cianoacrilato e as barras foram apoiadas sobre uma mesa através de pequenos blocos de borracha para minimizar os efeitos de vibrações externas. As montagens são mostradas na Figura 6 e as dimensões e propriedades dos transdutores são apresentadas nas tabelas 1 e 2:

Figura 6: Montagens dos transdutores nas barras.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 1: Dimensões dos Transdutores.

Modelo	Aparência	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
7BB-12-9			<p> BASE LATÃO CERÂMICA ELETRODO </p> 
7BB-20-6			<p> BASE LATÃO CERÂMICA ELETRODO </p> 
7BB-27-4			<p> BASE LATÃO CERÂMICA ELETRODO </p> 

7BB-35-3			<p>BASE LATÃO CERÂMICA ELETRODO</p>
PZT 5A			<p>CERÂMICA E ELETRODO</p>

Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Murata Manufacturing e Piezo Systems

Tabela 2: Propriedades dos Transdutores.

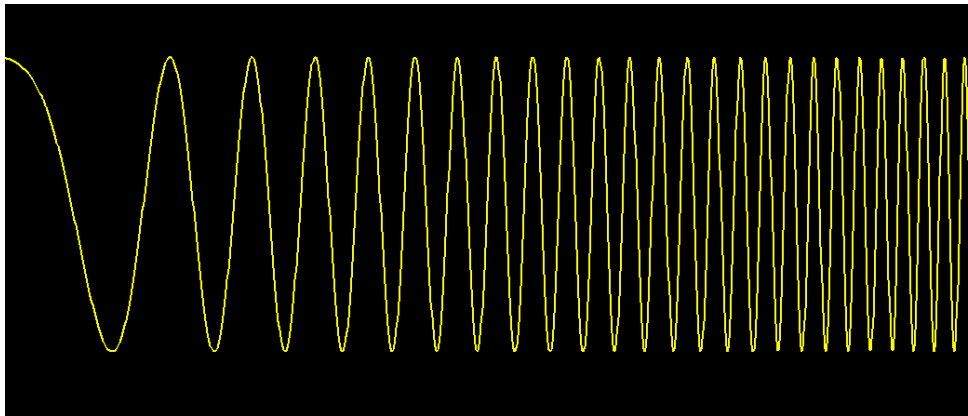
Modelos	d_{31} (10^{-12} m/V) Constante Piezelétrica	s_{11}^E (10^{-12} m ² /N) Elasticidade	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$ Constante Dielétrica Relativa e Permissividade
7BB-12-9	-207	15.8	2100
7BB-20-6			
7BB-27-4			
7BB-35-3			
PZT 5A	-190	15.2	1800

Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Murata Manufacturing e Piezo Systems

Para realização das medições e obtenção dos resultados gráficos, utilizou-se o sistema de medição de impedância proposto por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; 2009) que é composto por um dispositivo de aquisição de dados (DAQ) multifuncional NI-USB-6361 da *National Instruments* com interface USB (*Universal Serial Bus*), um resistor simples e um computador pessoal (PC). O módulo de controle e operação que é parte do sistema de medição, foi desenvolvido em LabVIEW e proporcionou rapidez na obtenção dos resultados, uma vez que todos os cálculos já estavam implementados.

O sistema opera baseado na média da função de resposta em frequência (FRF) (H) obtida através da transformada de Fourier discreta (DFT) dos sinais de excitação e resposta do circuito auxiliar utilizado para a conexão do transdutor. Além da FRF, leva-se em consideração parâmetros do circuito de forma que é possível se obter com precisão a impedância (Z_E) do transdutor. O sistema foi configurado para excitar os transdutores com um sinal *chirp* com 1 V de amplitude. O sinal *chirp* faz uma varredura desde uma frequência inicial de baixo valor até uma frequência final de valor mais alto, ou vice-versa. Trata-se de uma senoide cuja frequência varia no tempo. A figura 7 mostra a forma do sinal *chirp*.

Figura 7: Formato do Sinal chirp utilizado para excitar a estrutura



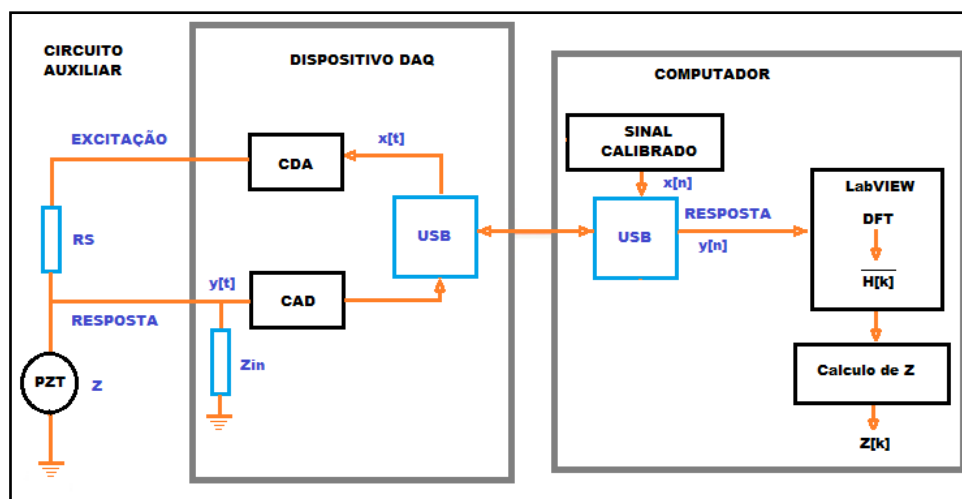
Fonte: Elaborado pelo autor

Os sinais foram amostrados com uma taxa de 2 MS/s (amostras/segundo) e as assinaturas de impedância foram obtidas em uma faixa de frequência entre 0 e 500 kHz com um passo de frequência de 2 Hz. Um diagrama simplificado do sistema e o arranjo experimental são apresentados nas Figuras 8 e 9 respectivamente.

No diagrama da Figura 8, $x(t)$ e $x(n)$ representam o sinal de excitação na forma contínua e discreta, respectivamente; da mesma forma, $y(t)$ e $y(n)$ representam as duas formas do sinal de resposta do transdutor. O dispositivo DAQ é multifuncional, isto é, permite tanto a aquisição do sinal de resposta $y(t)$ através do CAD como também a geração do sinal de excitação $x(t)$ através do CDA, ambos com resolução de 16 bits. O CAD tem entrada diferencial que oferece uma boa imunidade ao ruído e permite a aquisição de sinais de pequena amplitude. Isso evita o uso de amplificadores no circuito auxiliar que podem limitar a largura de banda e afetar o desempenho do sistema em altas frequências.

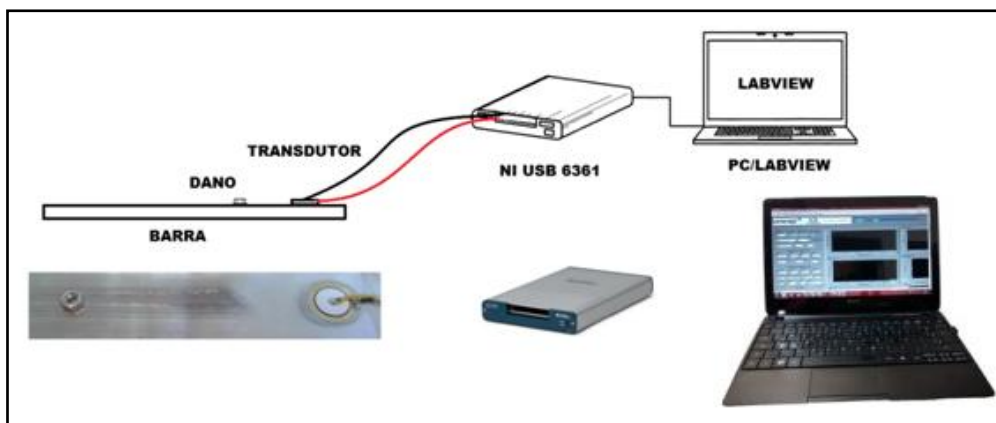
A geração do sinal de excitação é feita por software e, além de permitir a escolha entre uma ampla variedade de sinais, evita que este precise ser reamostrado. Isso é possível porque é feita uma “calibração” entre o padrão do sinal gerado por software $x(n)$ e o sinal $x(t)$ que realmente chega ao circuito auxiliar, que é realizada como segue: antes de qualquer medição e com todos os parâmetros definidos, a saída do CDA (Conversor Digital-Analógico) e a entrada do CAD (Conversor Analógico-Digital), são conectadas e o sinal de excitação é amostrado uma única vez e armazenado, substituindo o padrão gerado por software. Esse procedimento reduz significativamente as discrepâncias causadas pelo CDA. Também, as discrepâncias causadas pelo CAD em $x(n)$ durante a “calibração” e em $y(n)$ durante o processo normal de medição são compensadas durante o cálculo da FRF, sendo obtida pela divisão da DFT dos dois sinais.

Figura 8: Diagrama básico do sistema de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9: Estrutura do procedimento para medição.



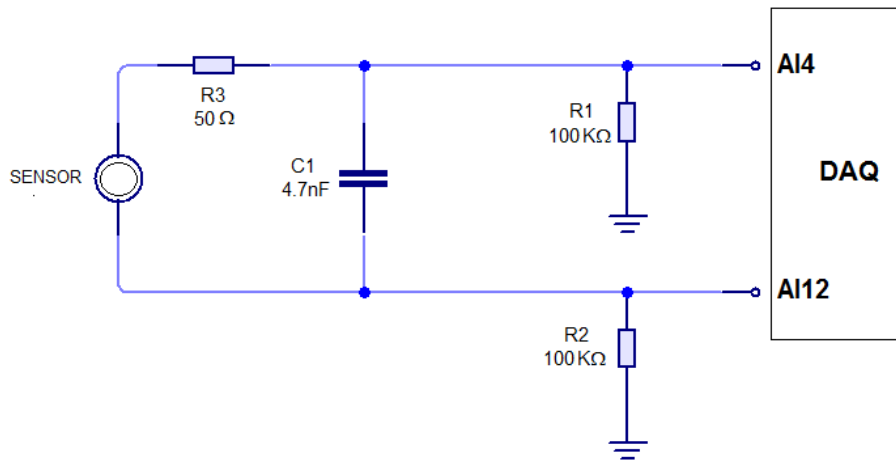
Fonte: Elaborado pelo autor

Quatro tipos de testes foram realizados: análise de sensibilidade ao dano usando o método da quebra do grafite (PLB), a viabilidade de detectar danos estruturais no método da Impedância E/M usando as assinaturas de impedância elétrica e os índices RMSD e CCDM, a análise dos efeitos de temperatura e reprodutibilidade de longo prazo.

3.1 Método da Quebra do Grafite (PLB)

Para o método da quebra do grafite (PLB), testes foram realizados utilizando uma lapiseira comum, com grafite de dureza média (HB), com 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 de parafuso) 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 (silicone), a qual é utilizada na proteção de bicos de sugadores de solda. Na Figura 10 apresenta-se o esquemático de ligação do transdutor e a implementação do filtro *antialiasing* com frequência de corte $f_c=677,25$ kHz. As medições foram feitas utilizando o módulo análise de transiente desenvolvido na plataforma LabVIEW. Esse módulo coleta os valores de tensão proveniente do transdutor instalado na estrutura, utilizando o dispositivo de aquisição de dados, DAQ, enquanto ocorre a quebra do grafite. Assim, pode-se processar e analisar o sinal obtido. A análise é geralmente feita no domínio da frequência e neste trabalho foi feito utilizando a Densidade Espectral de Potência (PSD). Para todos os transdutores foram realizadas cinco medidas consecutivas com a quebra do grafite sendo realizada a 100 mm do transdutor, seguindo as orientações específicas do método. Para comparação das assinaturas dos transdutores, por padrão foi adotado a seleção dos dados da terceira medida das cinco realizadas consecutivamente.

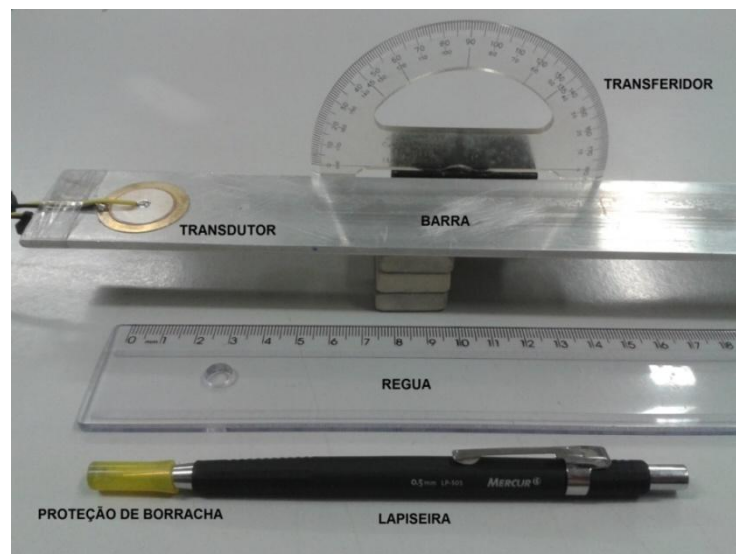
Figura 10: Esquemático de ligação do transdutor no DAQ para método PLB.



