



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

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

**Deteção de Dano Estrutural em Ambientes Ruidosos Baseada na
Impedância Eletromecânica e Ondas de Lamb com Diafragmas
Piezelétricos Excitados com Sinais de Alta Frequência**

Leandro Melo Campeiro

Bauru - SP
2021



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Detecção de Dano Estrutural em Ambientes Ruidosos Baseada na Impedância Eletromecânica e Ondas de Lamb com Diafragmas Piezelétricos Excitados com Sinais de Alta Frequência”

Leandro Melo Campeiro

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

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista

Bauru - SP
2021

Campeiro, Leandro Melo.

Detecção de dano estrutural em ambientes ruidosos baseada na impedância eletromecânica e ondas de Lamb com diafragmas piezelétricos excitados com sinais de alta frequência / Leandro Melo Campeiro, 2021

94 f. :il.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021

1. Ruído. 2. Lamb Waves. 3. Impedância Eletromecânica. 4. Sistemas SHM. 5. Transdutores Piezelétricos. 6. Testes não destrutivos. 7. Detecção de dano I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE LEANDRO MELO CAMPEIRO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 21 dias do mês de dezembro do ano de 2021, às 08:30 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de LEANDRO MELO CAMPEIRO, intitulada **DETECÇÃO DE DANO ESTRUTURAL EM AMBIENTES RUIDOSOS BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA E ONDAS DE LAMB COM DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS EXCITADOS COM SINAIS DE ALTA FREQUÊNCIA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. LUIZ GONCALVES JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário de Lins - UNILINS, Prof. Dr. JOÃO PAULO CRIVELLARO DE MENEZES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Eletrônica / Instituto Federal de São Paulo – IFSP - Câmpus de Birigui. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO** _ _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA

Tudo posso naquele que me fortalece.

Aos Filipenses cap 4 ver 13

AGRADECIMENTOS

A Deus, agradeço-o pela sua misericórdia, pelos pais que ele me deu, pela família, pelos amigos e pelo orientador.

Aos meus pais Leonardo Campeiro e Maria Natércia Melo Campeiro, por estarem sempre comigo e me ajudando a alcançar meus objetivos.

À minha avó Maria José de Santana Campeiro.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista, pelo apoio, pela ajuda e pela paciência em todo o período do meu doutorado.

Aos meus amigos de laboratório que me acompanharam nesta jornada, em especial a Danilo Ecidir Budoya e Ricardo Zanni.

Aos professores Dr. Paulo Roberto de Aguiar, Dr. José Aparecido Silva de Queiroz, Me. José Vital Ferraz Leão e Dr. Breno Ortega.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa de estudo concedida. (Processo 2018/13200-1)

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pelo auxílio financeiro recebido nesta pesquisa.

À comissão examinadora e

A todos que acompanharam meu trabalho

RESUMO

Os sistemas de monitoramento estrutural (SHM) têm mostrado seu elevado potencial com o passar das décadas. Com o desenvolvimento da tecnologia, métodos de implementação desses sistemas através de processamento computacional têm sido amplamente aplicados. O grande valor desses sistemas está em proteger as estruturas e as pessoas envolvidas. O ideal é detectar danos em estágio inicial utilizando-se sinais de excitação de alta frequência. Como esses sistemas podem ser construídos utilizando sensores que são acoplados à estrutura, efeitos de temperatura e ruídos são inevitavelmente inseridos aos sinais lidos pelos seus sensores, podendo assim, gerar um falso positivo. O desenvolvimento e o conhecimento de sensores disponíveis no mercado que podem ser utilizados em sistemas SHM é de interesse global, pois oferecerem uma redução de custo no desenvolvimento desses sistemas bem como uma ampla possibilidade de escolha para uma determinada aplicação, devido ao amplo conhecimento dos sensores que podem ser utilizados. Os diafragmas piezelétricos são componentes sonoros amplamente utilizados nos aparelhos eletrônicos do dia-a-dia e, além do baixo custo, apresentam a vantagem de serem produzidos em série por diversos fabricantes em tamanhos padronizados e prontamente disponíveis. Com base nessas informações, o objetivo dessa tese é apresentar os resultados do estudo de viabilidade de diafragmas piezelétricos como transdutor alternativo para a técnica das ondas de Lamb, permitindo expandir a pesquisa, bem como acelerar a implementação de sistemas SHM com menores custos de instalação, esses diafragmas já são amplamente utilizados na técnica da impedância eletromecânica (E/M). Para avaliar a viabilidade desses componentes utilizando as ondas de Lamb, análises básicas pelo método dos elementos finitos (FEM) e ensaios experimentais foram realizados em placas de alumínio e os resultados obtidos com os diafragmas foram comparados com os obtidos com as cerâmicas piezelétricas convencionais. Após verificado a eficácia desses componentes em gerar e detectar danos utilizando ondas de Lamb, prosseguiu-se a pesquisa efetuando-se uma análise comparativa dos efeitos do ruído na detecção de dano estrutural utilizando-se a técnica E/M e ondas de Lamb com sinais de excitação em alta frequência. Além disso, testes foram feitos para comparar a capacidade de cada técnica em detectar, quantificar e localizar o dano na estrutura antes da análise com ruído. Os resultados mostraram que ambas as técnicas são eficazes em detectar dano estrutural em um ambiente ruidoso e quantificar e localizar os danos em condições ideais.

Palavras-chave:

Transdutores piezelétricos, impedância eletromecânica (E/M), Ondas de Lamb, ruídos, detecção de danos, testes não destrutivos, monitoramento da integridade estrutural (SHM).

ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM) systems have shown their high potential over the decades. With the development of technology, methods of implementing these systems through computational processing have been widely applied. The great value of these systems is in protecting the structures and people involved. Ideally, detect early-stage damage using high-frequency excitation signals. As these systems can be built using sensors that are attached to the structure, temperature and noise effects will inevitably be inserted in the signals read by their sensors, thus generating a false positive. The development and knowledge of sensors available on the market that can be used in SHM systems is of global interest, as they offer a cost reduction in the development of these systems as well as a wide choice for a given application, due to the extensive knowledge of sensors that can be used. Piezoelectric diaphragms are sound components widely used in everyday electronic devices and, in addition to their low cost, they have the advantage of being mass produced by several manufacturers in standardized sizes and readily available. Based on this information, the objective of this thesis is to present the results of the feasibility study of piezoelectric diaphragms as an alternative transducer for the Lamb wave technique, allowing to expand the research, as well as to accelerate the implementation of SHM systems with lower installation costs, these diaphragms are already widely used in the electromechanical (EMI) impedance technique. To assess the viability of these components using Lamb waves, basic analyzes by the finite element method (FEM) and experimental tests were carried out on aluminum plates and the results obtained with the diaphragms were compared with those obtained with conventional piezoelectric ceramics. After verifying the effectiveness of these components in generating and detecting damage using Lamb waves, the research continued by carrying out a comparative analysis of the effects of noise in the detection of structural damage using the EMI technique and Lamb waves with signals of excitation at high frequency. In addition, tests were carried out to compare the ability of each technique to detect, quantify and locate damage in the structure before the analysis with noise. The results showed that both techniques are effective in detecting structural damage in a noisy environment and quantifying and locating damage under ideal conditions.

Keywords: Piezoelectric transducers, electromechanical impedance, Lamb waves, noise, damage detection, non-destructive testing, SHM.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	: CONFIGURAÇÃO BÁSICA DA TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA E/M.....	23
FIGURA 2	: SINAL DE EXCITAÇÃO EXPERIMENTAL E SINAL RECEBIDO POR UM SENSOR A UMA DISTÂNCIA DE 425 MM DO ATUADOR DESTACANDO OS PACOTES CORRESPONDENTES AOS MODOS S0 E A0.....	27
FIGURA 3	: ARRANJO EXPERIMENTAL TÍPICO DO MÉTODO DAS ONDAS DE LAMB.....	28
FIGURA 4	: EXEMPLO DE ASSINATURAS DE IMPEDÂNCIA ANTES E APÓS UM DANO ESTRUTURAL.....	29
FIGURA 5	: SISTEMA USADO PARA MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA E GERAÇÃO DE RUÍDO E VIBRAÇÃO.....	32
FIGURA 6	: SISTEMA USADO PARA GERAÇÃO E AQUISIÇÃO DAS ONDAS DE LAMB E GERAÇÃO DE RUÍDO.....	34
FIGURA 7	: ESTRUTURA DE UM DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO.....	37
FIGURA 8	: TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS AVALIADO NESSE ESTUDO..	39
FIGURA 9	: ESTRUTURAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL - FEM	41
FIGURA 10	: SINAIS ELÉTRICOS OBTIDOS DOS DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS COM DISCO DE LATÃO DE DIFERENTES DIÂMETROS E CERÂMICA CONVENCIONAL USANDO SIMULAÇÃO FEM.....	42
FIGURA 11	: VARIAÇÕES DE SINAL DEVIDO A DANOS ESTRUTURAIS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO FEM.....	43
FIGURA 12	: VARIAÇÕES NA AMPLITUDE DO SINAL DEVIDO À ESPESSURA (T) DA CERÂMICA OBTIDA POR SIMULAÇÃO FEM.....	45
FIGURA 13	: TESTE REALIZADO PARA AVALIAR A VIABILIDADE DE DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS PARA GERAR E RECEBER ONDAS DE LAMB SINTONIZADAS. NOS DESTAQUES, RACHADURAS NOS CAMINHOS ENTRE OS DIAFRAGMAS 7BB-15-6 E AS CERÂMICAS SMD10T02F412ST (REFERÊNCIA) QUE FORAM FEITAS POSTERIORMENTE PARA TESTES BÁSICOS DE DETECÇÃO DE DANOS.....	47
FIGURA 14	: ESQUEMA ELÉTRICO DO CIRCUITO UTILIZANDO AMPLIFICADOR OPERACIONAL.....	48
FIGURA 15	: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO USADO PARA DETECÇÃO DE DANO USANDO AS ONDAS DE LAMB.....	50

FIGURA 16	: CONFIGURAÇÃO USADA PARA AVALIAR A CAPACIDADE DOS DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS EM DETECTAR DANOS ESTRUTURAIS E OBTER OS MAPAS DE LOCALIZAÇÃO DE DANOS.....	51
FIGURA 17	: CURVAS DE SINTONIA DOS MODOS SIMÉTRICO E ANTI-SIMÉTRICO DAS ONDAS DE LAMB PARA DIFERENTES TRANSDUTORES.....	52
FIGURA 18	: SINAIS BRUTOS OBTIDOS DOS SENSORES CONSIDERANDO A FREQUÊNCIA SINTONIZADA NA AMPLITUDE MÁXIMA DO MODO S0 PARA O RESPECTIVO TRANSDUTOR.....	55
FIGURA 19	: VARIAÇÕES EXPERIMENTAIS OBSERVADAS NA AMPLITUDE DO SINAL PARA CERÂMICAS COM DIFERENTES ESPESSURAS (T).....	56
FIGURA 20	: EFEITOS DA TEMPERATURA NOS SINAIS RECEBIDOS PELO DIAFRAGMA 7BB-15-6 E PELA CERÂMICA SMD10T02F412ST.....	57
FIGURA 21	: VARIAÇÃO NA AMPLITUDE DO SINAL DEVIDO À TEMPERATURA.	59
FIGURA 22	: HISTOGRAMAS PARA AVALIAR A REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DAS 100 MEDIÇÕES	60
FIGURA 23	: VARIAÇÕES NOS SINAIS CAUSADAS POR TRINCAS INSERIDAS NOS CAMINHOS ENTRE OS ATUADORES E SENSORES	61
FIGURA 24	: ÍNDICES DE DANOS OBTIDOS PARA O DIAFRAGMA E CERÂMICA CONVENCIONAL.....	62
FIGURA 25	: SINAIS RECEBIDOS DOS DIAFRAGMAS 2 A 16 QUANDO O DIAFRAGMA 1 ESTÁ TRANSMITINDO O SINAL, MOSTRANDO A CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO OMNIDIRECIONAL.....	63
FIGURA 26	: DIAGRAMA DO TIME OF FLIGHT (TOF) OBTIDO PARA OS DIAFRAGMAS 2 A 16 QUANDO O DIAFRAGMA 1 ESTÁ SENDO EXCITADO.....	64
FIGURA 27	: ÍNDICES DE DANOS OBTIDOS PARA DIFERENTES CAMINHOS DE ONDA ATUADOR-SENSOR, CRUZANDO E NÃO CRUZANDO OS ORIFÍCIOS DE 1 MM E 3 MM DE DIÂMETRO.....	66
FIGURA 28	: MAPAS DE LOCALIZAÇÃO DE DANOS OBTIDOS USANDO DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS; UM LIMITE EM TORNO DE 0,7 FOI DEFINIDO NOS MAPAS DE CORES PARA DESTACAR O LOCAL DO DANO, PERMITINDO UMA COMPARAÇÃO VISUAL COM O DANO REAL DA ESTRUTURA.....	67

FIGURA 29	: CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA COMPARAR O DESEMPENHO DAS TÉCNICAS DAS ONDAS DE LAMB E E/M EM DETECTAR DANOS COM SINAIS DE EXCITAÇÃO EM ALTA FREQUÊNCIA SOB EFEITOS DE RUÍDO.....	73
FIGURA 30	: VALORES DO ÍNDICE RMSD PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE EXCITAÇÃO, PARA A ESTRUTURA EM CONDIÇÕES ÍNTEGRA E SEM RUÍDO.....	75
FIGURA 31	: VALORES DO ÍNDICE CCDM PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE EXCITAÇÃO, PARA A ESTRUTURA EM UMA CONDIÇÃO ÍNTEGRA E SEM RUÍDO.....	76
FIGURA 32	: VALORES DO ÍNDICE RMSD UTILIZANDO A TÉCNICA E/M E ONDAS DE LAMB COM DANO EM DISTÂNCIAS DIFERENTES.....	77
FIGURA 33	: VALORES DO ÍNDICE CCDM UTILIZANDO A TÉCNICA E/M E ONDAS DE LAMB COM DANO EM DISTÂNCIAS DIFERENTES.....	78
FIGURA 34	: VALORES DO ÍNDICE CCDM UTILIZANDO A TÉCNICA DAS ONDAS DE LAMB COM EXCITAÇÃO EM 500 KHZ E 950 KHZ.....	79
FIGURA 35	: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E SNR PARA A TÉCNICA E/M E DAS ONDAS DE LAMB.....	81
FIGURA 36	: VALORES DO ÍNDICE CCDM UTILIZANDO A TÉCNICA DAS ONDAS DE LAMB COM EXCITAÇÃO EM 500 KHZ E 5 V DE AMPLITUDE DE EXCITAÇÃO.....	83
FIGURA 37	: VALORES DO ÍNDICE CCDM UTILIZANDO A TÉCNICA DAS ONDAS DE LAMB COM EXCITAÇÃO EM 500 KHZ E 10 V DE AMPLITUDE DE EXCITAÇÃO.....	84
FIGURA 38	: VALORES DA DIFERENÇA DAS PSD PARA E/M E ONDAS DE LAMB.....	85
FIGURA 39	: QUADRO COMPARATIVO DE DETECÇÃO PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS COM TODOS OS RUÍDOS PARA AMBAS AS TÉCNICAS	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: DIMENSÃO DOS TRANSDUTORES E AS PROPRIEDADES PRINCIPAIS.....39

TABELA 2: COORDENADA DOS TRANSDUTORES.....51

LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

ADC	<i>Analog to digital converter</i> - Conversor Analógico-Digital
CCDM	<i>Correlation Coefficient Deviation Metric</i> – Desvio do coeficiente de correlação
DAC	<i>Digital to analog converter</i> - Conversor Digital-Analógico
DAQ	<i>Data Acquisition</i> – Dispositivo de aquisição de dados
E/M	<i>Eletrochemical Impedance</i> - Impedância Eletromecânica
FRF	Função de Resposta em Frequência
NDE	<i>Non-Destructive Evaluation</i> – Ensaios não destrutivos
PC	<i>Personal Computer</i> – Computador pessoal
PSD	<i>Power Spectral Density</i> – Densidade espectral de potência
PZT	<i>Pb-Lead ZirconateTitanate</i> – Titanato zirconato de chumbo
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> – Desvio da raiz quadrática média
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento de integridade estrutural
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> – Relação Sinal Ruído
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Barramento serial universal
FEM	<i>Finite Element Method</i> - Método dos elementos finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
T	<i>Tensão mecânica ou stress</i>	N/m
ϵ	<i>Deformação mecânica ou strain</i>	<i>Adimensional</i>
E	<i>Campo elétrico</i>	V/m
D	<i>Componente de deslocamento elétrico</i>	C/m^2
ϵ	<i>Permissividade dielétrica</i>	F/m
d	<i>Constante piezolétrica</i>	m/V
Z_E	<i>Impedância elétrica do transdutor</i>	Ω
Z_P	<i>Impedância mecânica do transdutor</i>	$N \cdot s / m$
Z_S	<i>Impedância mecânica da estrutura</i>	$N \cdot s / m$
C	<i>Capacitância estática do transdutor</i>	F
C_{xy}	<i>Magnitude da coerência</i>	<i>Adimensional</i>
S_{xx}/S_{yy}	<i>Auto espectro de potência</i>	<i>Adimensional</i>
S_{xy}	<i>Espectro de potência cruzado</i>	<i>Adimensional</i>
ω	<i>Frequência</i>	rad/s
s	<i>Constante de elasticidade</i>	m^2/N
n	<i>Número de amostras</i>	<i>Adimensional</i>
A	<i>Amplitude</i>	V
$H(\omega)$	<i>Função de resposta em frequência</i>	<i>Adimensional</i>
$x(t)$	<i>Sinal de excitação do transdutor no tempo</i>	V
$x[n]$	<i>Sinal de excitação discreto</i>	V
$y(t)$	<i>Sinal de resposta do transdutor no tempo</i>	V
$y[n]$	<i>Sinal de resposta discreto</i>	V
$W(t)$	<i>Sinal de vibração ou ruído no tempo</i>	V
$W[n]$	<i>Sinal de vibração ou ruído discreto</i>	V
j	<i>Número imaginário unitário</i>	<i>Adimensional</i>
R_s	<i>Resistor série</i>	Ω

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Artigos publicados em periódico

CAMPEIRO, L. M; BUDOYA, D; BAPTISTA, F. G. Lamb wave inspection using piezoelectric diaphragms: an initial feasibility study. **Sensors And Actuators A: Physical**, v. 331, p. 112859, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2021.112859>.

BUDOYA, D; CAMPEIRO, L. M; BAPTISTA, F. G. Sensitivity Enhancement of Piezoelectric Transducers for Impedance-Based Damage Detection via a Negative Capacitance Interface. **IEEE Sensors Journal**, v. 20, n. 23, p. 13892-13900, 2020. doi: 10.1109/JSEN.2019.2956782.

Artigo submetido a periódico

CAMPEIRO, L. M; BUDOYA, D; BAPTISTA, F. G. Damage detection based on EMI and Lamb Waves techniques using high frequency excitation signals in a noisy environment: A comparison study. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	16
1.1 Objetivos	20
1.2 Justificativa e Motivação	21
1.3 Organização do trabalho	21
Capítulo 2 - O método da Impedância Eletromecânica e da Onda de Lamb.....	23
2.1 A técnica da Impedância Eletromecânica E/M	23
2.2 A técnica das Ondas de Lamb	26
2.3 Princípio de detecção de danos	29
2.4 Sistema de medição.....	32
2.5 Conceito de ruído.....	35
Capítulo 3 – Aplicação dos diafragmas piezelétricos em monitoramento estrutural utilizando as Ondas de Lamb. Um estudo de viabilidade.....	36
3.1 Diafragma piezelétrico.....	36
3.2 Análise por simulação computacional - FEM	40
3.3 Procedimento experimental	46
3.4 Resultados	52
3.4.1 Gerando e recebendo as Ondas de Lamb.....	52
3.4.2 Efeito de temperatura	57
3.4.3 Repetibilidade dos resultados.....	59
3.4.4 Detecção de dano com diafragmas piezelétricos.....	61
3.4.5 Custo-benefício	68
3.5 Conclusão.....	70
Capítulo 4 – Análise comparativa das técnicas E/M e Ondas de Lamb em alta frequência	72
4.1 Procedimento experimental	72
4.2 Resultados	75
4.2.1 Sensibilidade em detectar e quantificar o dano.....	75
4.2.2 Distância do dano.....	76
4.2.3 Efeitos do ruído	79
4.2.4 Potência do sinal de excitação.....	82
4.3 Conclusão.....	87
Capítulo 5 – Considerações finais e trabalhos futuros.....	88
Referências.....	90

Capítulo 1

Introdução

O monitoramento da integridade estrutural mundialmente conhecido como sistemas SHM do termo em inglês *Structural Health Monitoring* é um campo no qual os pesquisadores trabalham no desenvolvimento e implementação de técnicas para monitorar diferentes tipos de estruturas, detectando e localizando danos sem interromper sua operação normal. As áreas de aplicação incluem, por exemplo, grandes meios de transporte, como aeronaves e navios, bem como infraestrutura civil, como pontes e edifícios (CHANG; FLATAU; LIU, 2003).

Existem diversas técnicas de detecção de danos estruturais, que devem ser minimamente invasivas à estrutura monitorada, também conhecidas como ensaios não destrutivos ou NDE do termo em inglês *non-destructive evaluation*, tais técnicas são as baseadas em correntes parasitas (GE; HU; YANG, 2021), emissão acústica (PALLARÉS et al., 2021), e sensores de fibra óptica (Du et al., 2020), interferometria de cisalhamento (ANISIMOV; GROVES, 2021) e termografia infravermelha (BARUS et al., 2018). Nas últimas décadas, transdutores piezelétricos têm sido amplamente estudados para aplicação em sistemas SHM (SUN et al., 2013) e, devido aos seus benefícios, são de interesse global, uma vez que são pequenos, baratos e leves quando comparados a outros transdutores. Dentre os métodos de detecção de danos utilizando transdutores piezelétricos, a emissão acústica (LIN et al., 2018), a impedância eletromecânica (LI et al., 2019) e as ondas de Lamb têm sido os mais amplamente investigada nas estruturas compósitas (SU et al., 2019) nas estruturas de alumínio (MA; YU, 2021) e em tubos (XIAO et al., 2020).

As ondas de Lamb, que é um dos métodos de detecção de interesse nesse estudo, é uma das ferramentas mais promissoras na área de NDE devido à ampla faixa de detecção

e alta sensibilidade a danos (SU *et al.*, 2019). As ondas de Lamb são ondas guiadas que se propagam em estruturas finas como placas e são classificadas como modos simétricos (S_n) e anti-simétricos (A_n), onde o subscrito (n) indica a ordem do modo. Este método utiliza transdutores operando como atuadores para gerar ondas de Lamb e sensores para receber essas ondas que têm suas características relacionadas às condições da integridade da estrutura monitorada. A detecção, localização e quantificação de danos são geralmente realizadas comparando os sinais elétricos dos sensores antes e depois da ocorrência de danos à estrutura, aplicando-se índice de danos. Normalmente, o transdutor é excitado em frequências de até 1000 kHz, que é a região das curvas de dispersão do modo S_0 , onde este modo viaja com velocidade aproximadamente constante e não sofre interferência de outros modos. Ambos os modos são usados na literatura, mas o modo S_0 é mais sensível à fissuras através da espessura e o modo A_0 proporciona maior sensibilidade a danos superficiais como delaminação e corrosão (SU; YE; LU, 2006, GIURGIUTIU, 2005).

No passado, os estudos iniciais sobre ondas de Lamb usaram transdutores ultrassônicos convencionais, que foram substituídos por transdutores piezelétricos por serem compactos, leves e baratos, como cerâmicas de PZT (*lead zirconate titanate* – titanato zirconato de chumbo), também conhecidas como PWAS (*Piezo wafer active sensors* - sensores ativos de *wafer* piezelétricos) (GIURGIUTIU, 2005), que são tipicamente cerâmicas finas revestidas em ambos os lados com filmes finos de metal que atuam como eletrodos. Esses recursos permitem que vários transdutores sejam instalados sem alterar significativamente as propriedades mecânicas e as condições de operação da estrutura monitorada. Esses transdutores se tornaram amplamente utilizados para monitoramento e detecção de danos em vários tipos de estruturas com base no método das ondas de Lamb (LI; PENG; MENG, 2014; SHAN; CHENG, 2020) e outros métodos (WU *et al.*, 2020). Mais recentemente, transdutores interdigitais têm sido usados em aplicações

de sistemas de SHM (STEPINSKI; MANKA; MARTOWICZ, 2017). Esses transdutores possuem um padrão de eletrodos interdigitais que podem ser de baixo perfil e flexíveis, como transdutores de compósito de fibra ativa (CFA) e MFC (*Macro Fiber Composite* - compósito de macrofibra), permitindo a utilização desses dispositivos em estruturas flexíveis ou em superfícies irregulares (BRUNNER *et al.*, 2009).

Outro método de detecção que toma o uso de transdutores piezelétricos é a técnica da impedância eletromecânica (E/M) onde são utilizados transdutores piezelétricos fixados na estrutura monitorada na configuração do tipo pulso-eco, isto é, operando simultaneamente como um sensor e atuador (TALAKOKULA; BHALLA, 2018). Enquanto o transdutor é excitado, a sua impedância elétrica é medida por um analisador de impedância ou por um sistema de medição alternativo. Desta forma, qualquer alteração na impedância mecânica da estrutura causada por um dano implica em uma variação correspondente na impedância elétrica do transdutor. Portanto, a integridade da estrutura pode ser monitorada por meio da medição e análise da impedância elétrica do transdutor.

Embora o método da onda de Lamb seja conhecido por sua eficácia na detecção e localização de danos em grandes áreas, o método E/M é adequado para a caracterização de danos. Alguns estudos combinaram os dois métodos em sistemas de monitoramento, como no desenvolvimento de um conjunto de transdutores móveis (ZHENG *et al.*, 2019), obtendo assim as vantagens de ambos os métodos. Apesar de sua eficácia, ambos os métodos são sensíveis a distúrbios ambientais, como variações de temperatura (WANDOWSKI; MALINOWSKI; OSTACHOWICZ, 2021) e ruído (CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA, 2019).

A excitação em alta frequência é importante porque, de acordo com o axioma VII dos sistemas SHM (WORDEN *et al.*, 2007), quanto maior a frequência de excitação, menor o dano a ser identificado, tornando as estruturas mais seguras, pois o dano pode ser

detectado em um estágio inicial. Embora já existam estudos com sinais de excitação de alta frequência (CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018), incluindo os efeitos de distúrbios externos, eles são baseados principalmente em simulação numérica ou realizados em uma faixa de frequência não adequada para detectar danos muito incipientes.

Sharma, Kumar e Tyagi (2018) apresentaram métodos para compensar os efeitos do ruído na aplicação de ondas de Lamb utilizando a transformada Wavelet, técnica de filtro casado e a técnica de filtro casado por wavelets (WMFM), e observou-se que a combinação correta de métodos pode ser atrativa na detecção de danos estruturais em ambientes ruidosos. Campeiro, Silveira e Baptista (2018) apresentaram os efeitos do ruído e vibração sobre o método da impedância eletromecânica na detecção de danos estruturais com um sinal de excitação até 500kHz, e observou-se que o menor nível de ruído altera os valores do índice de dano estrutural e que o uso de um sinal de excitação de maior amplitude reduz o efeito do ruído no sinal obtido. Chowdary e Alapati (2021) estudaram os efeitos da vibração na técnica de impedância eletromecânica, utilizando a condutância, e foi observado que com o aumento da amplitude da vibração externa, os picos do sinal de condutância se deslocaram e esse deslocamento está associado a danos, levando assim a uma falsa interpretação do estado da estrutura.

Zhang et al (2020) aplicou *machine learning* usando o suporte de vetor de máquina (SVM) para enriquecer a detecção de danos baseada em ondas de Lamb. Segundo eles, o método é eficiente e preciso para identificar danos e estes também são robustos a ruídos. Chenhui et al (2019) analisou a aplicação de *wavelets* para eliminar o ruído do sinal adquirido de um painel de CFRP (*Carbon fiber reinforced polymers* - compósito reforçado com fibra de carbono) antes de treinar a CNN (*Convolutional Neural Networking* - Rede Neural de Convolução). Os resultados mostraram que o método é eficiente para localizar e definir o grau de dano.

Portanto, nesta tese, são apresentados os resultados sobre a efetividade do diafragma piezelétrico em detectar danos utilizando-se as ondas de Lamb bem como uma análise comparativa do desempenho das ondas de Lamb e da impedância eletromecânica sob efeito do ruído na detecção de danos, com foco na excitação de transdutores com sinais de alta frequência acima de 500 kHz. O interesse neste estudo está no fato de os diafragmas piezelétricos serem de baixo custo, fabricados por várias empresas em tamanhos padrão e, portanto, prontamente disponíveis em diversos países.

1.1 Objetivos

O objetivo desta tese de doutorado foi analisar a viabilidade do uso dos diafragmas piezelétricos na técnica das Ondas de Lamb bem como comparar o seu desempenho junto a técnica E/M com sinais de excitação em alta frequência sob efeito do ruído para um correto diagnóstico da integridade estrutural. Essa análise foi feita usando algumas barras de alumínio, na qual vários modelos transdutores piezelétricos foram escolhidos, um usado como referência devida a sua ampla aplicação em sistemas SHM e os demais sendo da Murata; foco de estudo desse trabalho devido ao seu baixo custo e de fácil aquisição.

A análise envolveu o uso de ferramenta de processamento de sinais, como a transformada Wavelet, a PSD (*power spectrum density* - densidade espectral de potência) e do uso dos índices de danos, como o RMSD (*root mean square deviation* - desvio da raiz média quadrática) e o CCDM (*correlation coefficient deviation metric* - métrica do desvio do coeficiente de correlação), que em conjunto com a função de coerência, têm por objetivo demonstrar o potencial que o ruído têm em interferir nas medições de impedância da estrutura. Para isso, diferentes distâncias de danos, diversas amplitudes de ruído e diversos níveis do sinal de excitação do transdutor foram utilizados, variando assim, a SNR (*signal-to-noise ratio* - relação sinal-ruído) do sistema, que, para cada caso, foram analisados os

seus efeitos.