Fonte: Elaborado pelo autor

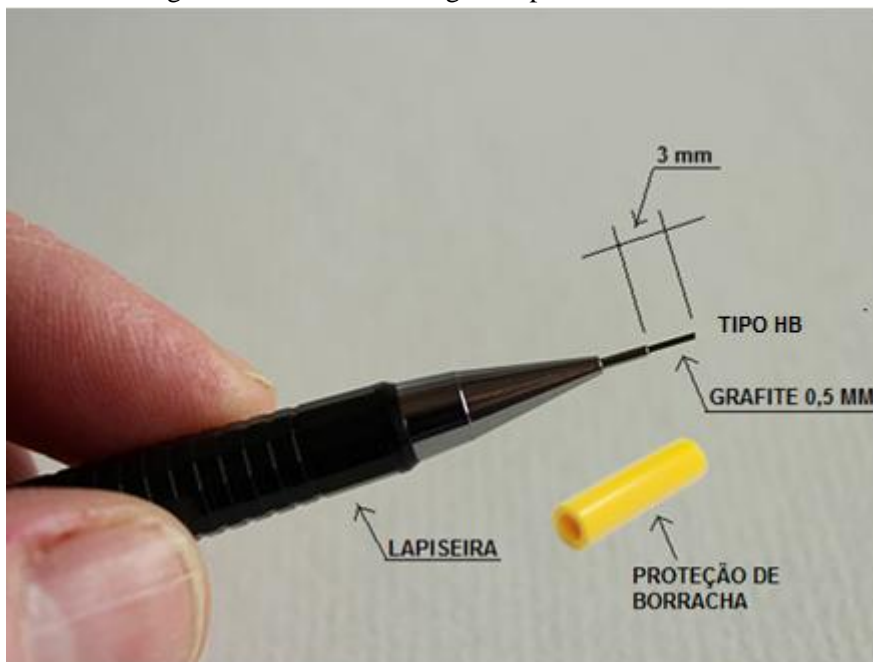
Nas figuras de 11 a 13 apresentam-se a estrutura e os detalhes que fazem parte do procedimento correto para execução da metodologia da quebra do grafite para que os resultados pudessem ser consistentes e reproduzíveis.

Figura 11: Material para Método da Quebra do Grafite.



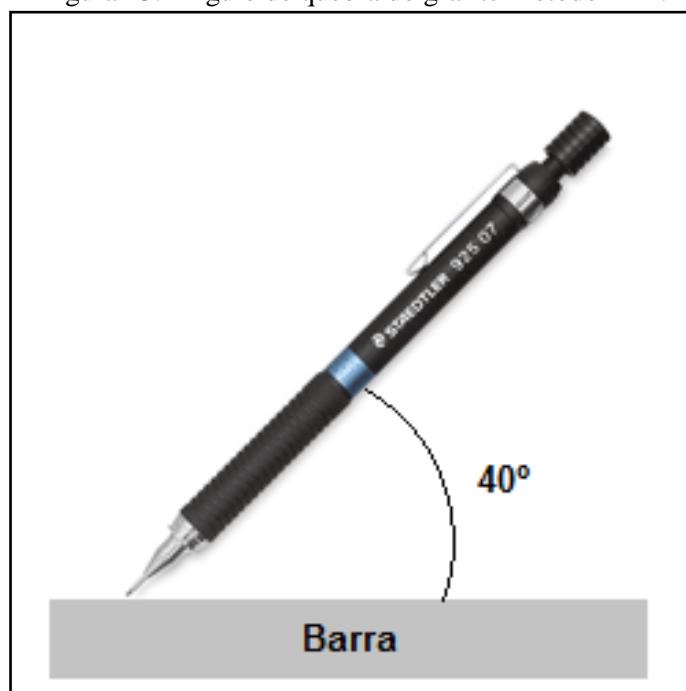
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12: Dimensões do grafite para Método PLB.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13: Ângulo de quebra do grafite Método PLB.



Fonte: Elaborado pelo autor

O sinal de tensão obtido do método PLB através do dispositivo DAQ utilizou taxa de amostragem de 2 MS/s e um filtro RC passivo com frequência de corte de 677,25 kHz. Todas as medidas foram obtidas à temperatura ambiente (em torno de 25° C) e a configuração permitiu dados reprodutíveis e confiáveis até a frequência de 250 kHz.

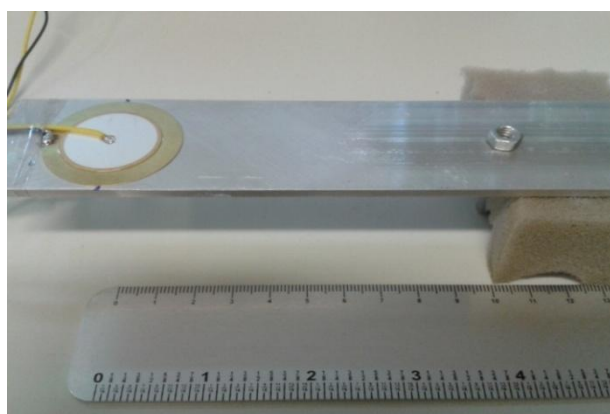
Alguns cuidados foram tomados para que não houvesse problemas de interferências externas, por isso as barras de alumínio foram colocadas sobre blocos de borracha.

Os sinais de tensão no domínio do tempo foram adquiridos diretamente dos transdutores ensaiados no instante em que o grafite foi quebrado, atendendo aos requisitos do método aqui apresentado. Os sinais de tensão obtidos dos sensores foram usados no cálculo dos sinais correspondentes de PSD utilizando-se o método Welch com uma janela Hanning de 256 amostras e sobreposição de 50%. Os resultados experimentais são apresentados no próximo capítulo.

3.2 Método de Avaliação por Índices de Dano

Para a realização dos testes foram utilizadas as barras com os transdutores colados nas distancias padrão. Os danos foram simulados através da adição de uma massa metálica (porca de parafuso) em cima da barra a uma distância fixa de 100 mm do transdutor, conforme se pode observar na Figura 14. A porca tem aproximadamente 1 grama de massa e dimensões de 8 x 4 mm. O transdutor foi ligado ao DAQ conforme esquemático da Figura 15 e foram feitas as medições utilizando o software analisador de impedância desenvolvido na plataforma LabVIEW. As funções de excitação e coleta dos dados foram executadas automaticamente pelo software que além de apresentar os resultados de forma gráfica, permite o armazenamento dos dados da medida realizada. Para todos os transdutores foram realizadas cinco medidas consecutivas com a estrutura sem dano e mais cinco medidas com a estrutura com dano (adição de porca de parafuso). Para comparação das assinaturas dos transdutores, por padrão foi adotado a seleção dos dados da terceira medida das cinco realizadas consecutivamente.

Figura 14: Porca de parafuso simulando dano na barra.



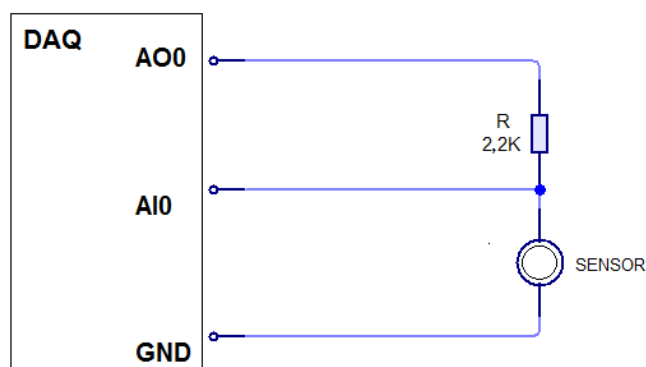
Fonte: Elaborado pelo autor

Para avaliar os resultados das medições feitas com os transdutores foram selecionadas faixas de frequência apropriadas. A faixa correta é determinada como aquela que oferece índices com valores elevados e uma boa repetição entre as assinaturas de impedância elétrica. É o processo mais crítico da análise, pois depende da estrutura e do tipo de dano a ser detectado. Geralmente, a seleção da faixa de frequência apropriada é feita pelo método de tentativa e erro a partir de dados medidos na estrutura de interesse. Em (GYEKENYESI *et al.*, 2005), foram realizados testes em placas de alumínio e a faixa de frequência mais adequada foi determinada procurando-se por regiões de frequência que ofereciam boa repetitividade entre as medidas sob condições constantes. Moura Junior e Steffen Junior (2003) determinaram, por tentativa e erro, que a melhor faixa de frequência para uma barra flexível é de 15 a 33 kHz. A partir desse resultado, quarenta experimentos foram realizados para encontrar subfaixas de frequência mais adequadas através de um método baseado em superfícies de resposta. Em (PEAIRS; TARAZAGA; INMAN, 2007), a seleção da faixa de frequência foi baseada na análise das frequências de ressonância do transdutor antes de sua instalação na estrutura e em uma comparação estatística entre os dados coletados com a estrutura íntegra e aqueles com vários níveis de dano. Em (ANNAMDAS; RIZZO, 2009), os dados para estruturas de aço, alumínio e concreto foram coletados em uma larga faixa de frequência. Posteriormente, foram adotados índices estatísticos para avaliar e comparar a sensibilidade entre várias faixas mais estreitas dentro da faixa larga de frequência em que os dados foram coletados. Portanto, esses métodos determinam a melhor faixa de frequência a partir de dados medidos em uma quantidade considerável de testes. Não há uma metodologia que permita avaliar teoricamente em que faixas de frequência o transdutor é mais sensível para a detecção do dano. Neste trabalho o método utilizado para estimar a faixa adequada foi o de relacionar as assinaturas de impedância elétrica dos transdutores de forma que fossem obtidos os índices de dano (RMSD e CCDM) com valores mais expressivos.

Todas as medições foram feitas em uma faixa de 0 a 500 kHz, mas para uma comparação mais adequada das assinaturas de impedância foram selecionadas faixas mais estreitas, sendo uma faixa em baixa frequência e outra em alta frequência. Essas faixas foram determinadas experimentalmente para a estrutura em análise e o tipo de dano induzido (adição de massa), sendo que as faixas de 15 a 20 kHz (baixa) e 200 a 250 kHz (alta), ofereceram bons resultados. Além disso, apenas a parte real das assinaturas de impedância nas faixas especificadas foi considerada, uma vez que como é

de conhecimento na literatura, a parte real da impedância elétrica é mais sensível para a detecção de dano e menos sensível às variações de temperatura (BHALIA; NAIDU; SOH, 2003). O sistema de medição utilizado também foi o dispositivo DAQ onde foi montada a estrutura para excitação e coleta dos sinais de impedância. A Figura 15 mostra o esquemático de ligação.

Figura 15: Esquemático de ligação do transdutor no DAQ para medição da Impedância Eletromecânica.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Método de análise dos efeitos de temperatura

O método da impedância eletromecânica é significativamente sensível à temperatura como apresentado por Baptista *et al.* (2014), por isso foram feitos testes para avaliar o desempenho dos diafragmas piezelétricos para diferentes temperaturas e comparar os resultados com a cerâmica convencional. As barras foram aquecidas usando uma pistola de ar quente e o monitoramento da temperatura foi feito através de um termômetro digital que capturava a temperatura proveniente de um termopar ligado à barra, como indicado nas Figuras 16 e 17. As assinaturas de impedância eletromecânica foram obtidas para temperaturas que variaram de 20 a 70 °C em passos de 2 °C. Para tornar mais fácil a obtenção das assinaturas, o transdutor foi ligado ao sistema de medição de impedância e a barra onde ele estava acoplado foi aquecida até 70 °C utilizando a pistola de ar quente posicionada ao centro da barra. À medida que a temperatura foi caindo, a cada 2 °C foi realizada a medição. No total foram obtidas vinte e seis medidas conforme está descrito na tabela abaixo.

Tabela 3: Método de análise dos efeitos de temperatura

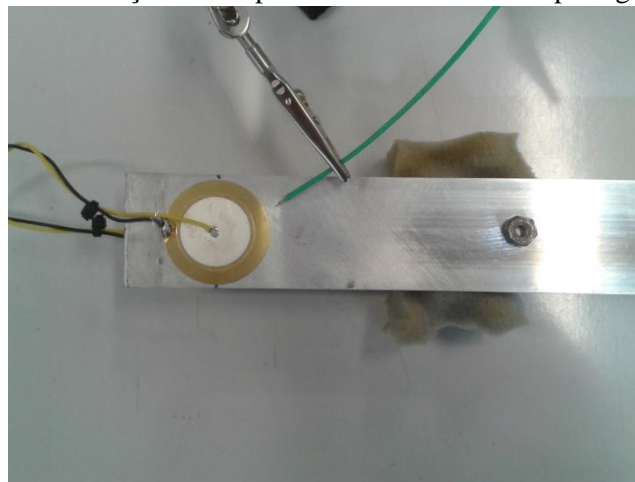
FAIXA DE TEMPERATURA E MEDIDAS REALIZADAS																											
Temp (°C)	70	68	66	64	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	
Medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	

Figura 16: Equipamentos para variação e medição de temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17: Medição de temperatura através do termopar ligado à barra



Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Método de análise da reprodutibilidade de longo prazo

Tipicamente, a detecção e quantificação dos danos são realizadas comparando duas assinaturas de impedância, utilizando índices de dano. Assim, a reprodutibilidade das assinaturas de impedância é importante para evitar diagnósticos falsos positivos. Portanto, para examinar a reprodutibilidade dos resultados obtidos utilizando os diafragmas piezelétricos, as assinaturas de impedância foram medidas durante uma semana a cada 24 horas, a uma temperatura de 20 ° C controlada por um aparelho de ar condicionado.

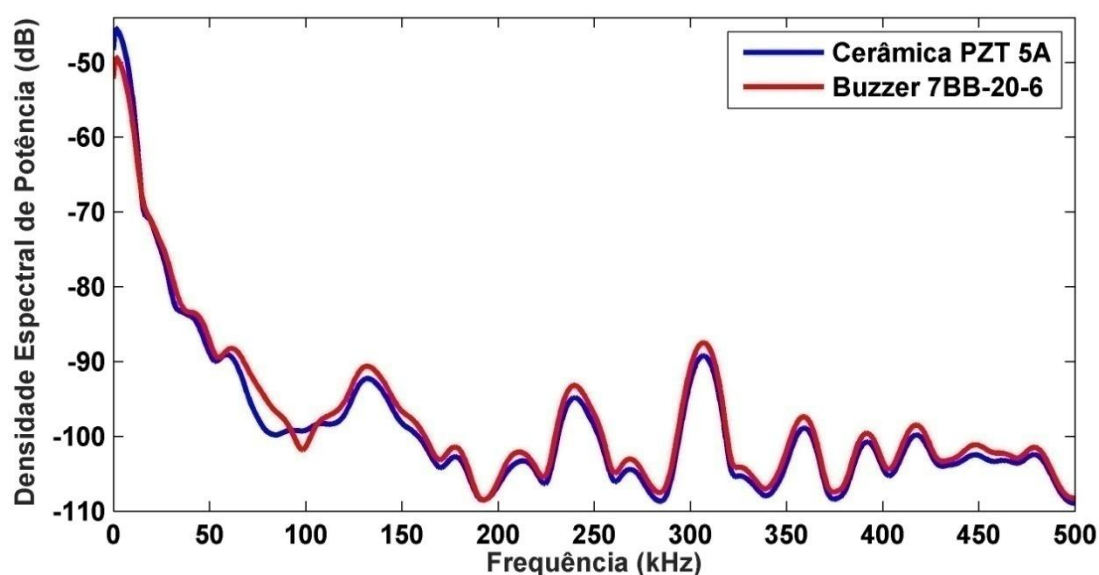
Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Avaliação pelo método PLB

Os sinais obtidos a partir do teste de PLB foram analisados no domínio da frequência através do cálculo da PSD. A comparação entre as PSDs obtidas para a cerâmica PZT convencional e o diafragma 7BB-20-6, que tem um elemento piezolétrico com dimensão semelhante é apresentada na Figura 18.