1.2 Justificativa e Motivação

As ondas de Lamb são uma das ferramentas mais promissoras na área de NDE (*non-destructive evaluation* – avaliação não destrutiva) devido à ampla faixa de detecção e alta sensibilidade a danos (SU *et al.*, 2019). No passado, os estudos iniciais sobre ondas de Lamb usaram transdutores ultrassônicos convencionais, que foram substituídos por transdutores piezelétricos por serem compactos, leves e baratos, como cerâmicas de titanato de zirconato de chumbo (PZT), também conhecidas como PWAS (GIURGIUTIU, 2005), que são tipicamente cerâmicas finas revestidas em ambos os lados com filmes finos de metal que atuam como eletrodos. Esses recursos permitem que vários transdutores sejam instalados sem alterar significativamente as propriedades mecânicas e as condições de operação da estrutura monitorada. Esses transdutores se tornaram amplamente utilizados para monitoramento e detecção de danos em vários tipos de estruturas com base no método das ondas de Lamb e impedância eletromecânica. O interesse neste estudo está no fato de os diafragmas piezelétricos, os transdutores propostos nesse trabalho, serem de baixo custo, fabricados por várias empresas em tamanhos padrão e, portanto, prontamente disponíveis.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em quatro capítulos, como segue:

- ✓ Capítulo 1 – Introdução e revisão bibliográfica básica dos sistemas de SHM, objetivos, justificativa e motivação para o desenvolvimento do trabalho;
- ✓ Capítulo 2 – Apresentação dos métodos da impedância E/M e das Ondas de Lamb para detecção de danos, dos índices de danos, do sistema de medição utilizado e dos conceitos básicos de ruído;

- ✓ Capítulo 3 – Apresentação dos resultados experimentais para a análise de viabilidade do uso dos diafragmas piezelétricos no método das ondas de Lamb, dispondo de análise simulada do diafragma usando FEM, da variação do tamanho e espessura dos diafragmas, dos efeitos de temperatura, da repetibilidade e por fim da detecção e localização de danos estruturais;
- ✓ Capítulo 4 – Apresentação dos resultados experimentais para comparação dos métodos E/M e da Ondas de Lamb, dispondo dos comportamentos com a presença de vibrações e ruídos, em que são observadas as alterações das mesmas por meio do uso da função de coerência, dos índices de danos RMSD e CCDM calculados usando a parte real da impedância, bem como a capacidade do sistema em detectar danos e a compensação dos efeitos do ruído por meio da elevação do sinal de excitação do transdutor; análise do coeficiente de correlação e da PSD foram usadas também.
- ✓ Conclusão da tese, seguida da lista de referências bibliográficas utilizadas.

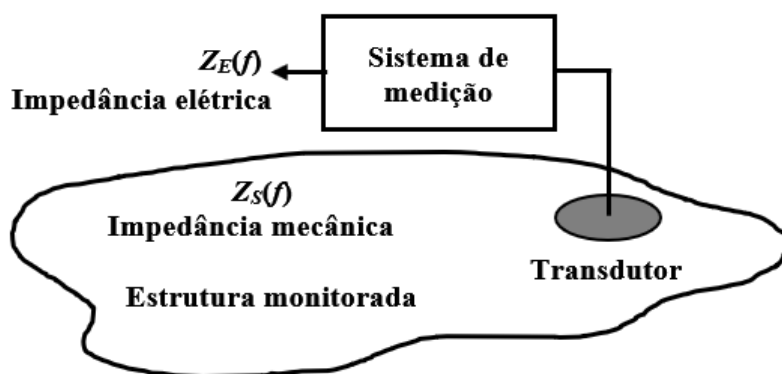
Capítulo 2

O Método da Impedância Eletromecânica e da Onda de Lamb

2.1 – A técnica da Impedância Eletromecânica E/M

A detecção de dano baseada na técnica da impedância E/M consiste em fixar um transdutor piezolétrico na estrutura a ser monitorada, como ilustrado na Figura 1, operando simultaneamente como atuador e sensor. De acordo com a Figura 1, a estrutura monitorada tem uma impedância mecânica $Z_S(f)$ e sobre a sua superfície é instalado um transdutor piezolétrico que tem a sua impedância elétrica $Z_E(f)$ medida por um sistema de medição ou um analisador de impedância que também excita o transdutor e, conseqüentemente, a estrutura.

Figura 1 – Configuração básica da técnica da impedância E/M.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como o transdutor é piezolétrico, as relações constitutivas podem ser obtidas a partir da energia livre de Gibbs (BUSCH-VISHNIAC, 1998):

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

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

sendo $d_{m\beta}$ e $d_{\beta m}$ as constantes piezelétricas, m_{mk} são as constantes magnetoelétricas, p_m são as constantes piroelétricas, α_α são os coeficientes de expansão térmica, H_k e H_m são as componentes do campo magnético, θ é a temperatura, S_α é o tensor de deformação mecânica, T_β é o tensor de tensão mecânica, $s_{\alpha\beta}$ é o tensor de elasticidade, E_k e D_m são as componentes do campo elétrico e deslocamento elétrico, respectivamente e ϵ_{mk} são as constantes dielétricas. Os sobrescritos E , H , θ e T indicam, respectivamente, campo elétrico, campo magnético, temperatura e tensão mecânica constantes. Considerando a simetria dos tensores, $\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6$ e $m, k = 1, 2, 3$.

A deformação do transdutor e, conseqüentemente, a vibração da estrutura ocorre em todas as direções e modelos bidimensionais (WANG *et al.*, 2016) e tridimensionais (ANNAMDAS; SOH, 2007) têm sido propostos para relacionar a impedância elétrica do transdutor com a impedância mecânica da estrutura. No entanto, os transdutores utilizados na técnica da impedância E/M normalmente são muito finos e para estruturas pequenas utilizadas em laboratório uma análise unidimensional é satisfatória. Assim, com base em uma suposição unidimensional e considerando um transdutor feito com cerâmica de PZT, que são largamente utilizados e, além disso, desconsiderando-se os efeitos piroelétricos e magnetoelétricos, as Equações (1) e (2) podem ser reescritas como:

$$D_3 = d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \quad , \quad (3)$$

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad , \quad (4)$$

sendo que D_3 , E_3 , S_1 , T_1 , d_{31} , s_{11}^E e ϵ_{33}^T são como definido anteriormente nas Equações (1) e (2), mas para uma consideração unidimensional.

As Equações (3) e (4) representam o efeito piezolétrico direto e reverso, respectivamente. Com base nessas equações, um modelo eletromecânico unidimensional pode ser desenvolvido para relacionar a impedância elétrica do transdutor com a impedância mecânica da estrutura. Liang, Sun e Rogers (1994) foram um dos pioneiros a propor tal modelo e uma versão simplificada da equação que relaciona as duas impedâncias é dada por:

$$Z_E(f) = \frac{1}{j2\pi fC} \left(1 - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T} \frac{Z_S(f)}{Z_S(f) + Z_P(f)} \right)^{-1}, \quad (5)$$

sendo $Z_E(f)$ a impedância elétrica do transdutor, $Z_S(f)$ a impedância mecânica da estrutura monitorada, $Z_P(f)$ a impedância mecânica do transdutor, f a frequência, C a capacitância do transdutor, j a unidade imaginária e d_{31} , s_{11}^E e ϵ_{33}^T são as propriedades do material piezolétrico do transdutor como apresentadas anteriormente nas Equações (3) e (4).

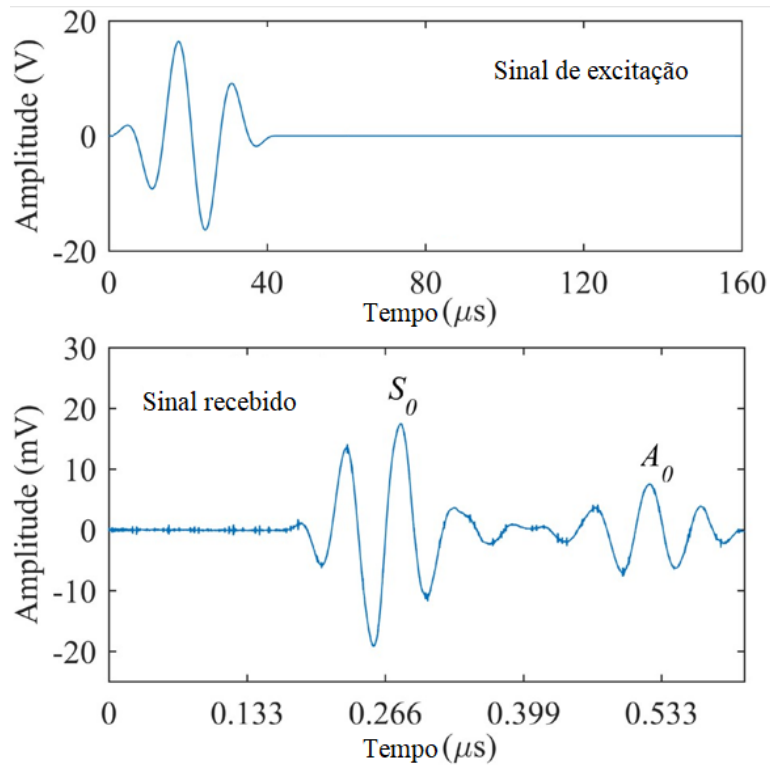
De acordo com a Equação (5), há uma relação entre a impedância mecânica da estrutura ($Z_S(f)$) e a impedância elétrica do transdutor $Z_E(f)$. Qualquer variação na impedância mecânica da estrutura causada por um dano estrutural como trincas e corrosão causa uma variação correspondente na impedância elétrica do transdutor. Portanto, a integridade da estrutura pode ser monitorada por meio da medição e análise da impedância elétrica do transdutor em uma faixa de frequência (f) apropriada.

2.2 – A técnica das Ondas de Lamb

Ao contrário da técnica da impedância E/M que utiliza um transdutor operando simultaneamente como atuador e sensor, na técnica de detecção de dano baseada em ondas de Lamb são utilizados transdutores distintos, sendo um atuador para a geração de sinal e excitação da estrutura monitorada e sensores para a recepção dos sinais. Os sinais recebidos dependem das características de propagação das ondas no caminho entre o atuador e os respectivos sensores e, conseqüentemente, são alterados na presença de um dano estrutural.

Ondas de Lamb são ondas guiadas que se propagam em estruturas finas como placas. Existem dois modos de propagação, modos simétrico (S_n) e antissimétrico (A_n), e as velocidades de propagação desses modos estão relacionadas à espessura da placa, seu material e frequência. Os modos S_0 e A_0 são amplamente utilizados e normalmente é escolhida uma frequência que permite uma boa separação entre eles, embora a separação efetiva dos modos na prática dependa da complexidade da estrutura e da distância entre o atuador e os sensores. A título de exemplo, mostra-se na Figura 2 um sinal experimental de excitação utilizado neste estudo, que é um sinal *burst* de três ciclos e frequência de 70 kHz modulado pela janela Hanning, e o sinal experimental recebido por um dos sensores a uma distância de 425 mm do atuador.

Figura 2 – Sinal de excitação experimental e sinal recebido por um sensor a uma distância de 425 mm do atuador destacando os pacotes correspondentes aos modos S_0 e A_0 .

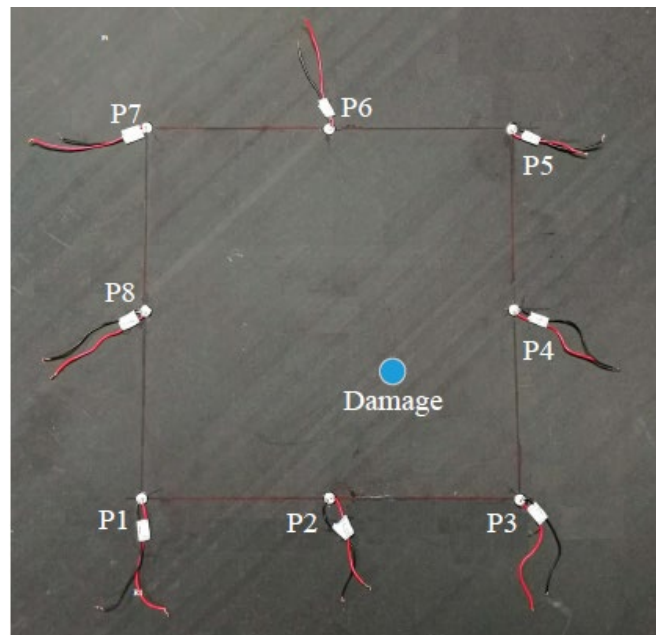


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode ser visto no sinal recebido, os dois pacotes relativos aos modos S_0 e A_0 podem ser facilmente separados, pois para esta frequência as velocidades de propagação dos dois modos são significativamente diferentes. Variações nos sinais recebidos pelos sensores podem estar relacionadas a danos estruturais, conforme descrito abaixo.

Portanto, vários transdutores podem ser utilizados para a detecção e localização satisfatórias do dano estrutural. Um arranjo experimental típico para a detecção de dano em uma placa de material compósito utilizando o método das ondas de Lamb é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Arranjo experimental típico do método das ondas de Lamb.



Fonte: Adaptado de Zeng; Lin; Huang, 2017.

No exemplo mostrado na Figura 3, oito transdutores foram instalados em uma placa de material compósito do tipo polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) (ZENG; LIN; HUANG, 2017). Assim, enquanto um transdutor está operando como atuador, sete transdutores operam como sensores. O transdutor utilizado como atuador pode ser alternado entre os oito transdutores existentes, obtendo-se vários caminhos de propagação de onda para uma localização satisfatória do dano estrutural.

Os sinais nos sensores piezoelétricos são da forma (YU; TIAN, 2016):

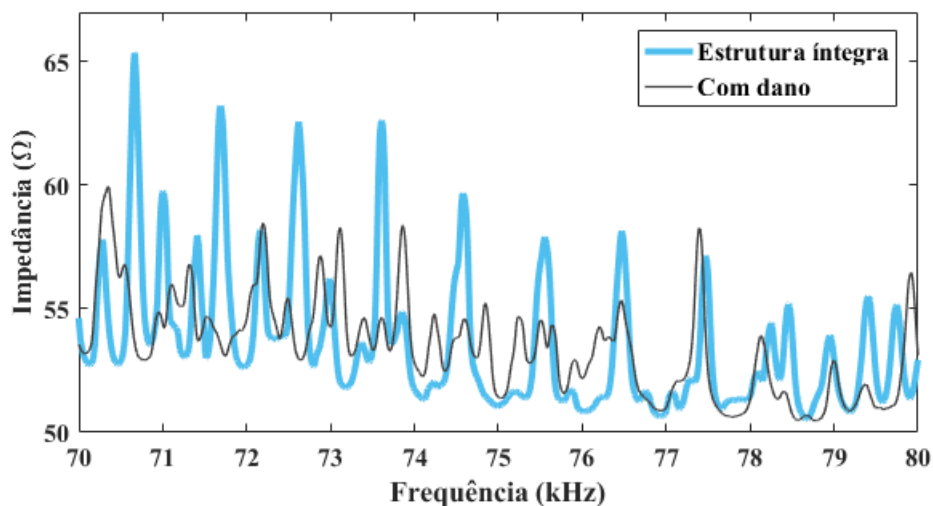
$$u(t, x) = Ae^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})}, \quad (6)$$

sendo t o tempo, x a norma do vetor \mathbf{x} de localização do sensor, \mathbf{k} o vetor do número de onda, ω a frequência angular, A a amplitude e j a unidade imaginária.

2.3 – Princípio de detecção de danos

Tipicamente, a detecção do dano é feita de forma comparativa, isto é, comparando-se duas assinaturas de impedância, sendo que uma delas é obtida quando a estrutura está em um estado considerado íntegro, também conhecida como *baseline*. Como um exemplo, duas assinaturas de impedância obtidas em estado íntegro e após um dano estrutural para uma barra de alumínio de 1100 x 76 x 3 mm e um transdutor circular de 20 x 0.20 mm são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de assinaturas de impedância antes e após um dano estrutural.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 4, um dano estrutural causa alterações significativas na assinatura de impedância. Essas alterações podem ser analisadas quantitativamente por meio de índices de dano que comparam as duas assinaturas. Entre os índices de dano, dois são amplamente reportados na literatura (FARRAR; WORDEN, 2013): o RMSD (*root mean square deviation* – desvio da raiz média quadrática), que é baseado na norma Euclidiana entre as assinaturas, e o CCDM (*correlation coefficient deviation metric* –

métrica do desvio do coeficiente de correlação), que é baseado no coeficiente de correlação entre as duas assinaturas.

Já na técnica de detecção de dano baseada nas ondas de Lamb, a presença de um dano estrutural no caminho de propagação da onda entre o atuador e um sensor altera o respectivo sinal recebido $u(t, x)$. Portanto, o dano estrutural pode ser detectado por meio de índices de dano que, de forma semelhante ao método da impedância E/M, compara os sinais $u(t, x)$ durante o monitoramento da estrutura com os sinais de referência (*baseline*) coletados para a estrutura considerada em um estado íntegro. Um dos índices utilizados no método das ondas de Lamb é baseado no coeficiente de correlação (GAO *et al.*, 2017). Os índices obtidos entre os diversos caminhos de propagação de onda podem ser utilizados para a geração de uma imagem de probabilidade de dano da estrutura, como apresentado nessa seção.

As ondas Lamb carregam muitas informações sobre a estrutura. Portanto, o processamento adequado dos sinais dos sensores piezelétricos é de grande importância. O processamento de sinal eficiente extrai informações úteis do sinal bruto, como frequência, energia, tempo de propagação ou, como largamente utilizado na literatura, tempo de voo (TOF - *time of flight*), entre outros. A extração desses recursos pode ser realizada no domínio do tempo, domínio da frequência ou ambos. Parte do processamento do sinal digital pode ser executado no domínio do tempo usando a transformada de Hilbert, correlação e método de reversão no tempo. No domínio da frequência, o processamento do sinal pode ser realizado usando a transformada rápida de Fourier (FFT- *Fast Fourier Transform*) e no domínio tempo-frequência, como a transformada de Fourier de curto tempo (STFT - *Short-time Fourier transform*) e a transformada wavelet. Além do processamento de sinal adequado, a extração de recursos geralmente é realizada usando um índice de dano para detectar e quantificar o dano estrutural. Nesta tese, o algoritmo de

reconstrução para inspeção probabilística de danos (RAPID - *Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage*) (ZHAO *et al.*, 2007; AZUARA *et al.*, 2020) foi usado para identificar visualmente os danos estruturais. Este algoritmo estima a ocorrência de dano em qualquer posição na estrutura com coordenadas (x, y) e é calculado da seguinte forma (ZHAO *et al.*, 2007).

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{i=1, j \neq i}^N I_{ij} \left[\frac{\beta - R_{ij}(x, y)}{\beta - 1} \right] \quad (7)$$

$$R_{ij}(x, y) = \begin{cases} RD_{ij}(x, y) & \text{se } RD_{ij}(x, y) < \beta \\ 0 & \text{se } RD_{ij}(x, y) \geq \beta \end{cases} \quad (8)$$

$$RD_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \quad (9)$$

sendo que $P(x, y)$ é o valor da probabilidade de dano com a coordenada (x, y) , N é o número de transdutores, i indica o transdutor operando como um atuador (transmissor) e j os outros transdutores operando como sensores (receptores), $RD_{ij}(x, y)$ é a razão da soma das distâncias de um ponto (x, y) para o atuador i com as coordenadas (x_i, y_i) e o sensor j com as coordenadas (x_j, y_j) , e a distância entre os dois transdutores considerando as distâncias centro a centro, β é o parâmetro da escala e foi definido como 1,05 para uma área de distribuição elíptica adequada (ZHAO *et al.*, 2007), e I_{ij} é o índice de dano. Neste trabalho, o índice de dano (I_{ij}) é baseado no valor da raiz quadrada média (RMS) conforme proposto em (RIZZO; SCALEA, 2006), que foi modificado neste trabalho para ser calculado utilizando a transformada wavelet discreta (DWT – *discrete wavelet transform*) dos sinais brutos dos transdutores. O índice é dado por

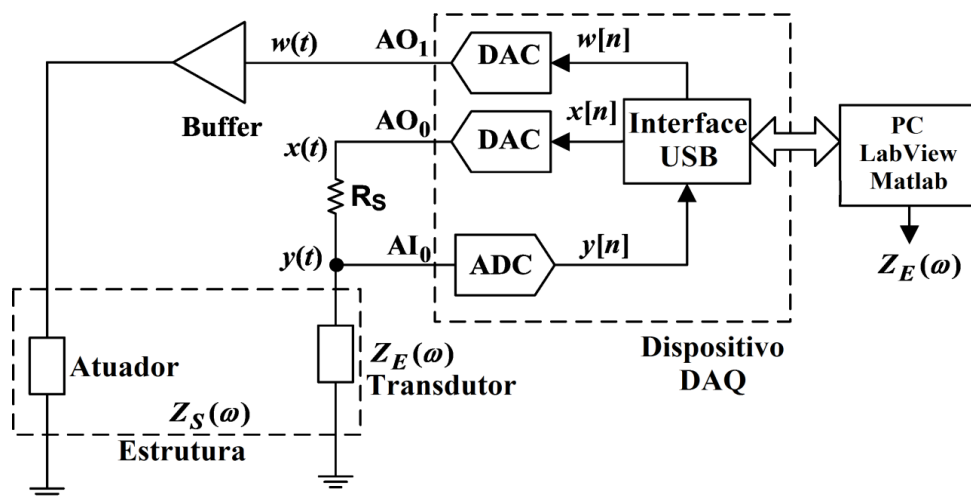
$$I_{ij} = (RMS(D_{ij}) - RMS(H_{ij}))^2 \quad (10)$$

sendo que H_{ij} e D_{ij} são as transformações wavelet do sinal bruto do sensor j quando o atuador é o transdutor i obtido para a estrutura nas condições saudáveis e danificadas, respectivamente. Além disso, foi utilizada a wavelet de Daubechies com nível de aproximação 4 ($db4$). Este algoritmo fornece um mapa de cores, permitindo detectar, quantificar e localizar danos estruturais, e foi usado para avaliar a viabilidade de diafragmas piezelétricos na detecção de danos com base em ondas de Lamb. O sistema de medição usado nesta tese é apresentado na próxima seção.

2.4 – Sistema de medição

Nesta tese, utilizou-se um sistema de medição alternativo (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009) baseado em um dispositivo DAQ e um computador (PC) para o processamento do sinal. O sistema foi modificado para gerar o ruído enquanto as assinaturas de impedância e os sinais de Lamb do transdutor eram obtidas. O sistema E/M é mostrado na Figura 5.

Figura 5: Sistema usado para medição de impedância e geração de ruído e vibração.



Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 5, a medição da impedância é baseada no divisor de tensão constituído pela resistência em série (R_S) e pelo transdutor. O sinal de excitação ($x(t)$) é gerado pela saída analógica – *analog output* (AO_0) do conversor digital-analógico – *digital-analog converter* (DAC) e o sinal de resposta do transdutor ($y(t)$) é amostrado pela entrada analógica – *analog input* (AI_0) do conversor analógico-digital – *analog-digital converter* (ADC). Os sinais $x[n]$ e $y[n]$ são os sinais de excitação e de resposta, respectivamente, em tempo discreto. Para assegurar boa repetição do sistema de medição, o sinal de resposta ($y(t)$) do transdutor deve ser amostrado de forma sincronizada com a geração do sinal de excitação ($x(t)$).

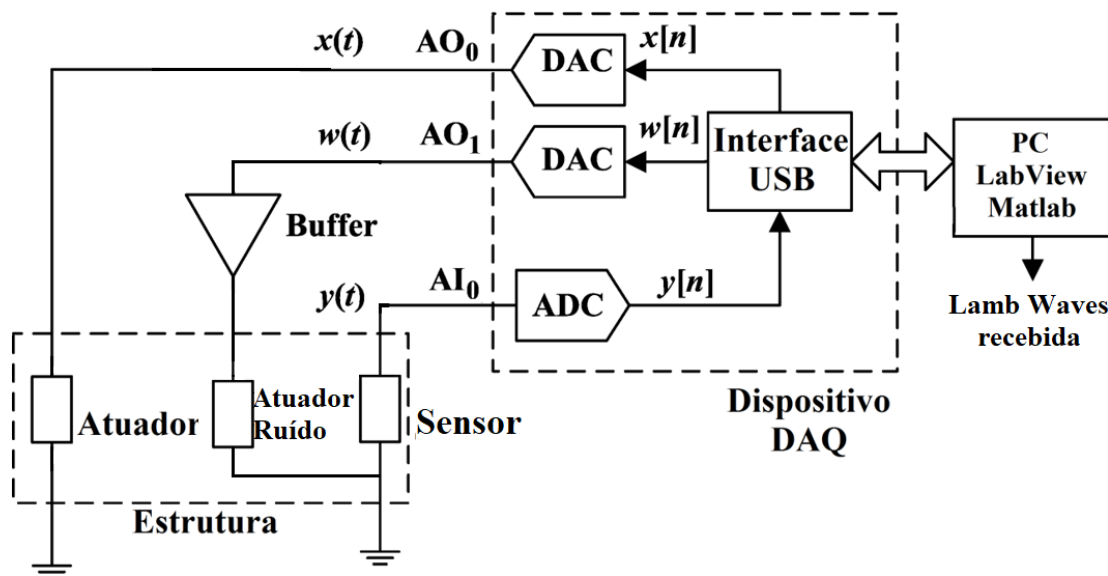
Considerando que a impedância da entrada analógica é alta, ela pode ser desconsiderada e a impedância elétrica do transdutor ($Z_E(\omega)$) é dada por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009)

$$Z_E(\omega) = R_S \frac{H(\omega)}{1 - H(\omega)} \quad (11)$$

sendo que $H(\omega)$ é a função de resposta em frequência (FRF), tomando o sinal de excitação ($x[n]$) como entrada e o sinal de resposta ($y[n]$) como saída.

O sistema das Ondas de Lamb é apresentado na Figura 6.

Figura 6: Sistema usado para geração e aquisição das ondas de Lamb e geração de ruído.



Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 6, a geração da Lamb wave ($x(t)$) é dado pela saída analógica – *analog output* (AO_0) do conversor digital-analógico – *digital-analog converter* (DAC) e o sinal de resposta do transdutor ($y(t)$) é amostrado pela entrada analógica – *analog input* (AI_0) do conversor analógico-digital – *analog-digital converter* (ADC). Os sinais $x[n]$ e $y[n]$ são os sinais de excitação e de resposta, respectivamente, em tempo discreto. Assim como no método da impedância eletromecânica, o ruído nas ondas de Lamb é gerado de mesma forma. Em ambos os métodos, para se verificar os efeitos do ruído na detecção de danos estruturais, um *buffer* foi necessário para a excitação adequada do atuador, uma vez que a corrente de saída de dispositivos de aquisição estão na ordem de alguns miliamperes, e a corrente do sistema aumenta com o aumento na frequência de excitação do sistema. Os sinais $w(t)$ e $w[n]$ são os sinais de ruído gerados em tempo contínuo e discreto, respectivamente. Na próxima seção é apresentado o conceito de ruído.

2.5 – Conceito de ruído

O ruído é um sinal aleatório e não contém componentes de frequência bem definidas, podendo ocorrer em qualquer faixa do espectro de frequência. O ruído aleatório pode ser gerado por vários tipos de fontes, tais como: aviões, carros, caminhões, iluminação, ventos, radiação solar e entre outros. O mesmo, também pode ser gerado por transdutores piezelétricos, condutores e sistemas de medição a variação de temperatura interna dos componentes e de outras causas.

Os efeitos do ruído sobre as assinaturas de impedância e nas ondas de Lamb podem ser avaliados quantitativamente calculando-se a função de coerência entre o sinal de excitação ($x[n]$) e o sinal de resposta ($y[n]$) do transdutor, como mostrado na Figura 6. A função de coerência foi calculada como

$$C_{xy}(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \quad (12)$$

sendo que $C_{xy}(\omega)$ é a magnitude ao quadrado da coerência; $S_{xx}(\omega)$ e $S_{yy}(\omega)$ são as estimativas da PSD do sinal de excitação e do sinal de resposta, respectivamente; e $S_{xy}(\omega)$ é a PSD cruzada.

Em uma condição ideal, os sinais de excitação e resposta são totalmente coerentes e, portanto, $C_{xy}(\omega) = 1$ em toda a faixa de frequência. Entretanto, se os sinais são contaminados por ruído, a coerência tende a diminuir nas bandas de frequência em que eles ocorrem. O próximo capítulo apresenta um estudo de viabilidade e validação dos diafragmas piezelétricos para aplicação nas Ondas de Lamb em detecção de dano estrutural.

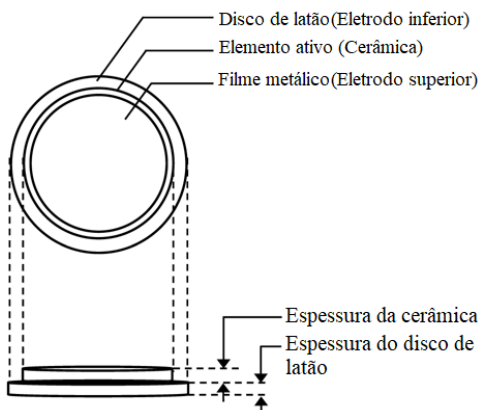
Capítulo 3

Aplicação dos diafragmas piezelétricos em monitoramento estrutural utilizando as Ondas de Lamb. Um estudo de viabilidade.