Figura 18: PSDs obtidas para cerâmica PZT convencional e diafragma 7BB-20-6.



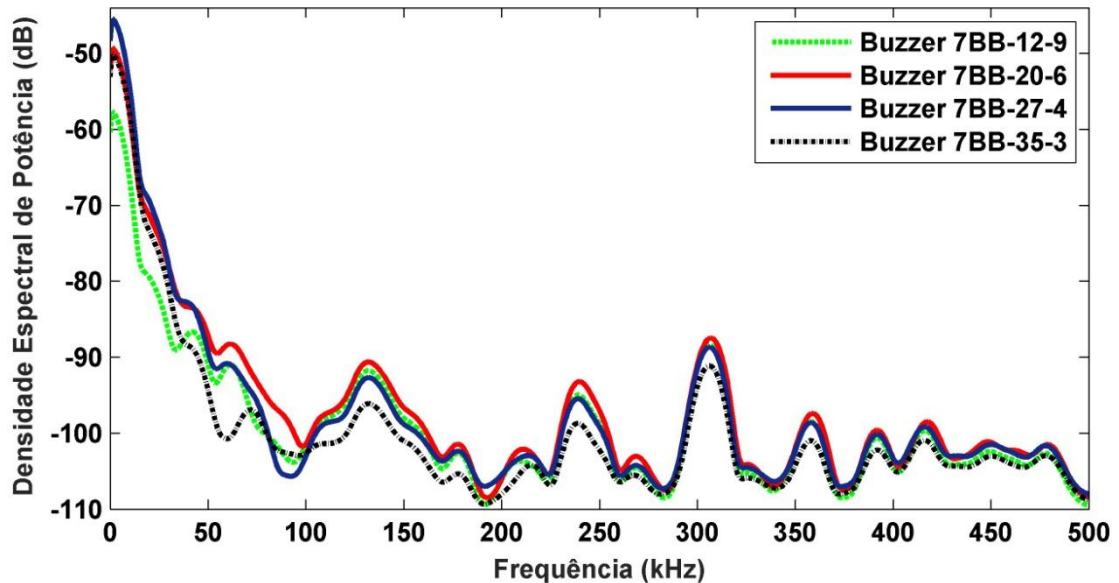
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 18, as PSDs obtidas a partir da cerâmica convencional e o diafragma 7BB-20-6 apresentam tendências muito similares. Este resultado é importante porque indica que o diafragma piezolétrico com um elemento ativo de dimensão semelhante a uma cerâmica PZT convencional tem uma resposta em frequência similar, inclusive apresentando uma tendência decrescente quando a frequência aumenta. Outro ponto importante é em relação à PSD da cerâmica convencional que é maior em frequências abaixo de aproximadamente 15 kHz enquanto o diafragma apresenta PSD maior em altas frequências. Isso indica uma tendência de que a cerâmica deverá ter maior sensibilidade em baixas frequências e o diafragma maior sensibilidade em altas frequências. Em Almeida; Baptista; Aguiar (2015) os resultados obtidos mostraram uma boa relação entre as PSDs obtidas pelo método PLB

e os índices de dano, computados a partir das assinaturas da impedância elétrica. Isso permitiu uma estimação experimental das faixas de frequências nas quais o transdutor é mais sensível e uma comparação das sensibilidades entre diferentes transdutores, que a partir de então podem ser selecionados para cada tipo específico de aplicação.

As PSDs obtidas para os diafragmas de tamanhos diferentes são mostradas na Figura 19.

Figura 19: PSDs obtidas para diafragmas de tamanhos diferentes.



Fonte: Elaborado pelo autor

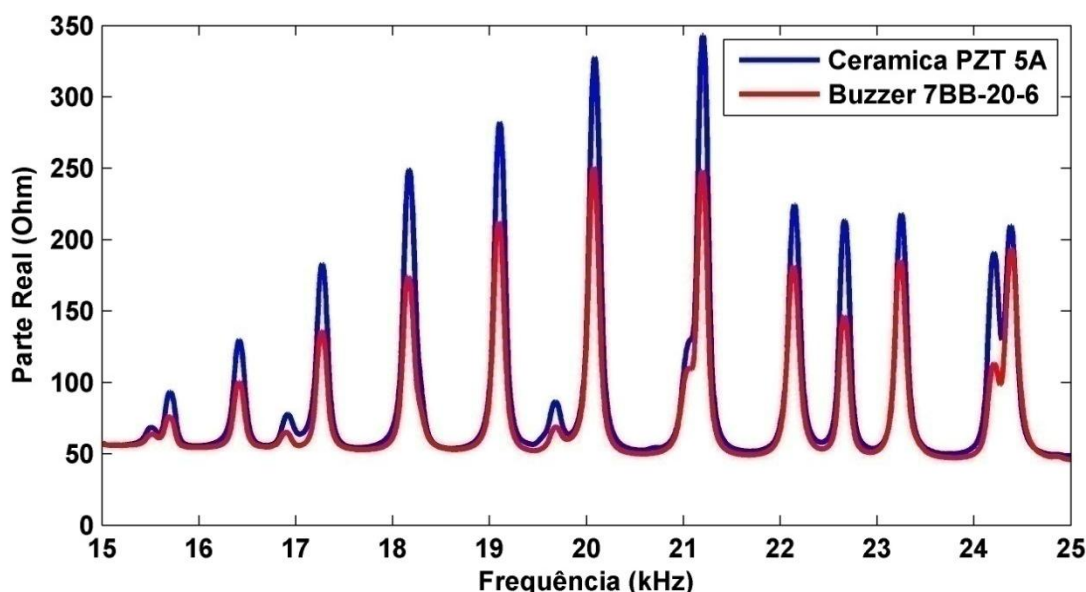
Como no resultado anterior, as PSDs obtidas para os outros tamanhos de diafragma também apresentaram tendências semelhantes à cerâmica. Outro ponto importante para caracterização dos diafragmas está relacionado ao valor da PSD de cada um dentro da faixa de frequência avaliada. Para isso, propõe-se uma classificação a partir do diafragma que obteve a maior PSD para o que obteve a menor PSD. Observa-se que em frequências abaixo de aproximadamente 35 kHz o diafragma 7BB-27-4 se destacou com a maior PSD. Classificando todos os diafragmas nessa faixa, tem-se que o diafragma 7BB-27-4 obteve a primeira posição, o diafragma 7BB-20-6 obteve a segunda posição, o diafragma 7BB-35-3 teve a terceira posição e o diafragma 7BB-12-9 ficou com a quarta posição, ou seja, teve a menor PSD. A partir de 35 kHz as posições mudaram, sendo que o diafragma 7BB-20-6 obteve a primeira posição com a maior PSD para todo o restante do espectro de frequência analisado, o diafragma 7BB-12-9 ficou com a segunda posição, o diafragma 7BB-27-4 teve a terceira posição e o diafragma 7BB-35-3 ficou com a quarta posição com a menor PSD. Observa-se que em altas frequências os *buzzers* apresentam um comportamento mais estável, pois as posições não se alternam

(com exceção de algumas sub-bandas) em todo o restante da faixa avaliada. Isso pode significar que os *buzzers* são melhores para aplicações em altas frequências. Para verificar essa informação, serão utilizados os índices de dano RMSD e CCDM para quantificar os danos estruturais. Os índices RMSD obtidos a partir da cerâmica convencional e diafragmas serão apresentados e discutidos na próxima seção.

4.2 Avaliação da sensibilidade ao dano

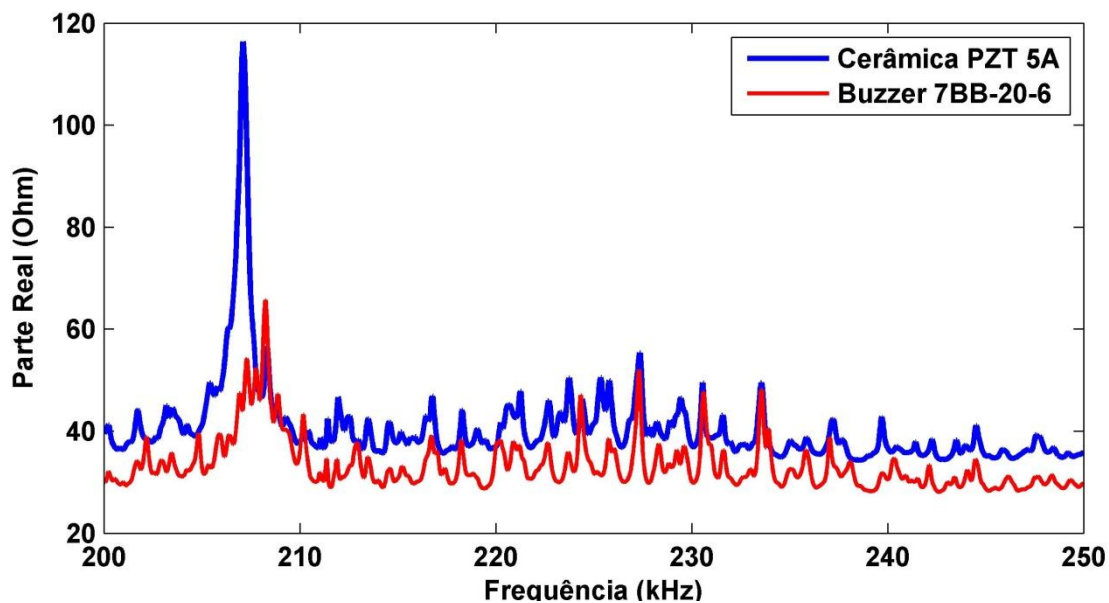
A viabilidade de se utilizar um transdutor para detectar danos estruturais pode ser analisada de uma forma melhor quando se recorrem aos índices de danos. Através desses índices é possível comparar e quantificar as variações nas assinaturas de impedância elétrica devido ao dano estrutural. Neste estudo foi utilizada a parte real da assinatura de impedância e os dois índices foram calculados usando as Equações (12) e (13) implementadas no software LabVIEW. As medições com os quatro tipos de *buzzer* e a cerâmica de PZT foram feitas em uma faixa de 0 a 500 kHz, mas para uma comparação mais adequada das assinaturas de impedância foram selecionadas faixas mais estreitas, sendo normalmente uma faixa em baixa frequência e outra em alta frequência. Nas Figuras 20 e 21 são apresentadas a parte real das assinaturas de impedância elétrica obtidas com a cerâmica de PZT e o diafragma comercial 7BB-20-6 para faixas de 15 a 25 kHz (baixa) e 200 a 250 kHz (alta), respectivamente.

Figura 20: Comparação das assinaturas de Impedância da cerâmica convencional e do diafragma 7BB-20-6 em baixa frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21: Comparação das assinaturas de Impedância da cerâmica convencional e do diafragma 7BB-20-6 em alta frequência.

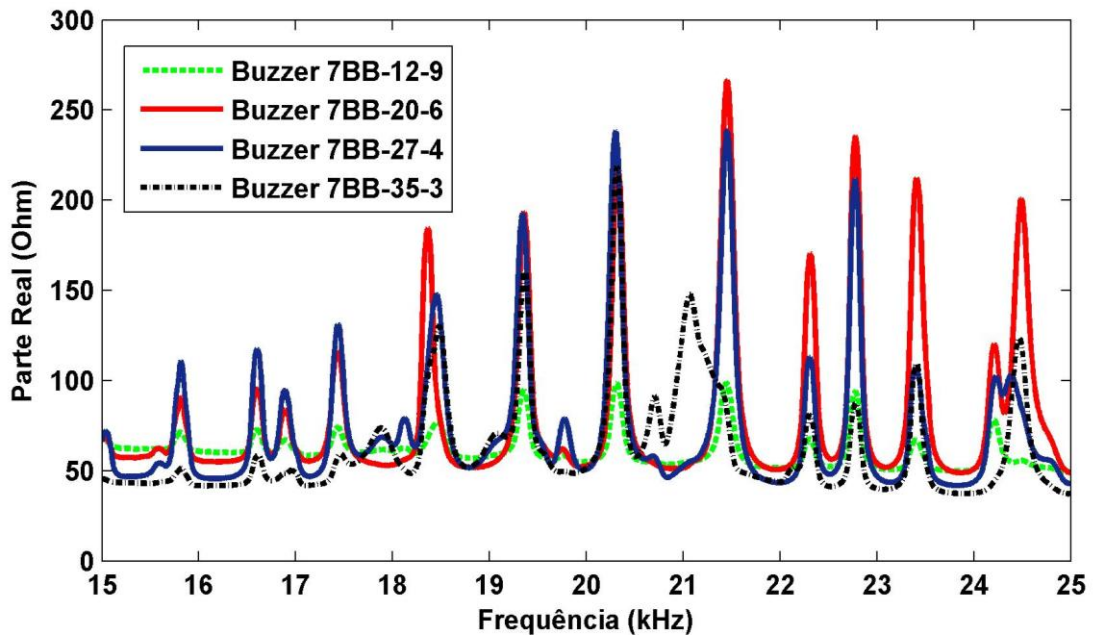


Fonte: Elaborado pelo autor

As assinaturas apresentam tendências e picos de ressonância muito semelhantes, indicando, portanto, a semelhança de características e comportamento dos dois transdutores. Observa-se também que a cerâmica convencional tem picos de ressonância mais elevados, porém sabe-se que as amplitudes dos picos de ressonância (frequências naturais das estruturas que são alteradas quando há um dano) são distintas em cada transdutor, pois dependem muito do material que os constituem e do tamanho. Assim, o que deve ser considerado é, principalmente, a forma e a tendência das assinaturas de impedância e não a sua amplitude. Portanto o resultado mostra que o diafragma comercial pode ser utilizado em detecção de dano, pois teve comportamento equivalente ao da cerâmica tanto em baixas como em altas frequências.