3.1 - Diafragmas piezelétricos

Conforme mencionado no Capítulo 1, os diafragmas piezelétricos são amplamente utilizados em vários dispositivos eletrônicos, fabricados em tamanhos padronizados por diferentes empresas e, portanto, estão prontamente disponíveis. Esses dispositivos consistem em um disco metálico (geralmente de latão ou liga de níquel), que atua como um eletrodo de suporte inferior, sobre o qual é montado um disco de cerâmica piezelétrica (geralmente titanato de bário ou PZT), que é o elemento ativo, coberto por um fino filme metálico que serve como eletrodo superior. Eles são comercialmente especificados pelo diâmetro do disco de metal, que normalmente varia de 12 mm a 41 mm. Mostra-se na Figura 7 a estrutura de um diafragma piezelétrico.

Figura 7: Estrutura de um diafragma piezelétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 7, a principal diferença construtiva de um diafragma piezelétrico em relação a uma cerâmica convencional é a presença do disco de latão. Enquanto as cerâmicas convencionais são fixadas diretamente na estrutura a ser monitorada por meio de uma fina camada adesiva, nos diafragmas piezelétricos, além da camada adesiva, existe o disco de latão. Portanto, os diafragmas piezelétricos consistem na união de duas estruturas. A presença do disco de latão não altera as propriedades elétricas e piezelétricas do elemento ativo (cerâmica). Por outro lado, as frequências de ressonância são alteradas. Como é bem conhecido, as ressonâncias simétricas acontecem quando o diâmetro da cerâmica piezelétrica é um múltiplo par de meio comprimento de onda das ondas elásticas que viajam na cerâmica e na estrutura. Ressonâncias antissimétricas acontecem para múltiplos ímpares (GIURGIUTIU,2014). À medida que o disco de latão aumenta o tamanho do transdutor, os comprimentos de onda nos quais as ressonâncias ocorrem também aumentam. Portanto, como as frequências ressonantes são inversamente proporcionais aos comprimentos de onda, elas são reduzidas. Conseqüentemente, isso afeta a frequência ideal para gerar e detectar ondas Lamb, que também depende da correspondência entre o tamanho do transdutor e metade do comprimento de onda. As

simulações de FEM e resultados experimentais confirmaram esta conjuntura e indicaram que, apesar de uma ligeira mudança na sintonia de frequência, o disco de latão não altera significativamente a eficiência na geração e detecção de ondas Lamb. Para confirmar essa conjuntura, foram avaliados cinco diafragmas piezelétricos da Murata Electronics North America, Inc. (Smyrna, GA, EUA) com o diâmetro da placa de latão variando de 12 mm a 35 mm. Os resultados obtidos para os diafragmas foram comparados com transdutores convencionais, cerâmicas piezelétricas SMD10T02F412ST e SMD10T04R111 da STEMiNC Steiner & Martins, Inc (Devenport, FL, EUA), que possui cerâmicas semelhantes amplamente relatadas na literatura em estudos sobre ondas de Lamb (MA;YU,2021; ZOUBI *et al.*,2019; LI *et al.*,2020). Mostra-se na Figura 8 os transdutores utilizados nos ensaios experimentais, e na Tabela 1 são apresentadas as dimensões das bases de latão e de seus respectivos elementos ativos, bem como as constantes piezelétricas (d_{31} , d_{33}), constante dielétrica ($\epsilon^{T_{33}}/\epsilon_0$) e capacitância estática nominal (C_0) obtida em uma frequência de teste de 1 kHz.

Figura 8: Transdutores piezelétricos avaliados nesse estudo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 1

Dimensão dos transdutores e as propriedades principais

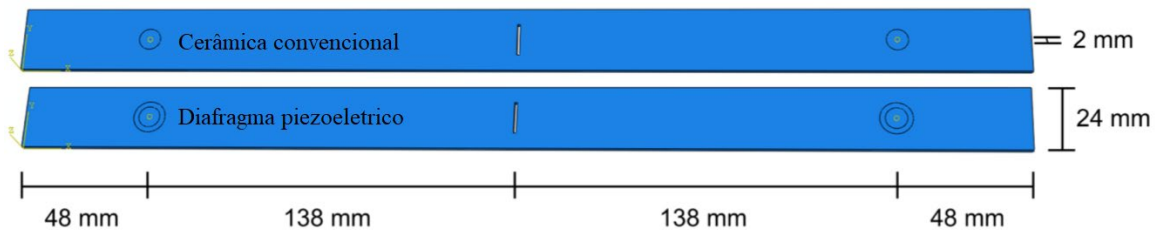
	Modelo	Latão		Elemento ativo		Propriedades do material			
		Diametro (mm)	Espessura (mm)	Diametro (mm)	Espessura (mm)	d_{31} (pm/V)	d_{33} (pm/V)	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	C_0 (nF)
Diafragma Piezoelétrico	7BB-12-9	12.0	0.10	9.0	0.12	-207	410	2100	8.0
	7BB-15-6	15.0	0.10	10.0	0.12	-207	410	2100	10.0
	7BB-20-6	20.0	0.20	14.0	0.22	-207	410	2100	10.0
	7BB-27-4	27.0	0.30	19.7	0.24	-207	410	2100	20.0
	7BB-35-3	35.0	0.30	25.0	0.23	-207	410	2100	30.0
Cerâmica Convencional	SMD10T04R111	-	-	10.0	0.40	-140	320	1400	2.1
	SMD10T02F412ST	-	-	10.0	0.20	-190	450	1850	5.4

Uma análise comparativa entre diafragmas piezelétricos e cerâmicas convencionais usando FEM, é apresentada na próxima seção.

3.2- Análise por simulação computacional - FEM.

Conforme mostrado na Figura 8, a principal diferença construtiva entre as cerâmicas convencionais e os diafragmas piezelétricos é a presença do disco metálico (diafragma). Para avaliar a influência do disco metálico na geração e recepção das ondas Lamb, bem como na detecção de danos estruturais, foram realizadas simulações FEM básicas utilizando o software Abaqus (Student Edition License, 2020). Mostra-se na Figura 9 as estruturas utilizadas nas simulações. Duas cerâmicas piezelétricas com 8 mm de diâmetro e 0,12 mm de espessura, uma operando como atuador e a outra como sensor, foram colocadas em uma barra de alumínio de 372 mm x 24 mm x 2 mm a 48 mm de cada extremidade da barra. Para simular os diafragmas piezelétricos, foi utilizada uma estrutura idêntica, mas com a inclusão de discos de latão com diâmetro variando de 12 mm a 18 mm e espessura de 0,10 mm. A camada adesiva foi assumida como suficientemente fina e rígida e, portanto, desconsiderada nas simulações, uma vez que nessas condições o acoplamento ideal entre os transdutores e a estrutura pode ser alcançado assintoticamente (GIURGIUTIU,2005). Materiais piezelétricos idênticos com as mesmas propriedades foram usados em ambos os tipos de transdutores a fim de analisar o efeito do disco de latão e obter resultados relativos entre os dois casos. Para simular danos estruturais, fissuras de 12 mm × 1 mm com profundidade cruzando a placa foram inseridas no centro da placa na direção ortogonal ao caminho entre o sensor e o atuador, conforme mostrado na Figura 9. Essa configuração foi escolhida garantir uma malha quadrada uniforme com mais de 10 nós por comprimento de onda, que se mostrou adequada (ALLEYNE; CAWLEY,1991) , permitindo simulações com frequências de até 50 kHz. As simulações foram realizadas utilizando o *Implicit solver, full Newton*, com malhas de 6 mm para a estrutura, 2 mm para o elemento piezelétrico e 4 mm para o disco de latão.

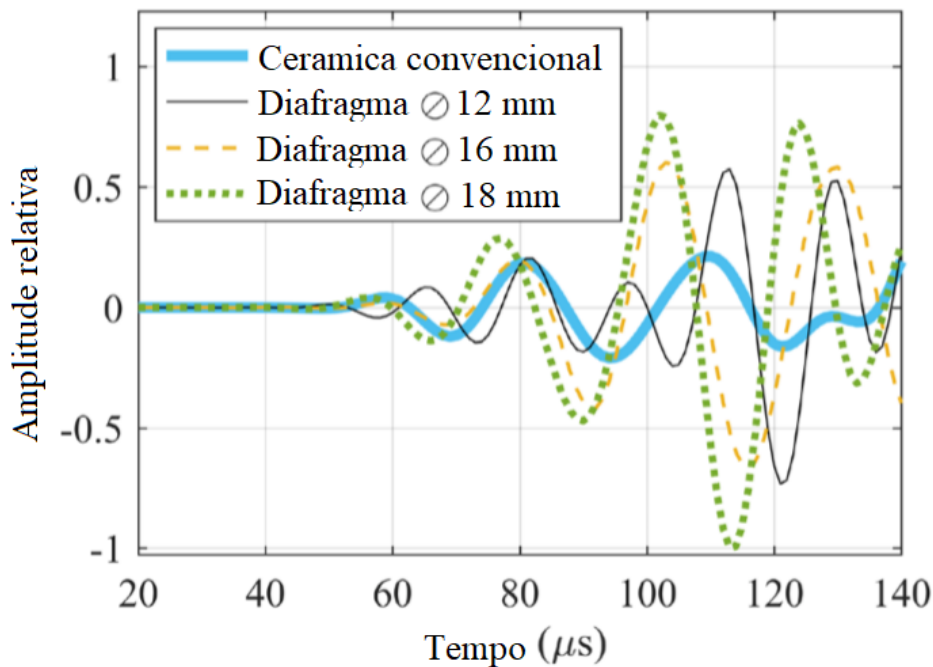
Figura 9 – Estruturas utilizadas na simulação computacional - FEM.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na primeira simulação, os atuadores foram excitados com um sinal *burst* semelhante ao mostrado na Figura 2 com frequência de 50 kHz, o qual foi escolhido para viabilizar as simulações. Os sinais elétricos recebidos pelos dois tipos de transdutores, cerâmica convencional e diafragma com disco de latão com diâmetros de 12, 16 e 18 mm, considerando a estrutura íntegra (sem trinca) são mostrados na Figura 10.

Figura 10 – Sinais elétricos obtidos dos diafragmas piezelétricos com disco de latão de diferentes diâmetros e cerâmica convencional usando simulação FEM.

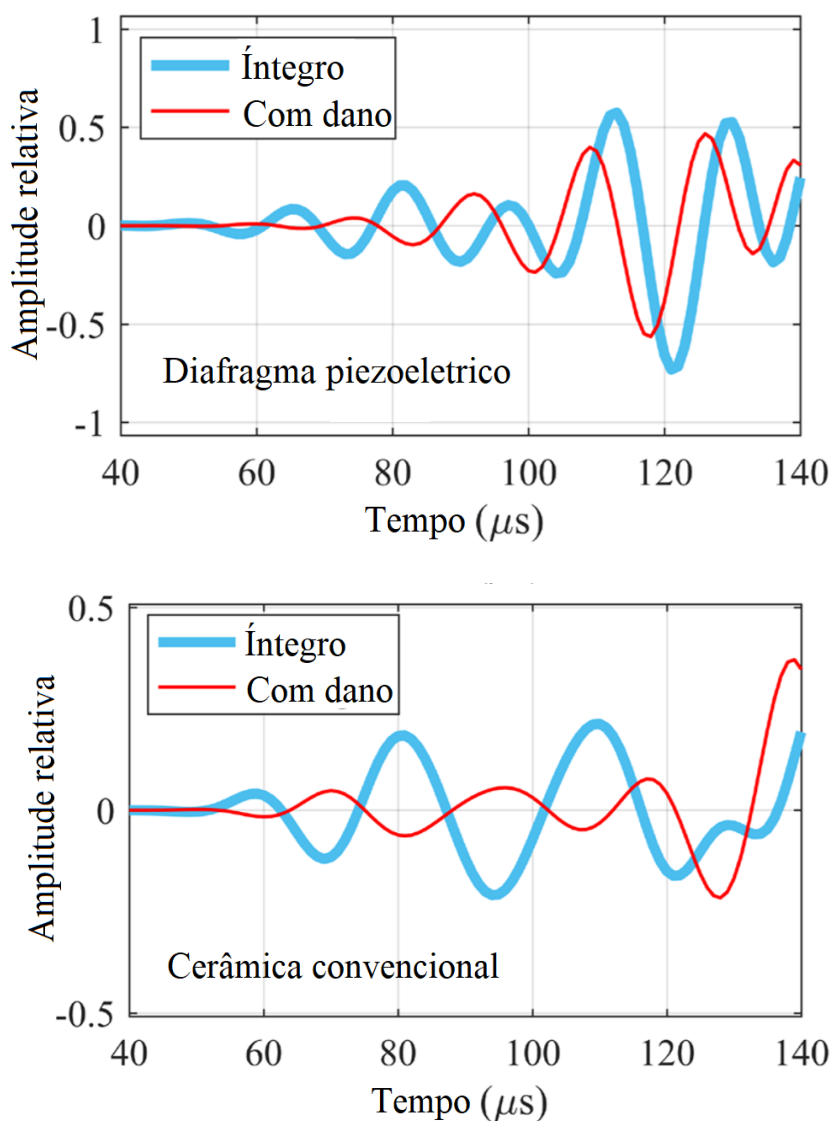


Fonte: Elaboração do próprio autor.

É visto que os diafragmas piezelétricos podem gerar e receber ondas de Lamb. A amplitude do sinal gerado pelo diafragma é maior do que o sinal gerado pela cerâmica convencional e aumenta à medida que o diâmetro do disco de latão aumenta. Como é bem sabido, o acoplamento máximo é obtido quando o diâmetro do transdutor é igual a metade do comprimento de onda de um determinado modo de propagação (GIURGIUTIU,2005). Portanto, a presença do disco metálico aumenta o comprimento de onda ideal, o que conseqüentemente resulta em amplitudes maiores em frequências mais baixas em comparação com as cerâmicas convencionais. Os resultados experimentais apresentados na Seção 3.3 confirmam essa conjuntura. Os resultados experimentais também mostram o efeito oposto, ou seja, diafragmas com diâmetros maiores tendem a fornecer amplitudes menores em altas frequências. Na segunda simulação, os transdutores foram avaliados para

a detecção de dano estrutural, que é a trinca a meio caminho entre os atuadores e os sensores, conforme mostrado na Figura 9. As variações nos sinais dos dois tipos de transdutores causadas pelo dano são apresentadas na Figura 11, que foi obtido usando o diafragma com um disco de latão de 12 mm.

Figura 11 – Variações de sinal devido a danos estruturais obtidos por simulação FEM.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observam-se claramente variações significativas nos sinais dos dois transdutores,

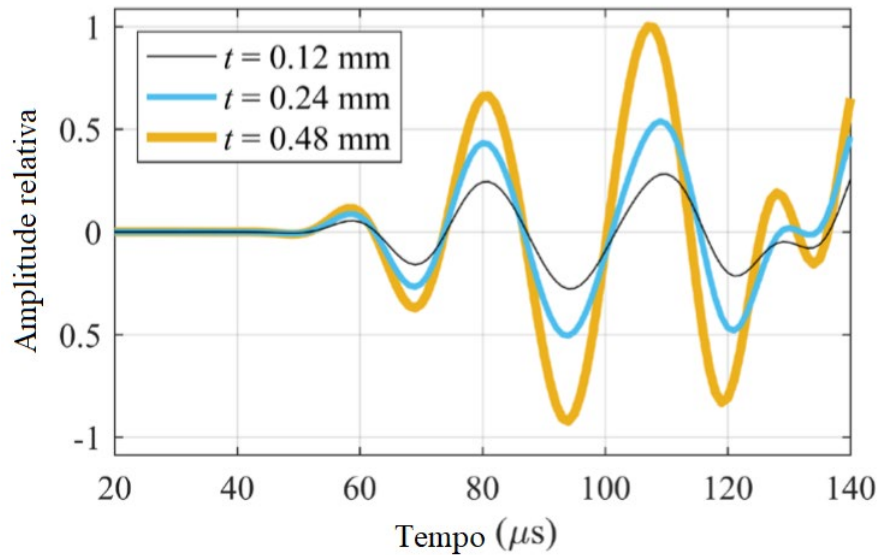
indicando que os diafragmas piezelétricos são capazes de detectar danos estruturais, embora as variações na cerâmica convencional sejam mais significativas. Embora o diâmetro do transdutor afete o comprimento de onda (λ , portanto, a frequência) de acoplamento máximo, sua espessura afeta a amplitude do sinal elétrico gerado. A partir do princípio do efeito piezelétrico (IEEE STANDARD,1988), a tensão (V) gerada por um transdutor que sofre uma força perpendicular (F_3) é dada, de forma simplificada, como (IEEE STANDARD,1988)

$$V = \frac{d_{33} t}{\epsilon_{33} A} F_3 \quad (13)$$

sendo que d_{33} e ϵ_{33} são as constantes piezelétricas e dielétricas, respectivamente, A é a área das faces do transdutor e t é sua espessura.

De acordo com a Equação (9), se os demais parâmetros permanecerem inalterados, a tensão (V) gerada pelo transdutor é diretamente proporcional à sua espessura (t). Embora o diâmetro dos diafragmas piezelétricos varie amplamente, a espessura do elemento ativo é apenas uma fração de um milímetro, no máximo de 0,2 mm conforme mostrado na Tabela 1. Em contraste, cerâmicas convencionais podem ser encontradas com espessuras maiores que podem exceder 10 milímetros. Portanto, para verificar a relação entre a espessura e a amplitude do sinal elétrico gerado, foram realizadas simulações alterando a espessura da cerâmica convencional. Mostram-se na Figura 12 os sinais gerados para a estrutura saudável e cerâmica com espessuras (t) de 0,12, 0,24 e 0,48 mm. Os outros parâmetros permaneceram inalterados.

Figura 12 – Variações na amplitude do sinal devido à espessura (t) da cerâmica obtida por simulação FEM.



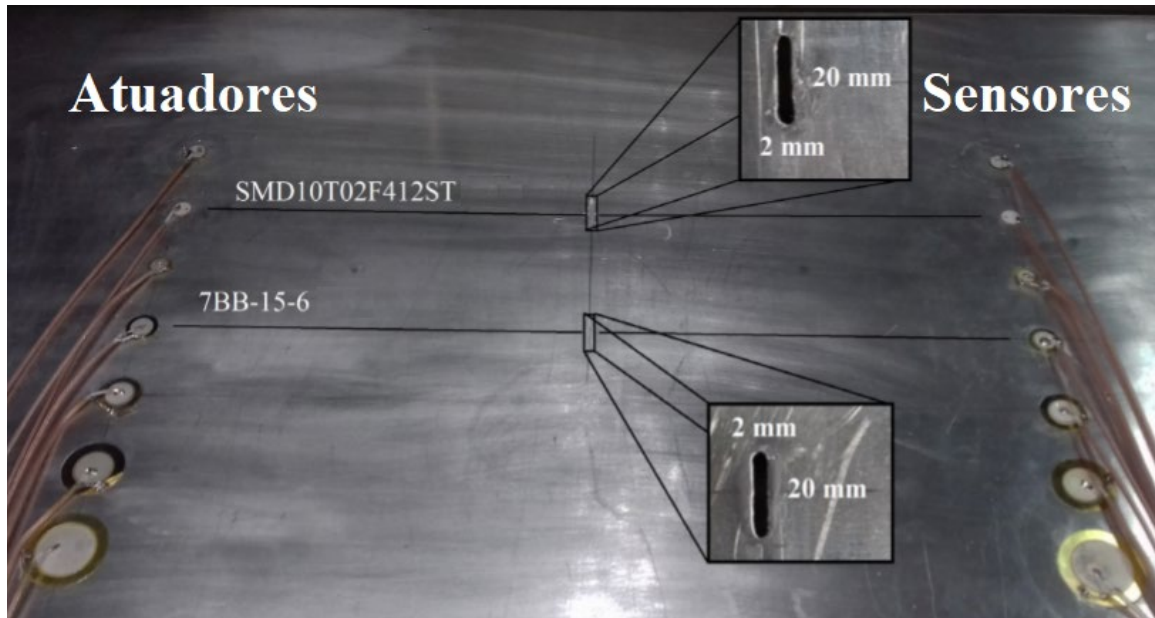
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados mostram claramente que a amplitude do sinal aumenta à medida que a espessura do transdutor aumenta. Portanto, as cerâmicas convencionais têm a vantagem sobre os diafragmas piezelétricos de permitir maiores amplitudes por meio da escolha adequada da espessura, o que melhora a relação sinal-ruído (SNR). Os diafragmas piezelétricos também foram avaliados experimentalmente. A configuração experimental é apresentada na próxima seção.

3.3 – Procedimento experimental

Testes experimentais foram realizados em placas de alumínio para avaliar os diafragmas piezelétricos para gerar e receber ondas de Lamb, bem como detectar danos estruturais, os efeitos da variação de temperatura e a repetibilidade dos resultados. O primeiro teste teve como objetivo analisar a viabilidade dos diafragmas em gerar e receber ondas de Lamb. Para isso, sete pares de transdutores mostrados na Figura 8 e na Tabela 1 foram fixados em uma placa de alumínio de 1000 mm × 500 mm × 2 mm com adesivo de cianoacrilato. Tomou-se cuidado para que a camada adesiva fosse fina e uniforme. Para cada par, um transdutor foi utilizado como atuador (transmissor) e outro como sensor (receptor), sendo cada atuador excitado individualmente. Cada par foi fixado lado a lado a uma distância de 40 mm, sendo a distância entre o atuador e o sensor de cada par foi de 425 mm. As distâncias vão de um centro a outro centro. Essas distâncias foram escolhidas para garantir a separação entre os modos S_0 e A_0 . Mostra-se na Figura 13 a placa com os transdutores instalados.

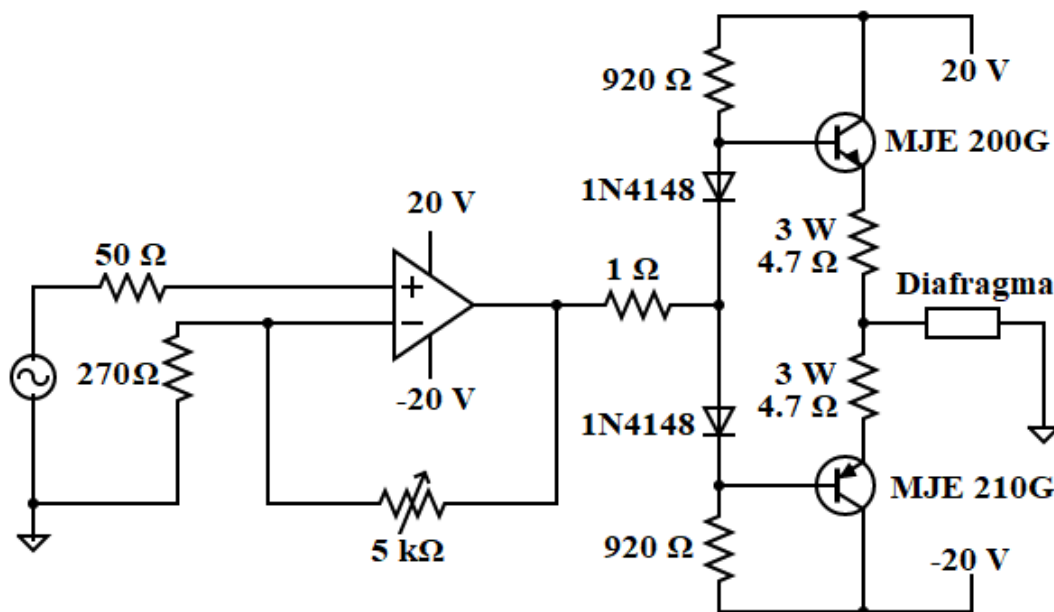
Figura 13 – Teste realizado para avaliar a viabilidade de diafragmas piezelétricos para gerar e receber ondas de Lamb sintonizadas. Nos destaques, rachaduras nos caminhos entre os diafragmas 7BB-15-6 e as cerâmicas SMD10T02F412ST (referência) que foram feitas posteriormente para testes básicos de detecção de danos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para um sinal de excitação, um *burst* de 3 ciclos modulado pela janela Hanning e 35 Vpp como mostrado na Figura 2 foi gerado usando um gerador de forma de onda NI PXIe-5413 com conversores digital-analógico (DAC) de 16 bits e um amplificador baseado no chip ADA4870 da Analog Devices usado como amplificador. Mostra-se na Figura 14 o esquema elétrico do circuito do amplificador utilizando o chip ADA4870.

Figura 14 – Esquema elétrico do circuito utilizando amplificador operacional.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os sinais recebidos pelos sensores foram amostrados usando um osciloscópio NI PXIe-5105 com conversores analógico-digital (ADC) de 12 bits e frequência de amostragem de 60 MHz. Esses dispositivos são montados em um sistema PXI modular e conectados a um computador por meio da interface PXIe-PCIE.

No segundo teste, a placa foi aquecida de 30 °C a 55 °C com passos de 5 °C usando um soprador de ar quente, que é a mesma ferramenta usada em (FREITAS; BAPTISTA, 2016), para avaliar os efeitos da temperatura nos diafragmas piezelétricos, comparando os resultados com os cerâmicas convencionais. A temperatura foi medida usando um termômetro Minipa MT-455A com termopar tipo K. Os sinais dos transdutores foram amostrados para as diferentes temperaturas usando o sistema descrito acima.

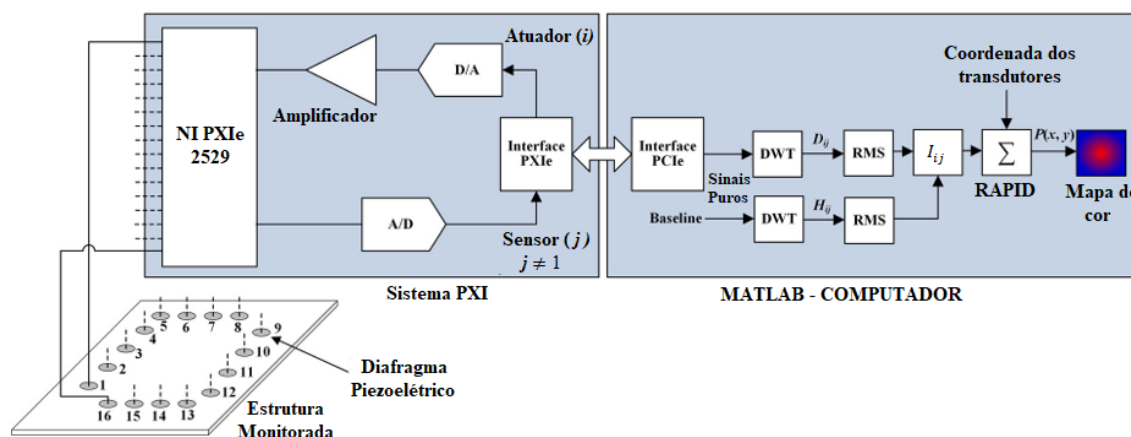
No terceiro teste, os transdutores foram avaliados quanto à repetibilidade dos resultados, tomando 100 medições de amplitude para uma determinada frequência. A

repetibilidade dos resultados dos dois tipos de transdutores foi avaliada estatisticamente por meio de histogramas, com médias e desvio padrão. No segundo e terceiro testes, o diafragma 7BB-15-6 e a cerâmica SMD10T02F412ST foram usados para comparação porque o elemento ativo do diafragma e o da cerâmica são semelhantes em tamanho, conforme mostrado na Tabela 1.

No quarto teste, os diafragmas foram avaliados para detectar, quantificar e localizar danos estruturais. Inicialmente, um teste básico para avaliar a viabilidade dos diafragmas para detectar danos estruturais foi realizado na placa contendo os sete pares de transdutores, conforme mostrado na Figura 13. Trincas de 20 mm × 2 mm atravessando a placa foram feitas sobre os caminhos de onda entre os atuadores e os sensores. Os sinais recebidos sem e com a presença de trincas foram avaliados qualitativamente e quantitativamente pelo cálculo do índice I_{ij} por meio da Equação (10). Em seguida, um teste mais completo baseado no algoritmo RAPID descrito na Seção 2.3 foi realizado usando múltiplos transdutores. Entre os diafragmas testados, o diafragma de 20 mm (7BB-20-6) apresentou o sinal de maior amplitude conforme discutido na próxima seção e foi escolhido para este teste. Sendo assim, 16 diafragmas foram fixados a uma placa de alumínio de 500 mm × 500 mm × 2 mm em um arranjo quadrado de 400 mm × 400 mm. Para simular danos estruturais, dois furos de tamanhos diferentes foram perfurados na placa, um de 1 mm de diâmetro na posição A com coordenada (150, 300) e o outro de 3 mm de diâmetro na posição B com coordenada (300, 250). Ambos os furos têm profundidade que atravessa a placa. Os transdutores foram posicionados em um arranjo quadrado para obter um mapa de cores utilizando o algoritmo RAPID, em que cada diafragma de 1 a 16 é excitado, um a um, para gerar a onda de Lamb enquanto os demais recebem as ondas, obtendo assim, uma combinação de caminhos. As posições de dano foram escolhidas aleatoriamente para verificar a viabilidade dos diafragmas piezelétricos em conjunto com o algoritmo RAPID

em localizar e detectar danos na estrutura. Uma medida usada como baseline foi feita para a estrutura em estado inteiro a ser usada como referência. Para este teste, além do osciloscópio, gerador de sinal e amplificador, um módulo matricial NI PXIe-2529 foi usado para selecionar automaticamente o atuador (i) e os sensores (j) entre os 16 diafragmas piezelétricos e obter o mapa de cor para localização de danos utilizando o algoritmo RAPID. Mostra-se na Figura 15 o diagrama esquemático simplificado do sistema. É importante observar que este sistema utiliza instrumentos comerciais para garantir resultados com exatidão e uma comparação adequada entre os transdutores. Porém, sistemas dedicados mais simples e de menor custo podem ser obtidos de acordo com a aplicação desejada.