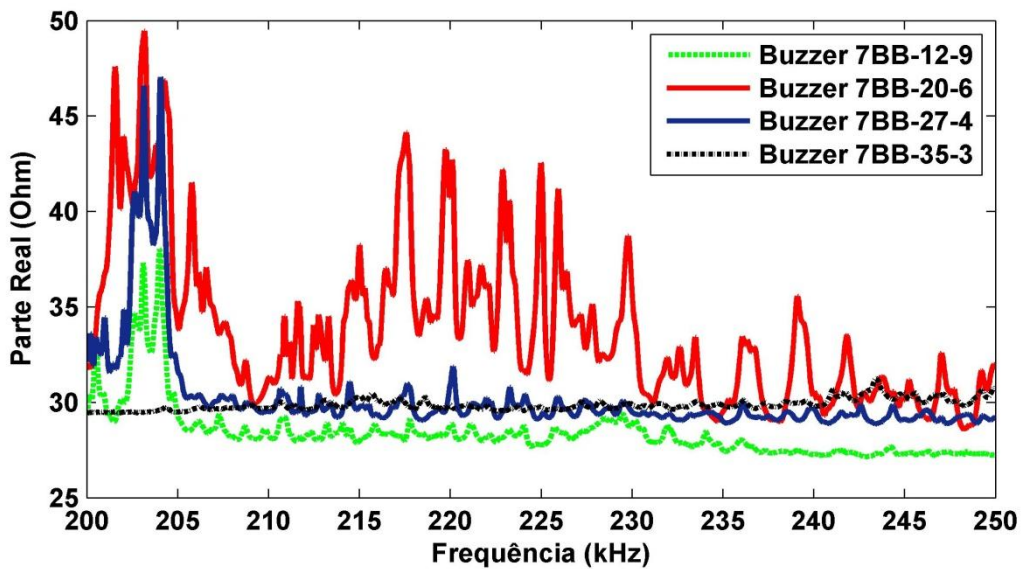
Nas Figuras 22 e 23 são apresentadas as assinaturas de impedância obtidas com os diafragmas 7BB-12-9, 7BB-20-6, 7BB-27-4 e 7BB-35-3 em baixa e alta frequência, respectivamente.

Figura 22: Comparação das assinaturas de Impedância dos diafragmas de tamanhos diferentes em baixa frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23: Comparação das assinaturas de Impedância dos diafragmas de tamanhos diferentes em alta frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor

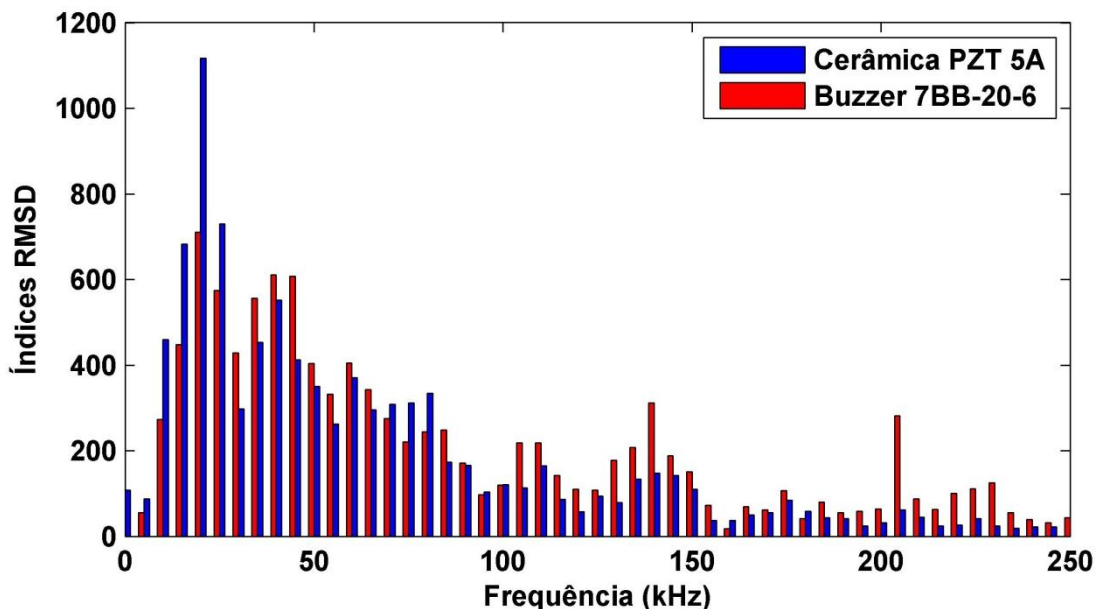
Em baixa frequência há semelhança nos picos de ressonância e nas tendências das assinaturas, porém em alta frequência apresentam assinaturas significativamente diferentes. Em altas frequências, apenas o diafragma 7BB-20-6 apresentou picos de ressonância visíveis. Em geral proporcionou uma assinatura de impedância com picos

mais pronunciados do que os outros. O diafragma 7BB-35-3 (o maior diafragma) produziu os picos menos pronunciados. Segundo Almeida (2014) as amplitudes dos picos de ressonância variam de transdutor para transdutor e dependem do material e do tamanho, não indicando uma maior ou menor sensibilidade para a detecção de dano. Por isso é importante observar que picos de ressonância mais elevados e mais pronunciados das assinaturas de impedância dos transdutores não servem de base para indicar sua sensibilidade ao dano. Assim, o mais comum é utilizar os índices de dano (RMSD e CCDM), pois comparam a variação entre duas assinaturas de impedância, sendo uma delas adotada como referência (*baseline*), sem dano. Neste trabalho os índices foram calculados em subfaixas de 5 kHz nas faixas de frequência de 0 a 250 kHz (para observação dos comportamentos em baixa frequência) e 250 a 500 kHz (para observação dos comportamentos em altas frequências).

4.2.1 RMSD

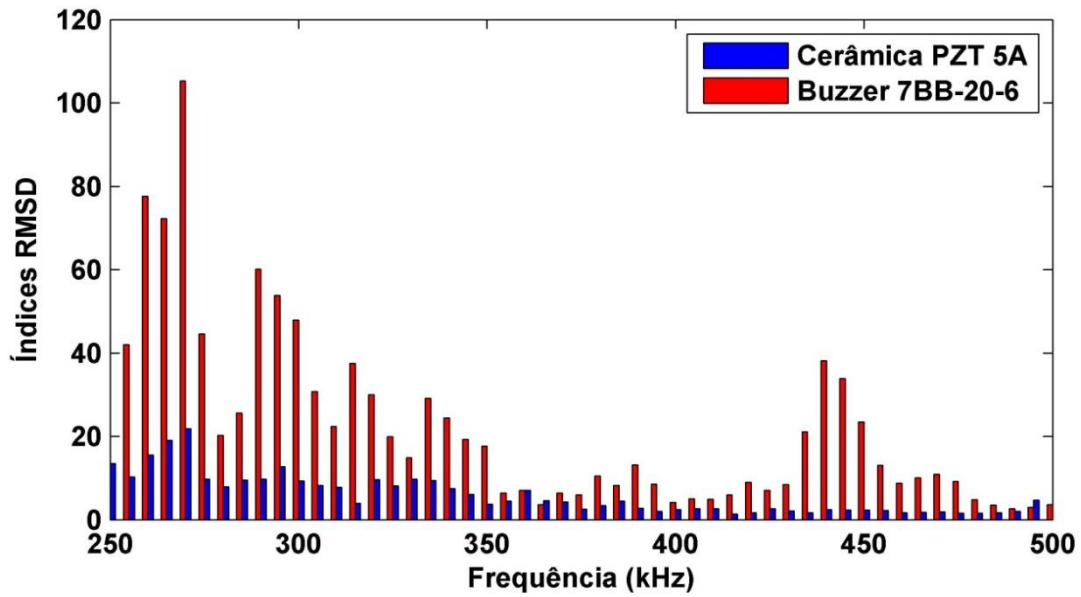
Os índices RMSD obtidos para a cerâmica convencional e o diafragma 7BB-20-6 são apresentados nas Figuras 24 e 25.

Figura 24: Índices RMSD obtidos para cerâmica convencional e diafragma 7BB-20-6 (análise nas baixas frequências).



Fonte: Elaborado pelo autor

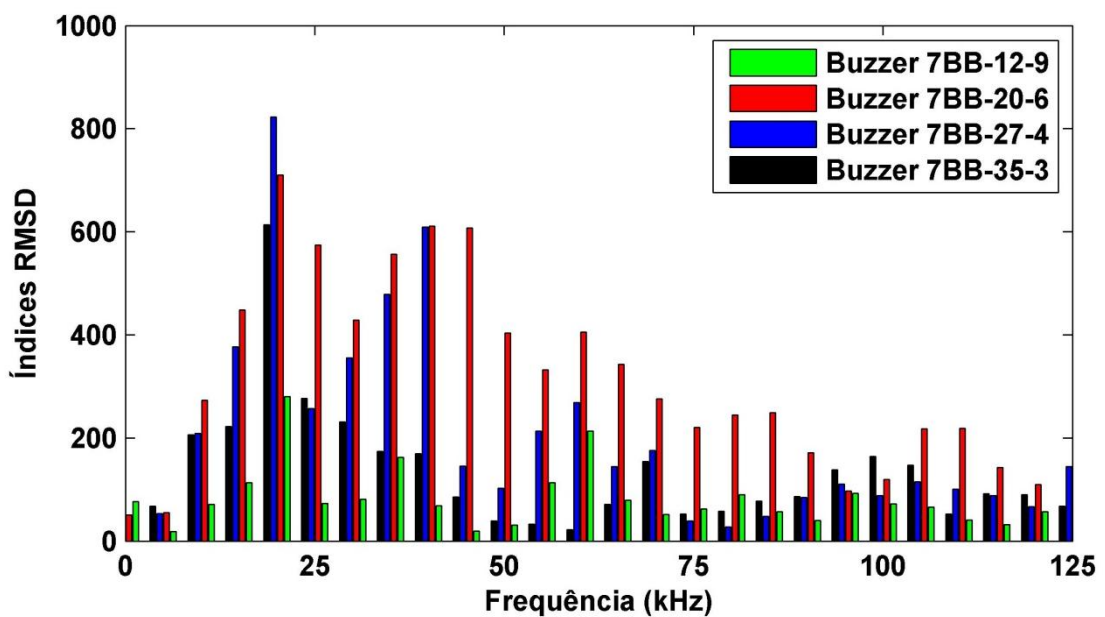
Figura 25: Índices RMSD obtidos para cerâmica convencional e diafragma 7BB-20-6 (análise nas altas frequências).



Fonte: Elaborado pelo autor

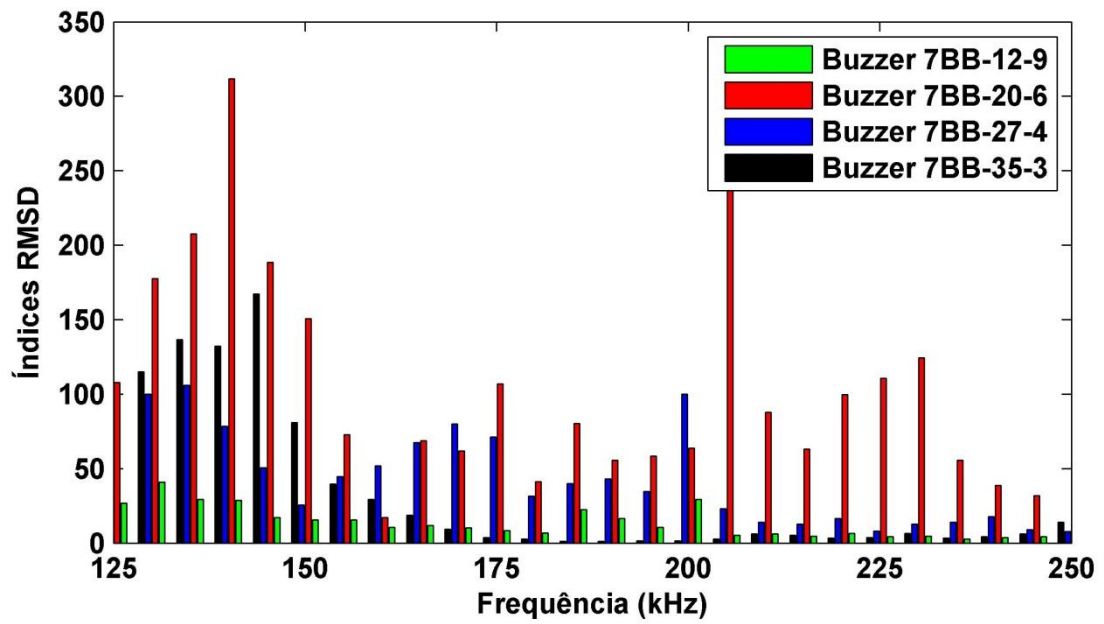
De acordo com a Figura 24, a cerâmica convencional apresenta, em média, índices mais elevados em baixas frequências de até 30 kHz. A partir desse valor de frequência o diafragma apresenta índices mais elevados que a cerâmica convencional, sendo bem significativo em frequências elevadas acima de 250 kHz conforme mostra a Figura 25. Nas Figuras 26 a 29 são apresentados os resultados para os diafragmas de tamanhos diferentes.

Figura 26: Índices RMSD obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise frequências até 125 kHz).



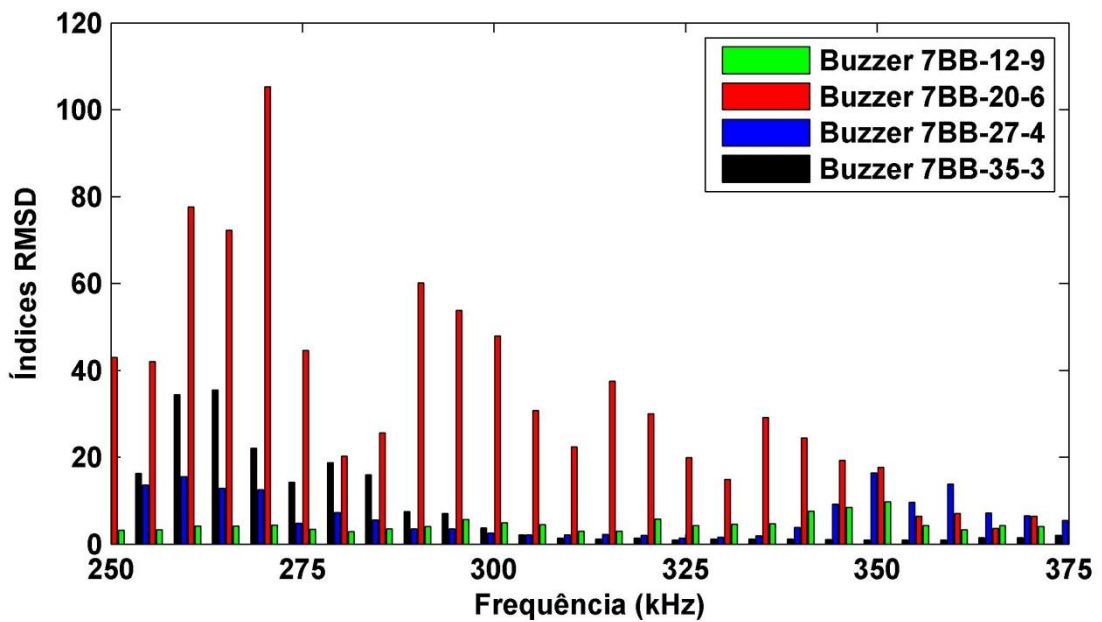
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27: Índices RMSD obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 125 a 250 kHz).



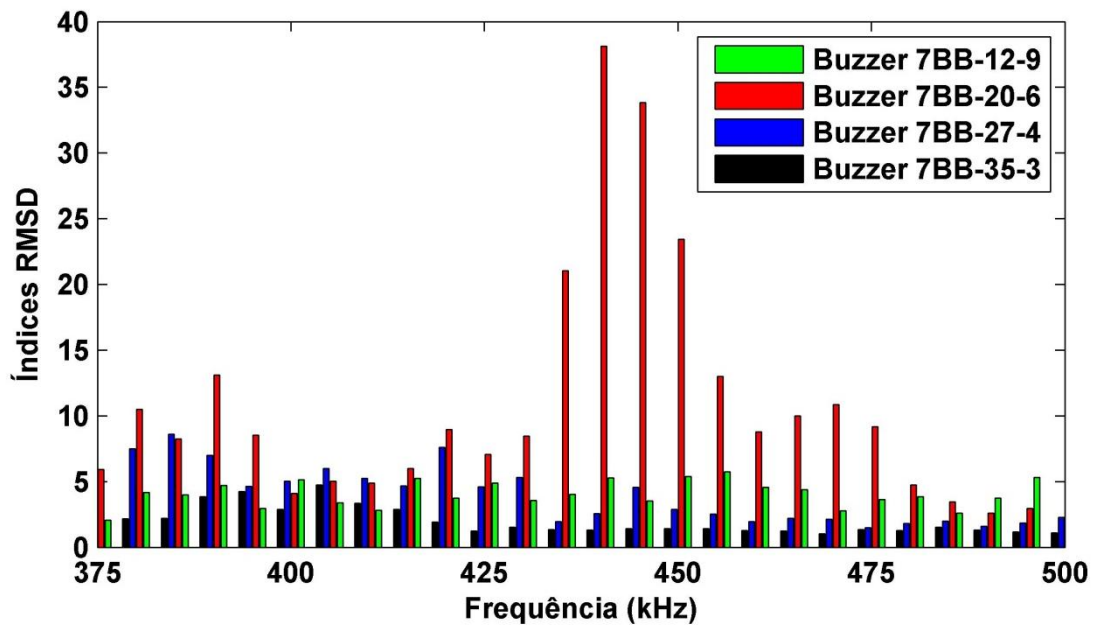
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28: Índices RMSD obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 250 a 375 kHz).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29: Índices RMSD obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 375 a 500 kHz).



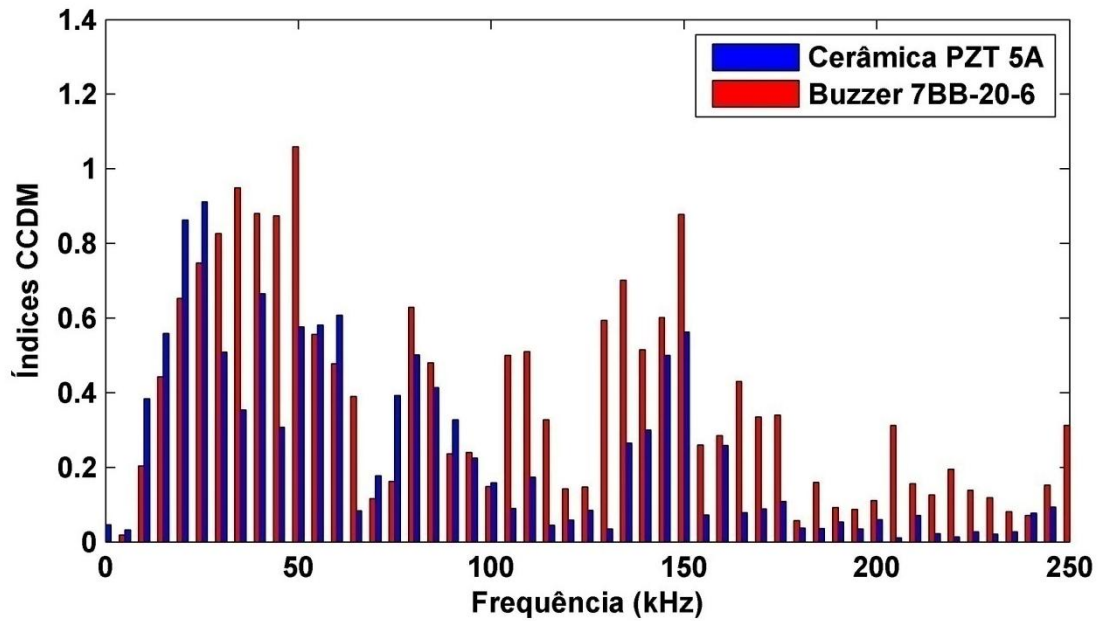
Fonte: Elaborado pelo autor

Como mostrado nas Figuras 26 a 29, entre os diafragmas diferentes analisados, o 7BB-20-6 apresenta o maior índice RMSD ao longo de quase toda a gama de frequências, exceto em algumas sub-bandas e em baixas frequências, em que o diafragma 7BB-27-4 mostra um índice superior. De um modo geral, os diafragmas 7BB-12-9, 7BB-27-4 e 7BB-35-3 apresentam, em média, índices inferiores aos obtidos com o diafragma 7BB-20-6. Esses resultados são consistentes com os PSDs mostrados na Figura 19 da seção anterior.

4.2.2 CCDM

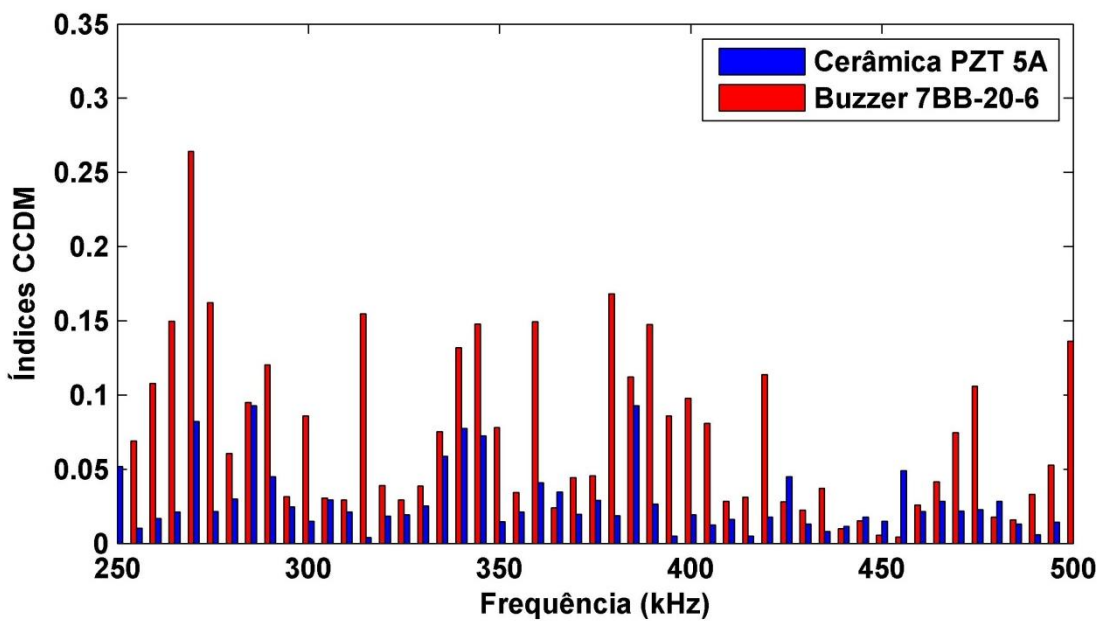
Os índices CCDM obtidos para a cerâmica convencional e o diafragma 7BB-20-6 são apresentados nas Figuras 30 e 31.

Figura 30: Índices CCDM obtidos para cerâmica convencional e o diafragma 7BB-20-6 (análise nas baixas frequências).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31: Índices CCDM obtidos para cerâmica convencional e o diafragma 7BB-20-6 (análise nas altas frequências).

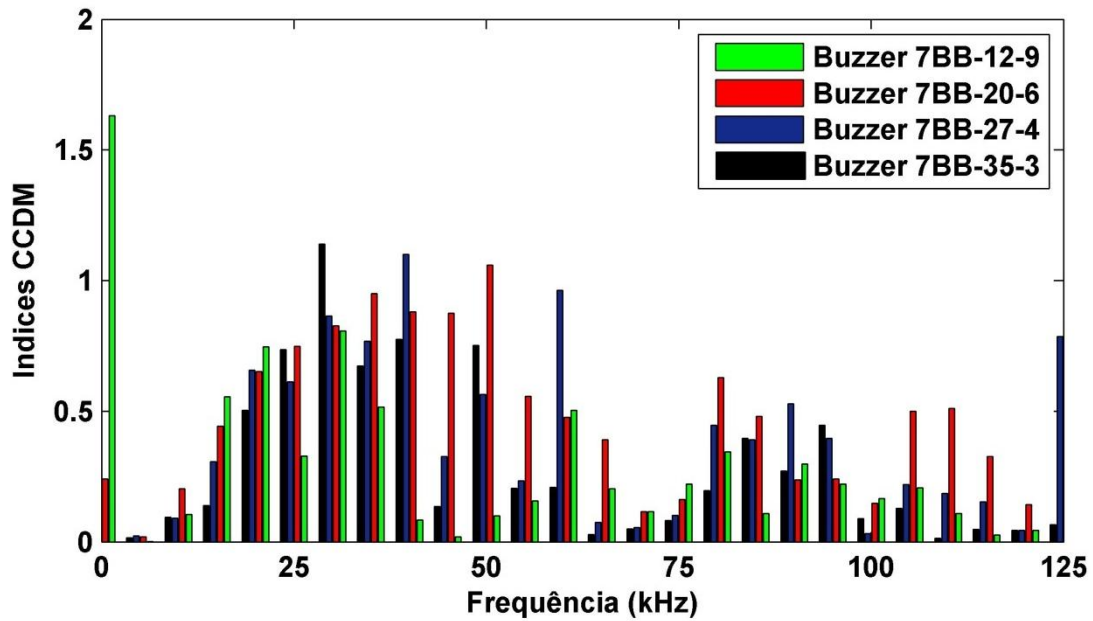


Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar na Figura 30 que a cerâmica convencional continua a apresentar, em média, índices mais elevados em baixas frequências até 30 kHz e menores ao longo de quase toda a gama da frequência analisada. Ao contrário da cerâmica, o diafragma 7BB-20-6 apresenta índices mais elevados à medida que a frequência aumenta

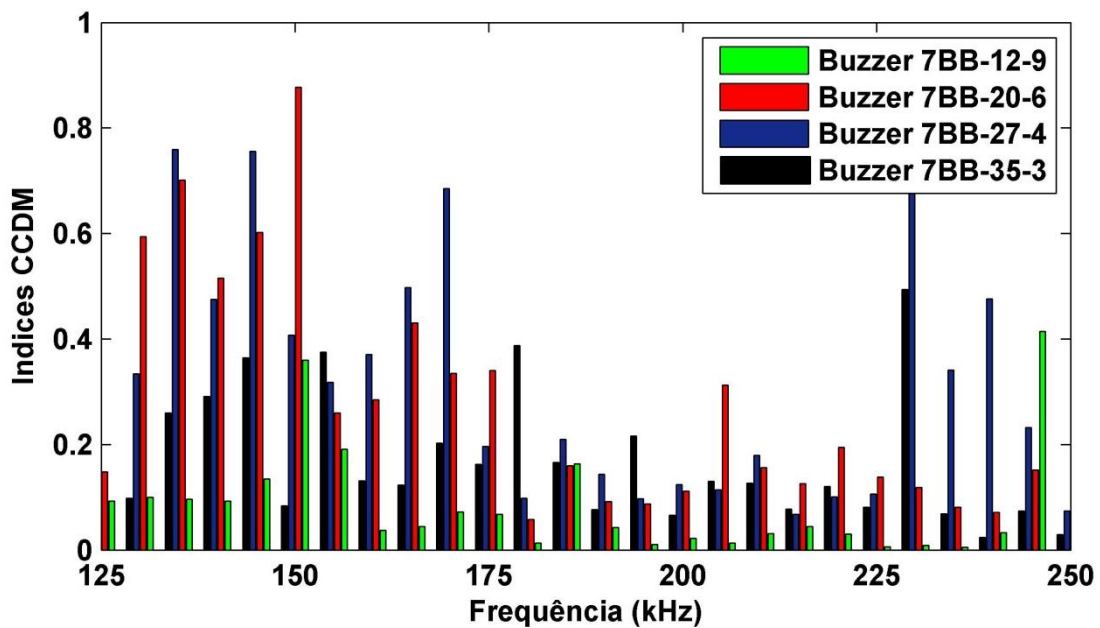
conforme mostra a Figura 31. Os resultados se mostram consistentes com os índices RMSD e as PSDs obtidas anteriormente. As Figuras de 32 a 35 mostram os resultados para os diafragmas de tamanhos diferentes.