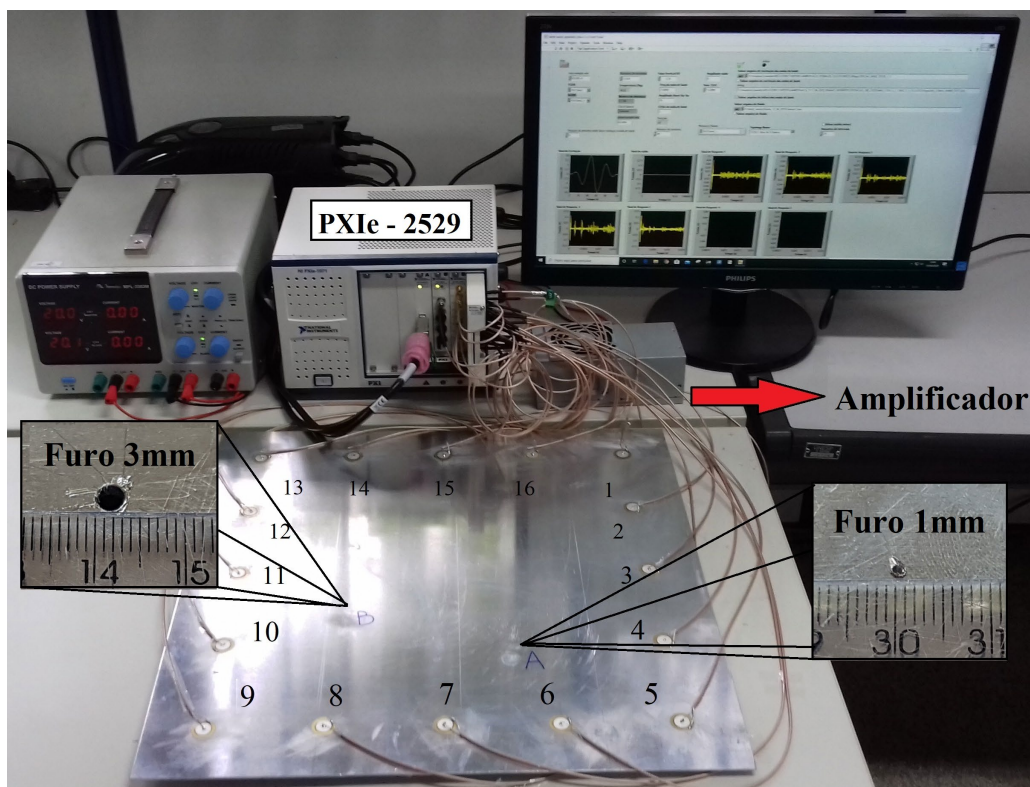
Figura 15 – Diagrama esquemático usado para detecção de dano usando as ondas de Lamb.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A placa de alumínio com os 16 diafragmas instalados é mostrada na Figura 16 a seguir e as coordenadas dos diafragmas são mostradas na Tabela 2.

Figura 16 – Configuração usada para avaliar a capacidade dos diafragmas piezelétricos em detectar danos estruturais e obter os mapas de localização de danos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 2
Coordenada dos transdutores

Diafragma	1	2	3	4	5	6	7	8
x (mm)	0	0	0	0	0	100	200	300
y (mm)	0	100	200	300	400	400	400	400
Diafragma	9	10	11	12	13	14	15	16
x (mm)	400	400	400	400	400	300	200	100
y (mm)	400	300	200	100	0	0	0	0

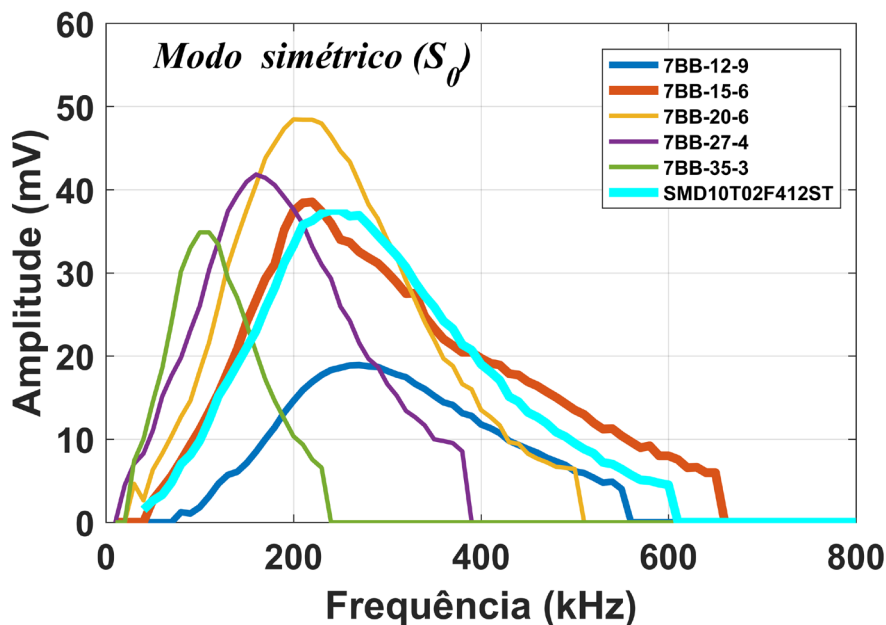
Para todos os testes, os transdutores foram conectados com cabos coaxiais do mesmo comprimento, e todas as medidas foram realizadas em temperatura controlada de 24 °C, exceto para o teste com variação de temperatura, tendo em média três medidas. As placas foram sustentadas por blocos de borracha para minimizar as vibrações do ambiente. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos na próxima seção.

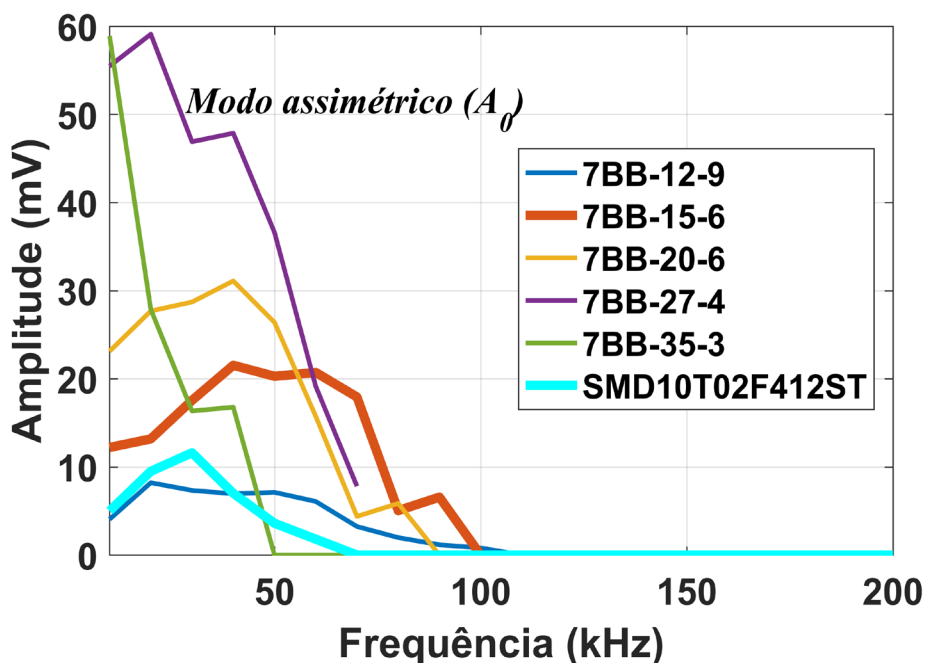
3.4 – Resultados

3.4.1- Gerando e recebendo as ondas de Lamb.

Seguindo o procedimento do primeiro teste descrito na seção anterior, os diafragmas foram avaliados para gerar e receber ondas de Lamb. Portanto, cada par de diafragmas de tamanhos diferentes tinha o atuador excitado com o sinal *burst* para diferentes frequências e o sinal correspondente detectado pelo sensor amostrado pelo osciloscópio. Para cada par de diafragmas, as amplitudes dos modos S_0 e A_0 , da mesma forma como mostrado na Figura 2, foram analisadas para cada frequência de excitação. Os resultados obtidos para os modos S_0 e A_0 são mostrados na Figura 17.

Figura 17 – Curvas de sintonia dos modos simétrico e anti-simétrico das ondas de Lamb para diferentes transdutores.





Fonte: Elaboração do próprio autor.

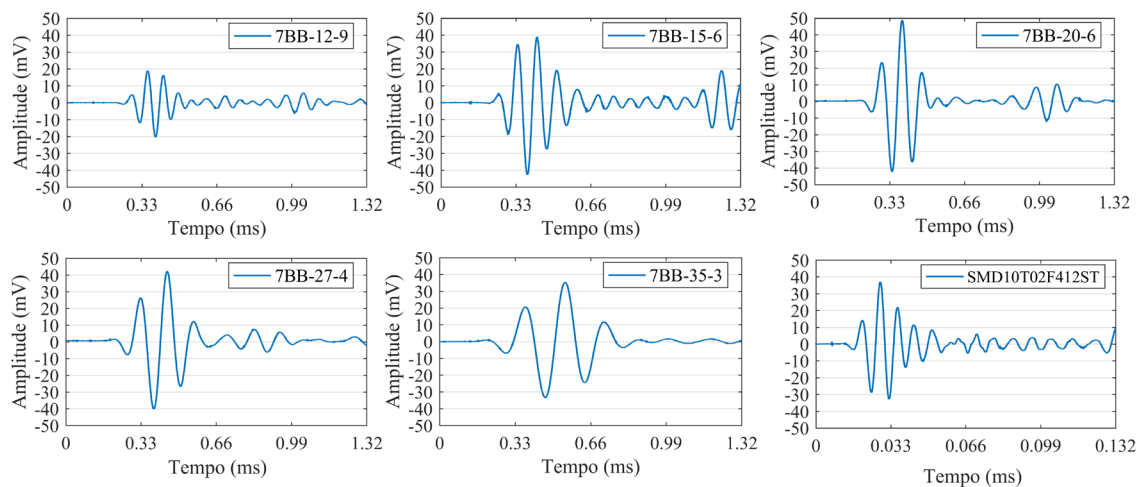
Como pode ser visto, a geração e detecção dos modos de propagação das ondas de Lamb possuem uma característica sintonizável, ou seja, a amplitude do sinal varia com a frequência de forma semelhante a um filtro passa-banda, principalmente para o modo S_0 . Para este modo, o diafragma 7BB-15-6 e a cerâmica convencional SMD10T02F412ST, que é semelhante em tamanho ao elemento ativo deste diafragma, apresentam comportamento semelhante. As amplitudes máximas desse diafragma e da cerâmica são semelhantes, com 38,5 mV em 220 kHz e 37,5 mV em 250 kHz, respectivamente. Vê-se que a frequência em que ocorre a amplitude máxima é menor para o diafragma. Conforme discutido na Seção 3.1 o disco de latão aumenta o comprimento de onda de acoplamento máximo, reduzindo, portanto, a frequência onde ocorre a amplitude máxima. Esse resultado também é observado para os demais diafragmas. Para os diafragmas de 12 mm (7BB-12-9), 20 mm (7BB-20-6), 27 mm (7BB-27-4) e 35 mm (7BB-35-3), as maiores amplitudes

foram, respectivamente, aproximadamente 19 mV (280 kHz), 48 mV (210 kHz), 42 mV (160 kHz) e 35 mV (105 kHz). Portanto, a amplitude obtida na geração e detecção de ondas de Lamb depende da frequência e tamanho do transdutor.

Em contraste, o modo A_0 não é tão bem sintonizável quanto o modo S_0 e as amplitudes mais altas ocorrem em frequências mais baixas. Este resultado é semelhante aos obtidos em outros estudos sobre a geração de ondas de Lamb com transdutores convencionais (GIURGITU,2005) embora as diferenças entre as amplitudes máximas dos dois modos no presente estudo tenham sido mais significativas. A maior amplitude de aproximadamente 59 mV foi obtida pelos diafragmas de 27 mm e 35 mm nas frequências de 20 kHz e 10 kHz, respectivamente. A cerâmica convencional SMD10T02F412ST forneceu uma amplitude em torno de 12 mV a 30 kHz. As amplitudes máximas obtidas para diafragmas de 12, 15 e 20 mm foram em torno de 8 mV (20 kHz), 22 mV (40 kHz) e 31 mV (40 kHz), respectivamente. Portanto, as curvas de sintonia da Figura 17 permitem a seleção do diafragma adequado de acordo com a frequência e o modo de propagação desejado.

Mostram-se na Figura 18 os sinais brutos recebidos pelos transdutores considerando a sensibilidade máxima (amplitude) ajustada para o modo S_0 indicado na Figura 17. De acordo com os resultados, os diafragmas piezelétricos são viáveis para gerar e detectar ondas de Lamb. O tamanho do diafragma pode ser escolhido de acordo com a frequência desejada e o modo de propagação.

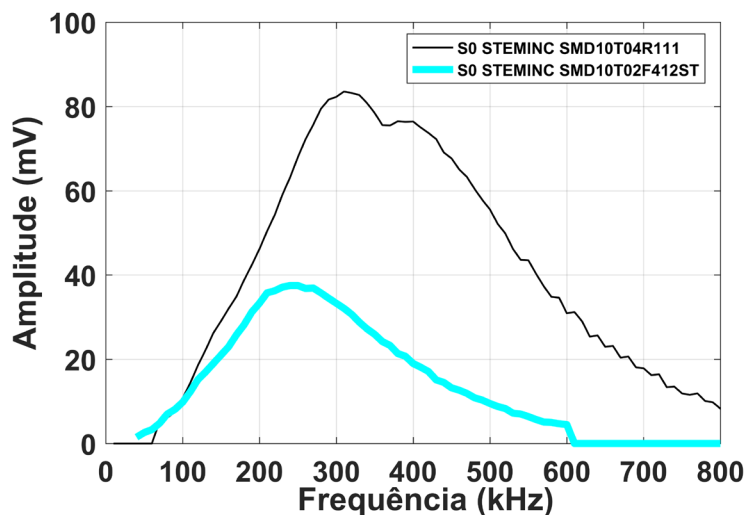
Figura 18 – Sinais brutos obtidos dos sensores considerando a frequência sintonizada na amplitude máxima do modo S_0 para o respectivo transdutor.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme discutido na Seção 3.1, as cerâmicas convencionais têm a vantagem sobre os diafragmas piezelétricos de serem produzidos com uma ampla faixa de espessura que pode exceder 10 mm, o que pode resultar em amplitudes maiores do sinal. Mostram-se na Figura 19 as amplitudes do S_0 obtidas para a cerâmica SMD10T02F412ST com espessura $t = 0,20$ mm e a cerâmica SMD10T04R111 com $t = 0,40$ mm.

Figura 19 – Variações experimentais observadas na amplitude do sinal para cerâmicas com diferentes espessuras (t).