Figura 32: Índices CCDM obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 0 a 125kHz)



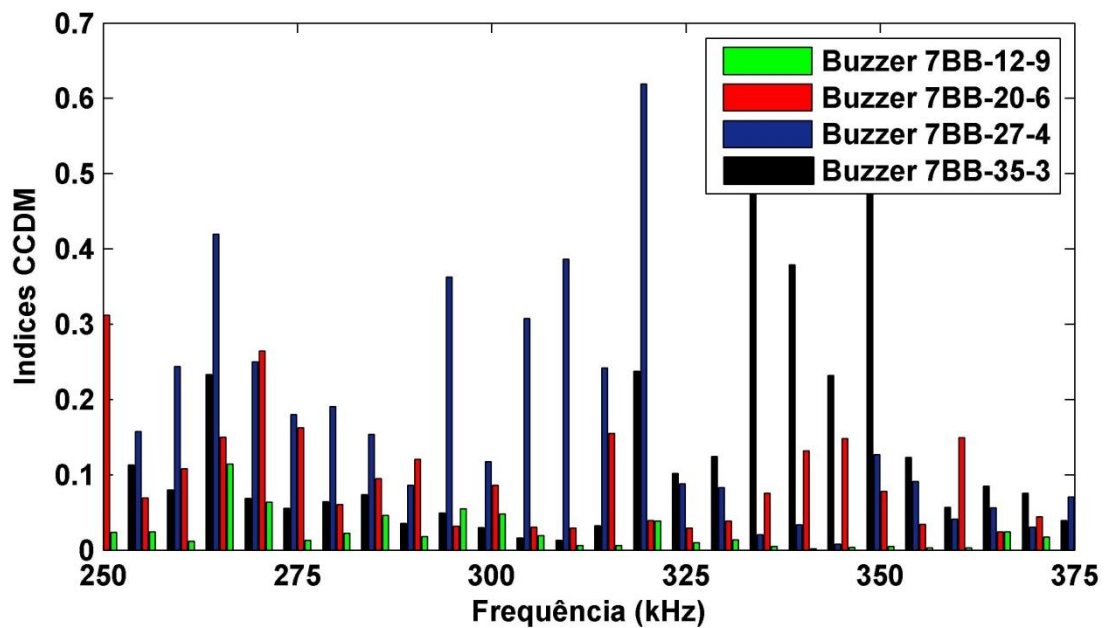
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33: Índices CCDM obtidos para diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 125 a 250kHz)



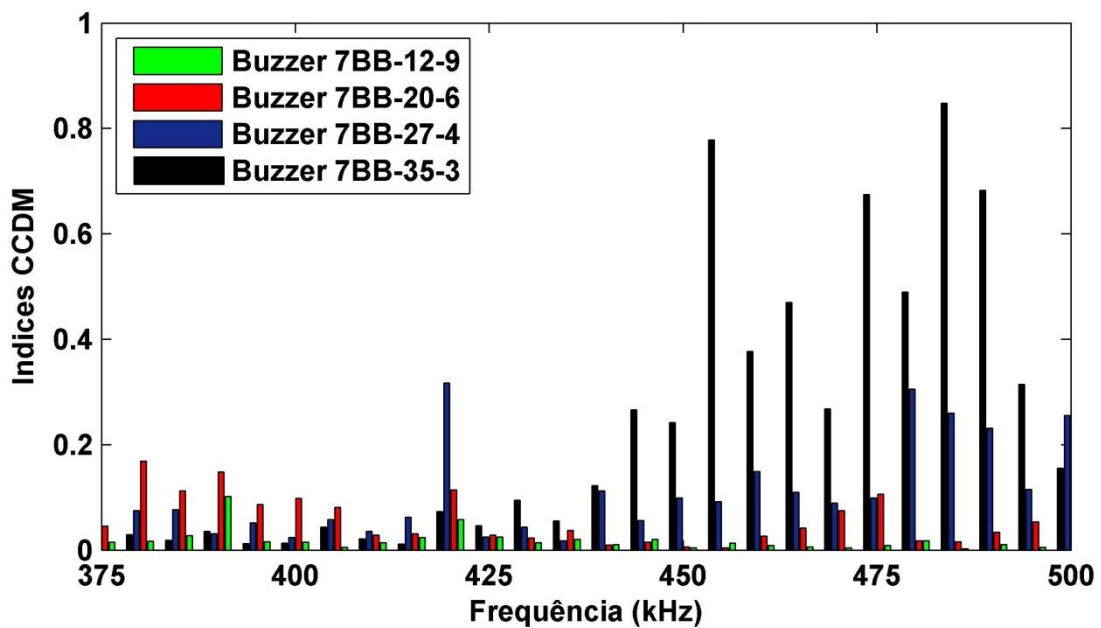
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34: Índices CCDDM obtidos para cerâmica diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 250 a 375kHz).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35: Índices CCDDM obtidos para cerâmica diafragmas de tamanhos diferentes (análise para frequências de 375 a 500kHz)



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se nas Figuras de 32 a 35, que entre os diafragmas analisados, o 7BB-20-6 e o 7BB-27-4 apresentam índices maiores ao longo de quase toda a gama de frequências com exceções em algumas faixas. Os diafragmas 7BB-12-9 e 7BB-35-3 apresentam, em geral, índices inferiores se comparados aos obtidos com os diafragmas 7BB-20-6 e

7BB-27-4 com poucas exceções. Os resultados obtidos também se mostram bem similares com os obtidos com os índices RMSD e com os PSDs.

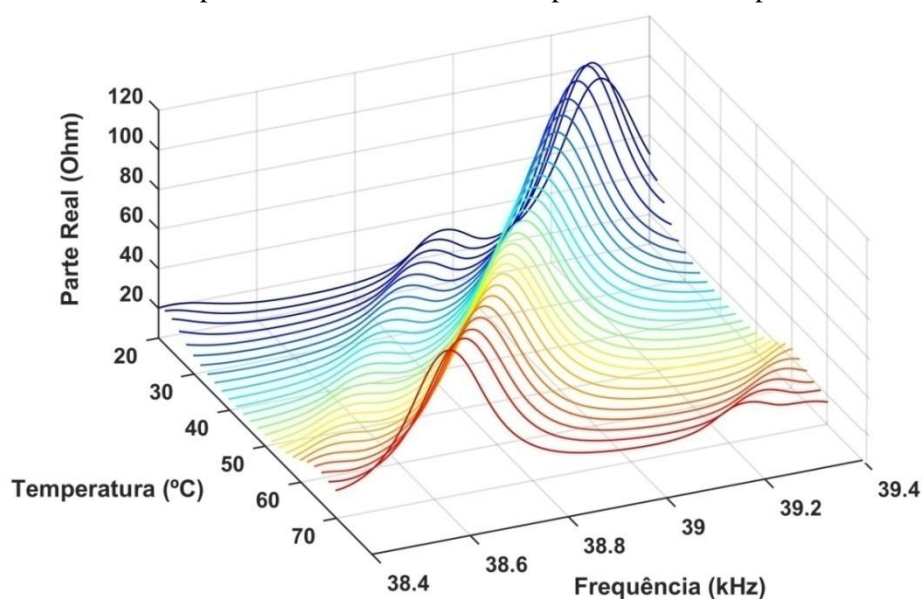
Como mencionado anteriormente, o método da Impedância E/M é susceptível a variações de temperatura, por isso foram avaliados esses efeitos de temperatura e os resultados são apresentados na próxima seção.

4.3 Avaliação dos efeitos de temperatura

As variações de temperatura causam mudanças, tanto na frequência como na amplitude dos picos de ressonância das assinaturas de impedância elétrica. Para analisar e comparar esses efeitos sobre as assinaturas obtidas dos transdutores estudados foram feitas medições com temperaturas variando de 20 a 70 °C com passos de 2 °C, de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 3.

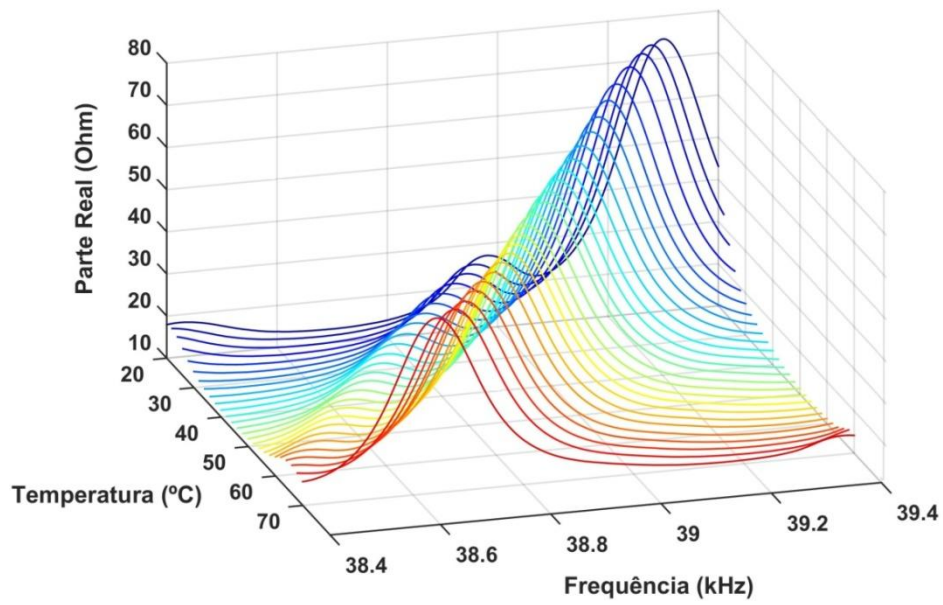
Os resultados obtidos a partir da cerâmica convencional foram comparados com os resultados do diafragma 7BB-20-6, que tem um elemento piezelétrico e dimensões semelhantes às da cerâmica. As variações na frequência e amplitude são observadas em toda faixa de frequência, mas para exemplificação são apresentados os resultados para o pico de ressonância que está compreendido entre 38 e 39 kHz. As partes reais das assinaturas de impedância obtidas a partir da cerâmica convencional e do diafragma 7BB20-6 são mostradas nas Figuras. 36 e 37, respectivamente. Os resultados obtidos para os diafragmas de tamanhos diferentes são apresentados nas Figuras 38 a 40.

Figura 36: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para Cerâmica PZT 5A.



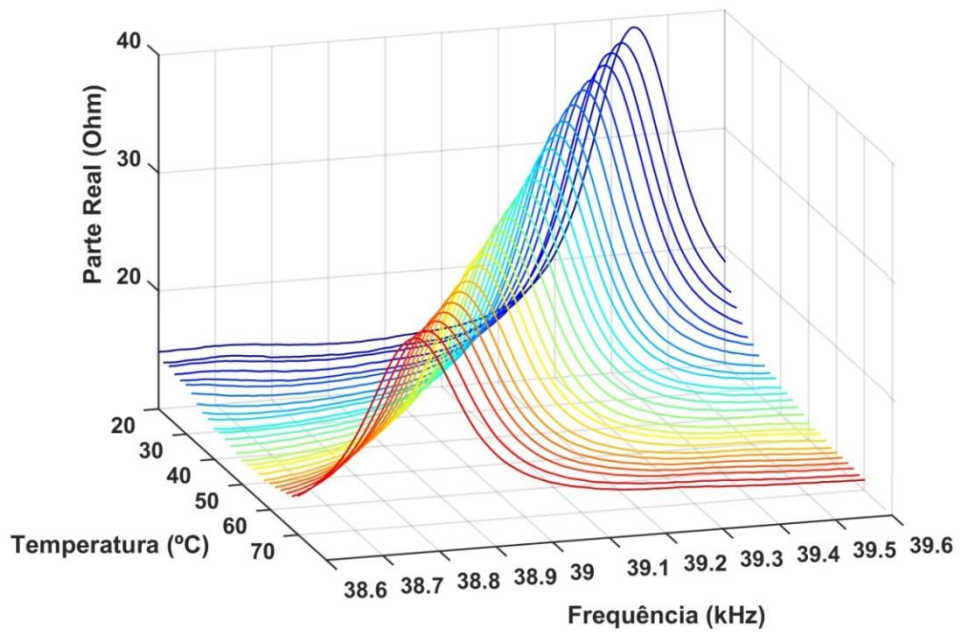
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 37: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para *Buzzer 7BB-20-6*.



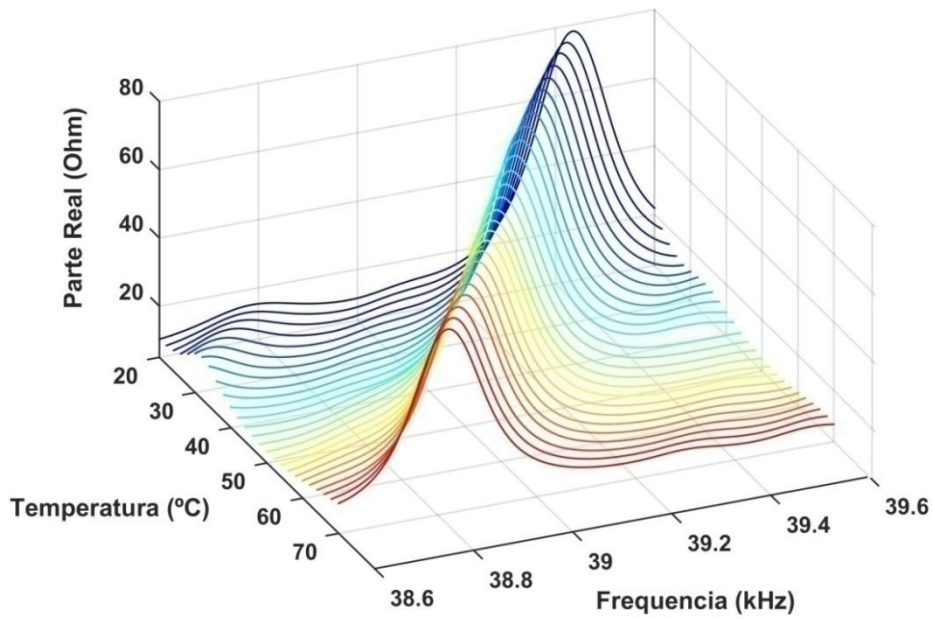
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para *Buzzer 7BB-12-9*.



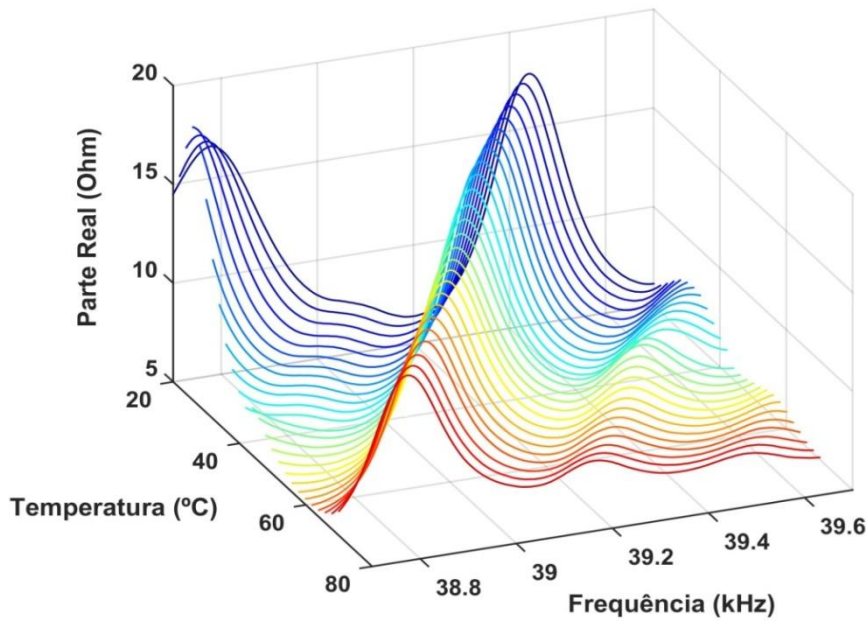
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para *Buzzer 7BB-27-4*.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40: Efeitos de temperatura nas assinaturas de impedância obtidas para *Buzzer 7BB-35-3*.



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com as Figuras 36 e 37, as mudanças na frequência e amplitude são semelhantes para os dois transdutores. À medida que a temperatura aumenta, a amplitude e a frequência dos picos de ressonância diminuem. A variação de frequência quando a temperatura aumenta de 20 ° C a 70 ° C é de -700 Hz para a cerâmica convencional e -690 Hz para o diafragma. Com relação à amplitude dos picos, a

variação máxima é de aproximadamente -23Ω (- 24%) para a cerâmica e aproximadamente -10Ω (-13%) para o diafragma.

Na faixa de temperatura de 20 a 24 ° C, os desvios em frequência e amplitude são mais uniformes nas assinaturas obtidas do diafragma do que nas assinaturas da cerâmica convencional. Mudanças uniformes com variação de temperatura são desejáveis em alguns métodos de compensação (Baptista *et al.*, 2014, Park *et al.*, 2003).

Os resultados obtidos a partir dos outros diafragmas são semelhantes aos do diafragma 7BB-20-6. Os deslocamentos são igualmente uniformes no que diz respeito à variação de temperatura. A frequência máxima e mudanças de amplitude foram -620 Hz e -35% para os diafragmas 7BB-12-9 e 7BB-27-4, e -610 e -44% Hz para o diafragma 7BB-35-3.

Somado aos efeitos de temperatura, é importante também considerar a reprodutibilidade das assinaturas de impedância obtidas a partir dos diafragmas piezelétricos e da cerâmica. Os resultados dos testes de reprodutibilidade de longo prazo são apresentados na próxima seção.

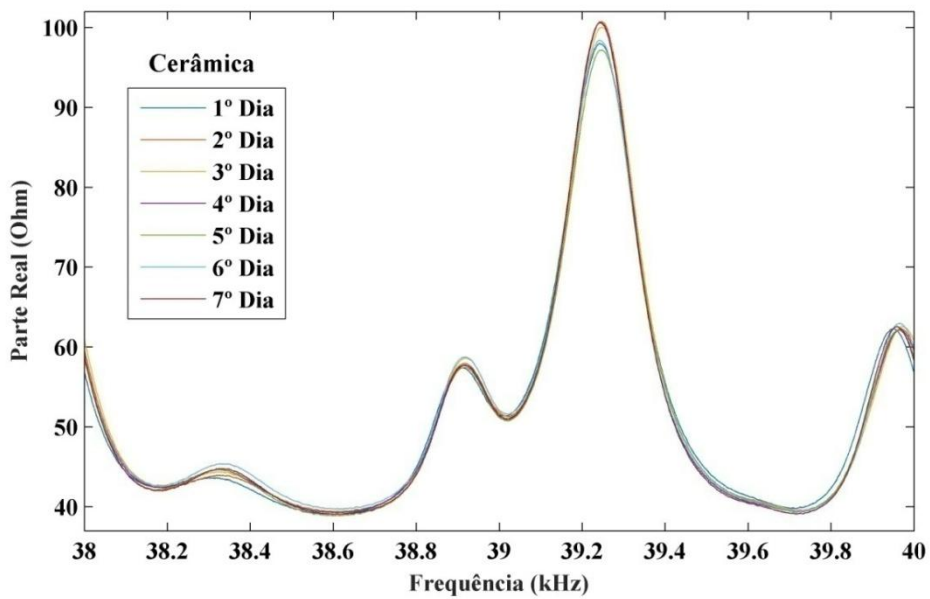
4.4 Avaliação da reprodutibilidade de longo prazo

Uma vez que a detecção de danos no método da Impedância E/M é normalmente baseada numa comparação de duas assinaturas de impedância, sendo que uma delas é usada como referência (*baseline*), o sistema de medição e os transdutores piezelétricos devem ser capazes de proporcionar uma boa reprodutibilidade das assinaturas de impedância. Para analisar a reprodutibilidade, as assinaturas de impedância dos transdutores (*buzzer* 7BB-20-6 e cerâmica) foram medidas nas estruturas integras (sem dano) a cada 24 horas a uma temperatura de 20 °C durante uma semana. As medidas foram feitas obedecendo rigorosamente o horário e a temperatura foi controlada por um aparelho de ar condicionado. Foram comparadas as assinaturas da cerâmica convencional com o diafragma 7BB-20-6. Para avaliar a reprodutibilidade entre as assinaturas de impedância, foi calculado o índice RMSD para cada assinatura tomando como referência a primeira medida. Os índices foram calculados na faixa de 38-40 kHz. Como a estrutura utilizada estava em um estado considerado íntegro, são esperados baixos índices de dano, o que indica boa reprodutibilidade entre as assinaturas.

A parte real das assinaturas de impedância obtidas a partir da cerâmica convencional e o diafragma 7BB-20-6 para as medições realizadas durante uma semana

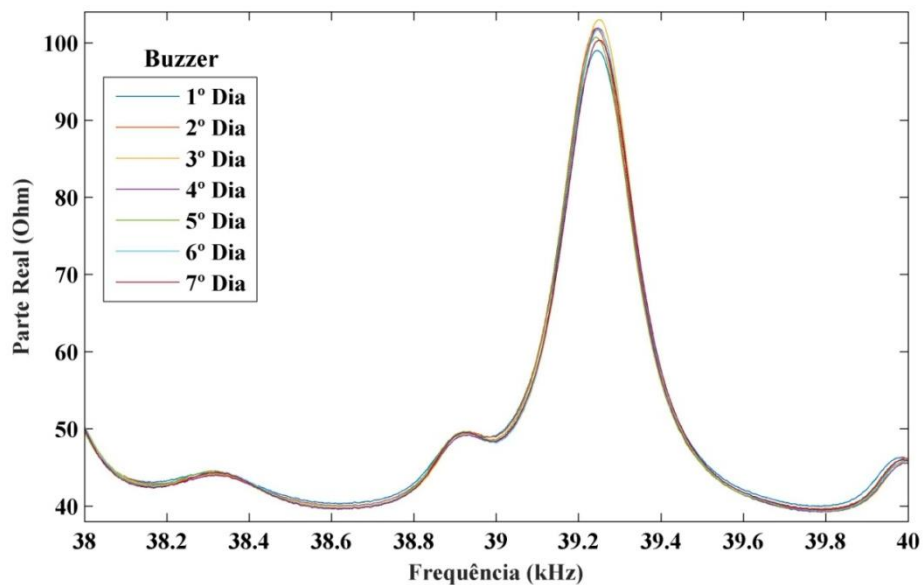
são mostrados nas Figuras 41 e 42 respectivamente. Foi selecionada uma faixa de frequência estreita para melhor visualização e comparação entre as assinaturas. Os dois transdutores proporcionaram uma boa reprodutibilidade, apesar de apresentarem pequenas variações. No entanto, estas variações são pequenas e semelhantes entre os dois transdutores.

Figura 41: Parte real das assinaturas de impedância obtidas a partir da cerâmica c convencional para medições realizadas durante uma semana.



Fonte: Elaborado pelo autor

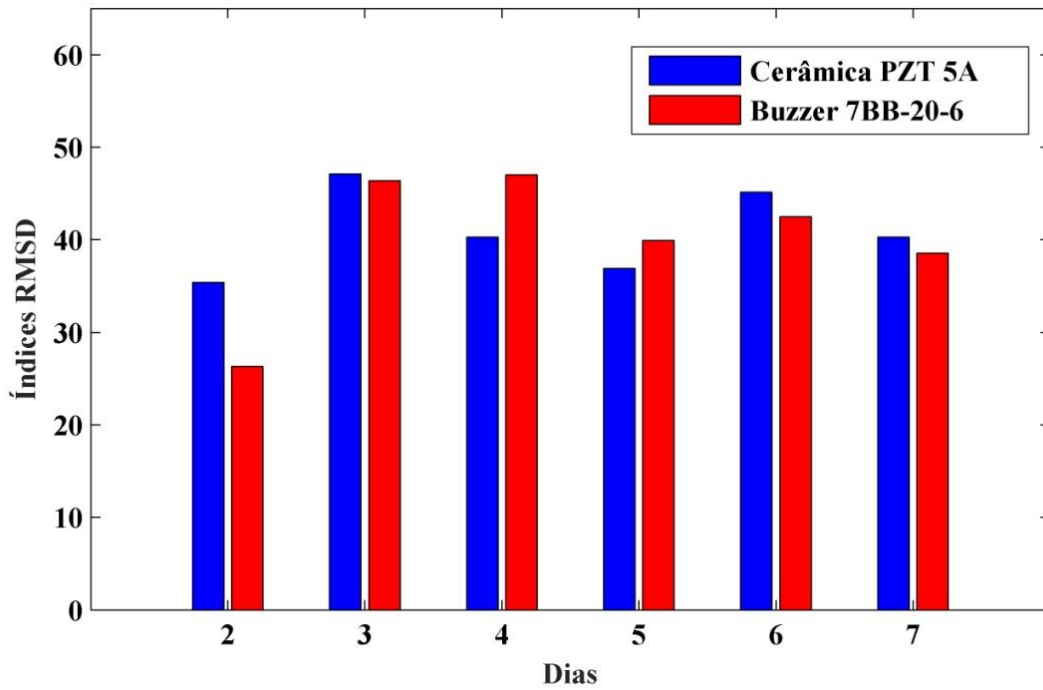
Figura 42: Parte real das assinaturas de impedância obtidas a partir do diafragma 7BB-20-6 para medições realizadas durante uma semana.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para proporcionar uma comparação mais efetiva entre os dois transdutores foi feito o cálculo do índice RMSD que pode ser observado na Figura 43.

Figura 43: Índices RMSD obtidos a partir da cerâmica convencional e o diafragma 20-6-7BB para as medições realizadas durante uma semana.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os índices obtidos a partir dos dois transdutores para a estrutura íntegra são baixos em comparação com os índices obtidos para a estrutura danificada na mesma faixa de frequência. Para uma comparação dos índices dos dois transdutores observou-se a Figura 24 e comparou-se os resultados com a Figura 43. Observa-se que para a estrutura danificada, os índices RMSD foram maiores do que 700 na mesma faixa de frequência, ao passo que para a estrutura íntegra os índices foram inferiores a 50, mesmo depois de uma semana de testes. Isso indica uma boa reprodutibilidade dos resultados. É importante citar que em termos práticos, uma semana de análise não é razoável em termos de degradação dos sensores, porém como o ambiente é controlado, entende-se que essa variável tenha um impacto minimizado.

Conclusão

Neste estudo foi apresentada uma análise experimental da viabilidade da utilização de diafragmas piezelétricos para a detecção de danos estruturais com base no método da impedância eletromecânica. Os resultados experimentais indicaram que os diafragmas são capazes de detectar danos estruturais e tem comportamento semelhante ao da cerâmica de PZT.

Na avaliação pelo método PLB, pode-se perceber claramente que as PSDs dos quatro diafragmas têm tendências semelhantes à PSD da cerâmica de PZT com pequenas variações na amplitude em toda faixa de frequência analisada. O diafragma 7BB-20-6 com dimensões bem próximas à da cerâmica de PZT se comportou de forma muito similar e por isso de acordo com as condições experimentais usadas neste estudo, pode se afirmar que um diafragma com elemento ativo de dimensão semelhante tem resposta em frequência similar. Como o teste do PLB serve para estimar a sensibilidade do transdutor na detecção de dano, pode-se dizer também que pelos comportamentos semelhantes os diafragmas apresentam boa sensibilidade na detecção de dano utilizando a técnica da Impedância E/M.

Para uma melhor caracterização desses diafragmas utilizou-se os índices RMSD e CCDM gerados a partir das assinaturas de impedância dos transdutores envolvidos com dano e sem dano. Esse procedimento é necessário porque pode quantificar melhor as variações nas assinaturas de impedância mediante o aparecimento de um dano na estrutura que está sendo monitorada. Os resultados obtidos para as assinaturas de impedância mostraram que a forma e a tendência para os transdutores se assemelham muito, principalmente quando se observam os picos de ressonância. Porém foi através dos índices de dano que foi possível observar que a cerâmica tem índices mais elevados em baixas frequências e que o diafragma 7BB-20-6 tem índices mais elevados para altas frequências. Com isso pode se afirmar que a cerâmica é mais sensível ao dano em baixas frequências e o diafragma é mais sensível ao dano nas altas frequências.

Na avaliação do comportamento dos diafragmas perante variações de temperatura, observou-se pelos resultados gráficos que os comportamentos continuaram muito semelhantes. Foi muito perceptível as mudanças na frequência e amplitude dos picos de ressonância das assinaturas de impedância dos diafragmas em comparação com as mudanças ocorridas na cerâmica de PZT. Isso caracterizou ainda mais o comportamento

dos diafragmas, pois mesmo realizando experimentos diferentes, o comportamento continuou igual.

Para fechar o ciclo de experimentos, a reprodutibilidade de longo prazo demonstrou que mesmo com tantas variações em se tratando de ambiente, temperaturas e outros agentes que poderiam interferir diretamente no comportamento dos transdutores, foi possível obter resultados reprodutíveis.

Portanto, este estudo contribui para o uso de diafragmas piezelétricos, que tem um custo muito baixo se comparado à cerâmica de PZT. Em termos de projetos para monitoramento de vastas áreas, a diferença de custos será extremamente significativa quando se optar por utilizar diafragmas ao invés de cerâmica. Assim, os resultados apresentados neste estudo não apenas permitem o uso de transdutores piezelétricos com custo muito baixo, mas também facilitam o acesso à pesquisa da técnica da impedância eletromecânica, uma vez que tais dispositivos são facilmente encontrados. No entanto, é importante citar que estes resultados são válidos de acordo com as condições experimentais usadas neste estudo, e, portanto, para outros tipos de aplicações são necessárias pesquisas mais específicas.

Sugestão para trabalhos futuros

- Realizar uma análise teórica mais sólida abrangendo as principais características e comportamentos desse transdutor aplicados aos sistemas SHM utilizando a técnica da Impedância E/M.
- Embora os resultados indiquem que os *buzzers* tenham desempenho semelhante às cerâmicas convencionas de PZT, esses componentes ainda carecem de uma análise mais criteriosa e caracterização apropriada. Isso leva em consideração que neste trabalho e em praticamente todos os trabalhos recentemente consultados, o modelo eletromecânico utilizado para o *buzzer* se baseia no modelo desenvolvido para a cerâmica de PZT. Por isso a sugestão é desenvolver um modelo eletromecânico apropriado para o *buzzer* que contemple todas as suas características como, por exemplo, sua base de latão e sua forma circular.
- Outras sugestões são as análises de formas de acoplamento diferentes, análises em estruturas maiores e de materiais diferentes, ou ainda utilizando sinais de excitação de diferentes tipos ou amplitudes.

Referências Bibliográficas

ABDELRAHMAN, M.; ELBATANOUNY, M. K.; ZIEHL, P. H. Acoustic emission based damage assessment method for prestressed concrete structures: Modified index of damage. **Engineering Structures**, v. 60, p. 258–264, 2014.

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.; RIZZO, P. Influence of the excitation frequency in the electromechanical impedance method for SHM applications. In: **Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems**, 2009, San Diego. *Proceedings...* San Diego: SPIE, 2009. v. 7293. (Artigo, 30).

ANNAMDAS, V.G.M.; SOH, C.K. Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v.21, p. 41-59, 2010. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X09352816>

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: Phys.** v.226, p. 69–75, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.018>

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.14, p. 1208-1227, 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/s140101208>

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>

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE. In: **International Conference On Smart Materials Structures and Systems**, 2002, Bangalore. *Proceedings...* Bangalore: SPIE, 2003. v. 5062, p. 263-269.

BUSCH-VISHNIAC, I. J. Electromechanical sensors and actuators: mechanical engineering series. Berlin: **Springer**, p. 341, 1998.

CAWLEY, P. The impedance method of non-destructive inspection. **NDT International**, v. 17, n. 2, p. 59-65, 1984.

CHANG, K.-T.; CHIANG, H.-C.; LEE, C.-W. Design and implementation of a piezoelectric clutch mechanism using piezoelectric buzzers, **Sens. Actuators A: Phys.** v.141, p. 515–522, 2008 <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2007.10.018>.

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.

DA SILVA, S.; GONSALEZ, C. G.; LOPES JUNIOR, V. Adaptive filter feature identification for structural health monitoring in an aeronautical panel. **Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 5, p. 481-489, 2011.

DUCHARNE, B.; GARBUIO, L.; LALLART, M.; GUYOMAR, D.; SEBALD, G.; GAUTHIER, J. Nonlinear technique for energy exchange optimization in piezoelectric actuators. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, n. 8, p. 3941- 3948, 2013.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Phil. Trans. R. Soc. A**, v. 365, n. 1851, p. 303-315, 2007.

FREITAS, E.S.; BAPTISTA, F.G. An initial study of commercial piezoelectric diaphragms for damage detection based on the electromechanical impedance principle, In: **2st International Electronic Conference On Sensors And Applications**, 2015, Sciforum. *Proceedings...* Sciforum, 2015, p. 1–6. <http://dx.doi.org/10.3390/ecsa-2-E010>.

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.

GONSALEZ, C.G.; SILVA, S.; BRENNAN, M.J.; LOPES JR, V. Structural damage detection in an aeronautical panel using analysis of variance, **Mech. Syst. Signal Proc.** v.52–53, p. 206–216, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.04.015>.

GORGIN, R.; WU, Z.; GAO, D.; WANG, Y. Damage size characterization algorithm for active structural health monitoring using the A0 mode of Lamb waves. **Smart Materials and Structures**, v. 23, n. 3, p. 035015.1- 035015.9, 2014.

GUIFFARD B.; GUICHON, Y.; GUNDEL, H.W.; Commercial piezoelectric unimorph diaphragm as a magnetic energy harvester, **Electron. Lett.** v.48, p. 1196–1198, 2012. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6317234>.

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.

HAN, Q.; XU, J.; CARPINTERI, A. Localization of acoustic emission sources in structural health monitoring of masonry bridge, **Structural Control and Health Monitoring**, v.22, p. 314- 329, 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/stc.1675>

HARIK, I.; PEIRIS, A. Case Studies of Structural Health Monitoring of Bridges. **Nondestructive Testing of Materials and Structures**, v. 6, p. 1007-1013, 2013.

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.

INMAN, D. J.; FARRAR, C. R.; LOPES JR., V. AND STEFFEN JR., V. (2005). Damage Prognosis: For Aero-space, Civil and Mechanical Systems. **John Wiley & Sons, Ltd.** Chichester.

LAMBERTI, N.; CALIANO, G.; SAVOIA, A.S. ACUPAD: a track-pad device based on a piezoelectric bimorph, **Sens. Actuators A: Phys.** v.222, p. 130–139, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2014.10.031>.

LI, F.; PENG, H.; MENG, G. Quantitative damage image construction in plate structures using a circular PZT array and lamb waves, **Sensors and Actuators A: Phys.** v.214 p. 66–73, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2014.04.016>

LI, H-N.; REN, L.; JIA, Z-G.; YI, T-H. AND LI, D. S. (2015). State-of-the-art in Structural Health Monitoring of Large and Complex Civil Infra-structures. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, published online before print, Apr. 2015, p. 1-14. DOI: 10.1007/s13349-015-0108-9.

LIANG, R.; WANG, Q. High sensitivity piezoelectric sensors using flexible PZT thick-film for shock tube pressure testing, **Sens. Actuators A: Phys.** v.235, p. 317–327, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.09.027>.

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.; ROSIEK, M. Electromechanical impedance method, in: T. Stepinski, T. Uhl, W. Staszewski (Eds.), **Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications**, **John Wiley & Sons**, Chichester, United Kingdom, p. 141-176, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118536148.ch6>

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

MOU, S. Analytical design of the optimal driving location for a novel ultrasonic actuator by zone-energy method, **Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.** v.4, p. 3937–3942, 2012. <http://maxwellsci.com/jp/abstract.php?jid=RJASET&no=224&abs=12>.

MOURA JUNIOR, J. R. V.; STEFFEN JUNIOR, V. Avaliação das bandas de frequência para o método de monitoramento estrutural baseado em Impedância. In: *Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-Posmec*, 13., 2003, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: FEMEC/UFU, 2003.

MOUSSELMAL, H. D.; COTTINET, P. J.; QUIQUEREZ, L.; REMAKI, B.; PETIT, L. A multi-axial piezoelectric energy harvester. In: **Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems**, 2013, San Diego, Proceedings... San Diego: SPIE, 8688, 2013.

MURATA MANUFACTURING. Piezoelectric sound components. Disponível em: <<http://www.murata.com>>. Acessado em 15 de Dezembro de 2015.

NA, S.; TAWIE, R.; LEE, H. K. Electromechanical impedance method of fiber-reinforced plastic adhesive joints in corrosive environment using a reusable piezoelectric device. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 23, n. 7, p. 737-747, 2012.

NA, S.; LEE, H.K. A multi-sensing electromechanical impedance method for nondestructive evaluation of metallic structure. **Smart Materials and Structure**, v. 22, n.9, p. 1-8, 2013.

OOJJEVAAR, T.H.; WARNET, L.; LOENDERSLOOT, R.; AKKERMAN, R.; BOER, A. Vibration based damage identification in a composite t-beam utilising low cost integrated actuators and sensors, in: **Sixth European Workshop On Structural Health Monitoring**, 2012, Dresden, Germany, Proceedings... Germany, p. 232-239, 2012. <http://purl.utwente.nl/publications/80765>.

OSTACHOWICZ, W.; GÜEMES, J. A. New trends in structural health monitoring. Vienna: **Springer** Vienna, 434 p., 2013.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring of civil structural components. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 6, n. 4, p. 153-160, 2000.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, v. 30, n. 10, p. 1463-1474, 2001.

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>

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.

PEAIRS, D. M.; TARAZAGA, P. A.; INMAN, D. J. Frequency range selection for impedance-based structural health monitoring. **Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v.129, n. 6, p. 701-719, 2007.

PIEZO SYSTEMS, INC. Piezoceramic Materials & Properties. Disponível em: <<http://www.piezo.com>>. Acessado em 15 de Dezembro de 2015.

ROAKIS, J. E MANOLAKIS, D. (1996). Digital signal processing: principles, algorithms, and applications. **Prentice Hall**, New Jersey

ROACH, D. Real time crack detection using mountable comparative vacuum monitoring sensors, **Smart Structures and Systems**, v.5 p. 317-328, 2009. http://smsystems.com.au/_content/documents/686.pdf

ROCHA, B.; SILVA, C.; KEULEN, C.; YILDIZ, M.; SULEMAN, A. Structural health monitoring of aircraft structures, **New Trends in Structural Health Monitoring**, W. Ostachowicz, J. Güemes (Eds.), 434 p., 2013.

RULLI, R. P.; DOTTA, F.; DA SILVA, P. A. Flight tests performed by EMBRAER with SHM systems. **Key Engineering Materials**, v. 558, p. 305-313, 2013.

SARKER, M. R.; ALI, S. H M.; OTHMAN, M.; ISLAM, S. Designing a battery-less piezoelectric based energy harvesting interface circuit with 300 mv startup voltage. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 431, Conference 1, 2013.

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

SOUZA, P.R.; NOBREGA, E.G.O. A fault location method using lamb waves and discrete wavelet transform, **J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.** v.34, p. 515–524, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782012000400013>.

Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, **ASTM Standard E976-10**, 2010. <http://dx.doi.org/10.1520/E0976-10>

STEPINSKI, T.; UHL, T.; STASZEWSKI, W. Electromechanical impedance method. **Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications**, Ch6, **John Wiley & Sons**, Ltd, Chichester, 2013.

SUN, Z.; ROCHA, B.; WU, K.; MRAD, N. A methodological review of piezoelectric based acoustic wave generation and detection techniques for structural health monitoring. **International Journal of Aerospace Engineering**, v. 2013, ID 928627, 22 p., 2013.

TEIXEIRA, LUCIANO M.; GOUVÊA, MARLON R.; ASSIS, RODRIGO O. S.; SOUZA, HENRIQUE R. O.; SILVEIRA, MARCO A. 2014 - Prognóstico e Detecção de falhas em plantas industriais. In: **Congresso Brasileiro De Automática (CBA)**, 2014, Belo Horizonte. *Anais...* XX-CBA, 20 a 24 de set., p. 4226- 4232, 2014.

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

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, p. 70–73, 1967.

YANG, Y.; DIVSHOLI, B. S.; SOH, C. K. A reusable PZT transducer for monitoring initial hydration and structural health of concrete. *Sensors*, v. 10, p. 5193-5208, 2010.

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

ZHANG, Y.X.; YANG, J.H.; XU, F. H.; CHEN, J. Z. EMI-based damage identification for beam structures, **Advanced Materials Research**, v.1081, p.358-362, 2015. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1081.358>