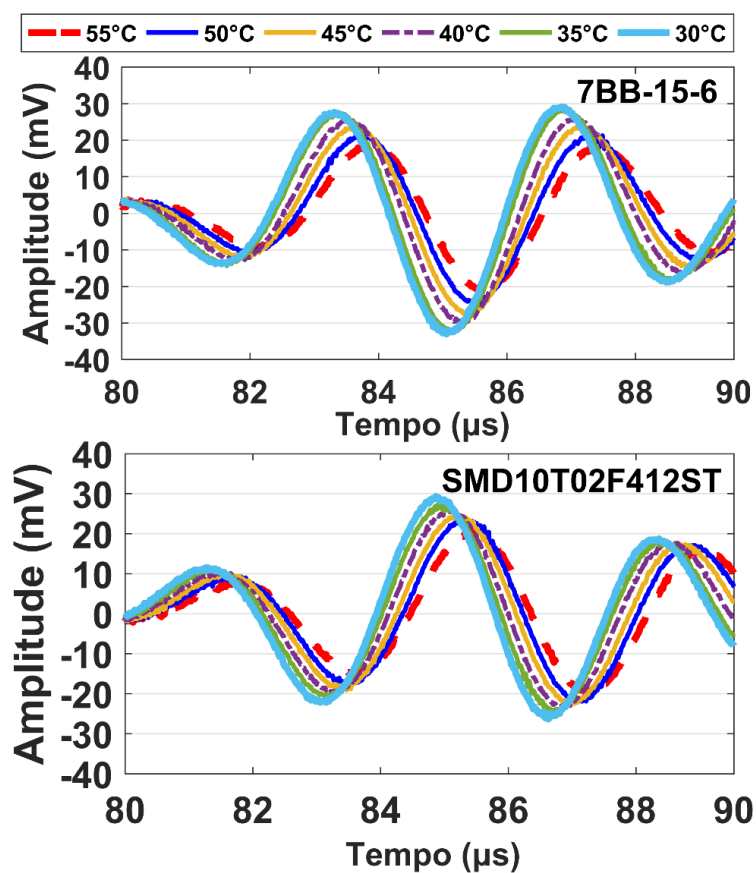
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Embora as duas cerâmicas não tenham as mesmas propriedades, conforme mostrado na Tabela 1, fica evidente o aumento da amplitude devido à maior espessura. A amplitude máxima aumentou de 37,5 mV para 83,5 mV, mais que o dobro. Outra vantagem dos transdutores mais espessos é permitir uma tensão aplicada mais alta. Embora os diafragmas piezelétricos permitam a aplicação de uma tensão máxima semelhante às cerâmicas convencionais de igual espessura, as cerâmicas mais espessas permitem tensões maiores, o que é importante na operação como atuadores. É importante notar que os diafragmas piezelétricos, bem como as cerâmicas finas, podem suportar tensões da ordem de centenas de volts, dependendo da frequência e da duração do sinal de excitação. Os resultados relativos aos efeitos da temperatura são apresentados e discutidos na próxima seção.

3.4.2- Efeitos de temperatura.

A placa com sete pares de transdutores mostrada na Figura 13, para cada par na configuração atuador-sensor, foi aquecida de 30 °C a 55 °C seguindo o procedimento descrito na Seção 3.3. Neste teste, o diafragma 7BB-15-6 e as cerâmicas SMD10T02F412ST foram consideradas porque são semelhantes em tamanho. Os atuadores foram excitados com uma frequência de 230 kHz, que está próxima da frequência de amplitude máxima. Mostram-se na Figura 20 os sinais recebidos.

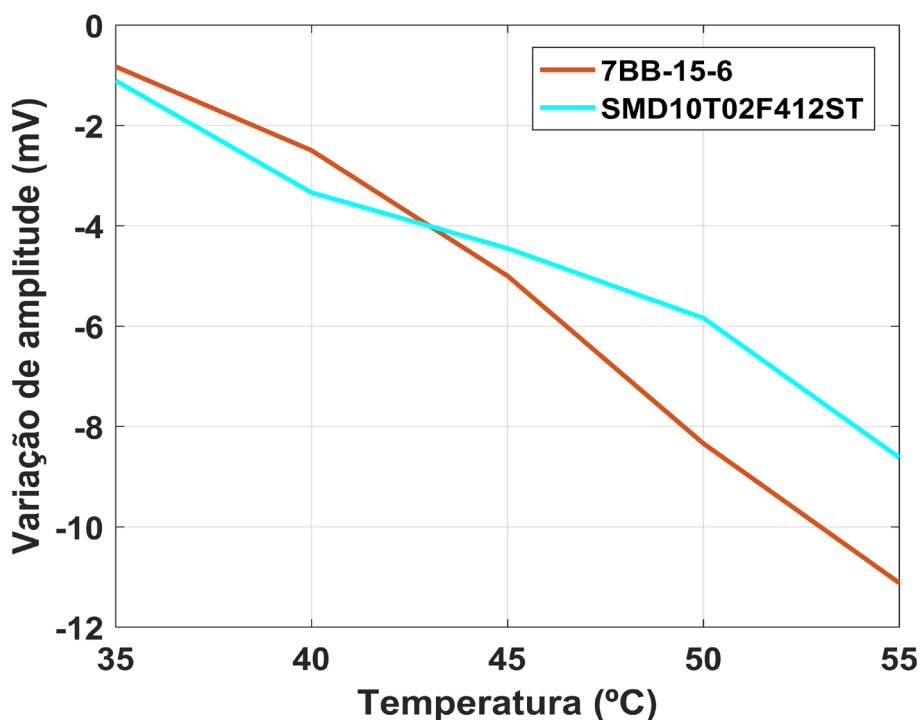
Figura 20 – Efeitos da temperatura nos sinais recebidos pelo diafragma 7BB-15-6 e pela cerâmica SMD10T02F412ST.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 20, a variação da temperatura causa deslocamentos no tempo e pequenas variações na amplitude dos sinais recebidos por ambos os transdutores. Essas variações nos sinais são esperadas. Como é bem conhecido, a variação da temperatura causa variações correspondentes na velocidade de propagação da onda devido a mudanças nas propriedades mecânicas da estrutura. Outros efeitos da variação de temperatura são mudanças nas propriedades piezelétricas dos transdutores e nas propriedades da camada adesiva entre o transdutor e a estrutura monitorada (SU; YE, 2009). Embora o comportamento dos dois transdutores seja semelhante, a variação da amplitude observada para o diafragma é ligeiramente maior. As variações de amplitude com a temperatura tendo como referência a amplitude obtida para 30 °C são mostradas na Figura 21. A amplitude do sinal da cerâmica convencional varia -8,6 mV quando a temperatura aumenta de 30 para 55 °C. Para o mesmo aumento de temperatura, a amplitude do sinal do diafragma piezelétrico varia -11,1 mV. Os resultados experimentais mostram que, apesar das variações nos sinais, não há diferença significativa no comportamento do diafragma piezelétrico em relação à cerâmica convencional quanto à variação de temperatura para aplicações baseadas em ondas de Lamb, pelo menos nas condições experimentais consideradas neste estudo.

Figura 21 – Variação na amplitude do sinal devido à temperatura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

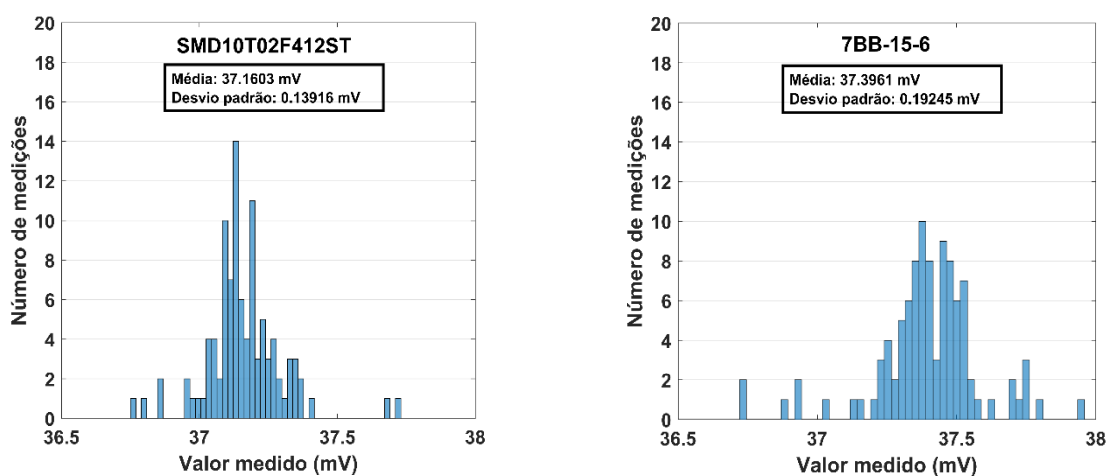
Na próxima seção são apresentados os resultados quanto a repetibilidade das medições.

3.4.3- Repetibilidade dos resultados.

A repetibilidade dos resultados é importante nos métodos de inspeção para garantir o diagnóstico correto da estrutura. A repetibilidade de um determinado método depende de diversos fatores como transdutores, instrumentos ou sistemas de geração e aquisição de sinais, estrutura e variações do ambiente. Neste estudo, os diafragmas e as cerâmicas convencionais foram analisados em condições idênticas usando o mesmo sistema mostrado na Figura 6, de forma que as diferenças observadas são devidas principalmente aos transdutores e não a outros fatores. Um total de 100 medições de tensão foram feitas a uma

frequência de 230 kHz, que é próxima à frequência que fornece a amplitude máxima. A partir dos valores medidos, foram obtidos histogramas e calculados o valor médio e o desvio padrão. Na Figura 22 são apresentados os resultados.

Figura 22 – Histogramas para avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos a partir das 100 medições.



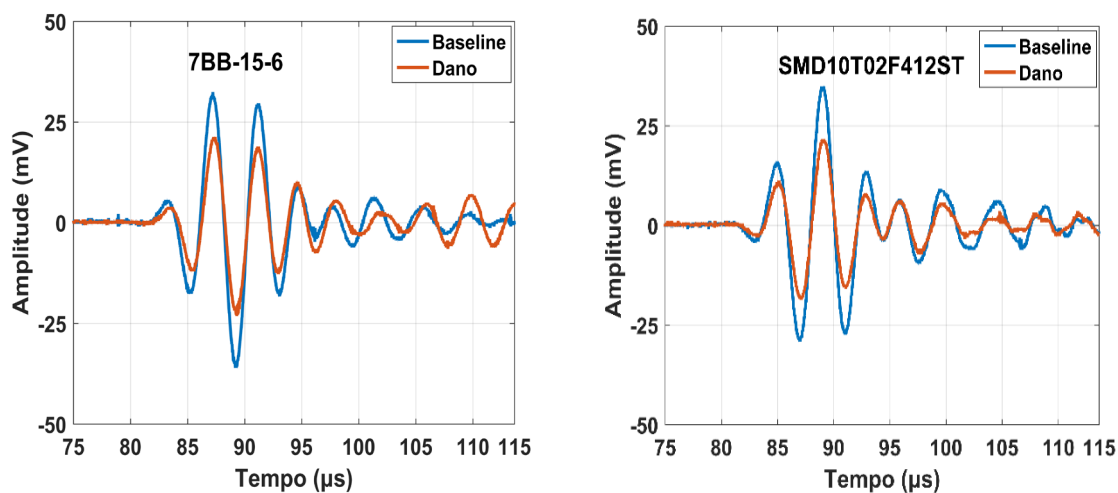
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dois transdutores proporcionam boa repetibilidade dos resultados, com ligeira vantagem para a cerâmica convencional. Dentre as 100 medidas realizadas com o diafragma, o valor médio foi de 37,39 mV e o desvio padrão foi de apenas 0,19 mV. Para a cerâmica convencional o valor médio foi de 37,16 mV e o desvio padrão foi de apenas 0,14 mV. Portanto, o diafragma piezolétrico fornece boa repetibilidade dos resultados com um desvio padrão próximo ao da cerâmica convencional.

3.4.4- Detecção de dano com diafragmas piezelétricos.

Inicialmente, um teste básico de detecção de danos foi realizado fazendo trincas nos caminhos de ondas entre os atuadores e sensores, conforme descrito na Seção 3.3. O diafragma 7BB-15-6 e a cerâmica SMD10T02F412ST foram escolhidos para comparação por serem semelhantes em tamanho considerando o elemento ativo do diafragma. A sensibilidade ao dano estrutural foi avaliada para várias frequências, excitando os atuadores com uma frequência variando de 50 kHz a 600 kHz, com passos de 50 kHz. Mostram-se na Figura 23 os sinais brutos recebidos pelos dois tipos de sensores quando os atuadores são excitados com uma frequência de 200 kHz.

Figura 23 – Variações nos sinais causadas por trincas inseridas nos caminhos entre os atuadores e sensores.

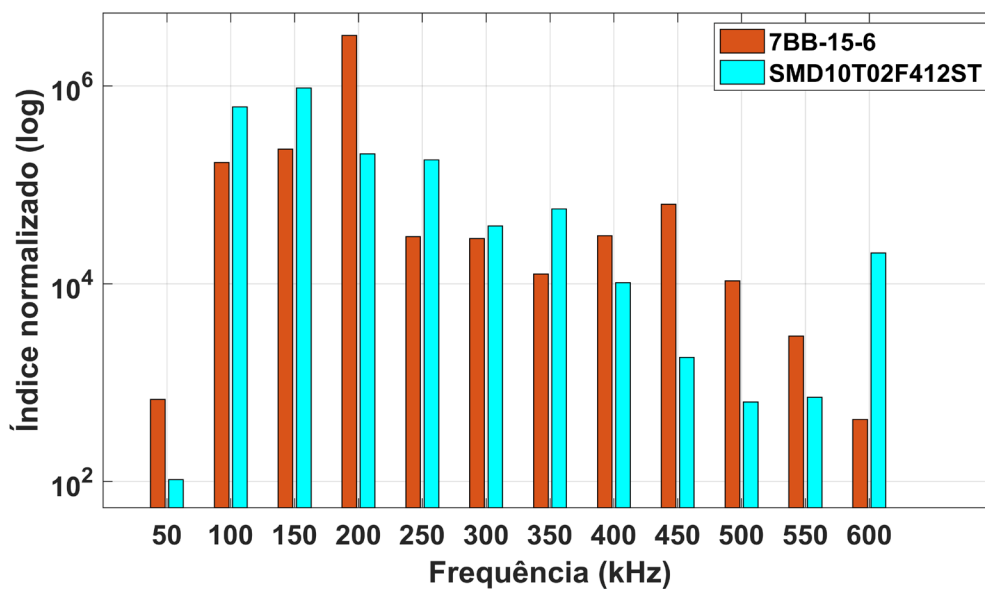


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Um curto intervalo de tempo contendo o pacote de ondas correspondente ao modo S_0 é exibido para que variações nos sinais devido a danos estruturais possam ser

observadas. Os sinais dos dois transdutores foram alterados devido às trincas, indicando que o diafragma piezelétrico pode detectar danos estruturais. Uma análise quantitativa é possível calculando o índice I_{ij} usando a Equação (10) para o primeiro pacote de onda correspondente ao modo S_0 . Mostram-se na Figura 24 os índices obtidos para todas as frequências. Os índices são normalizados em relação aos valores obtidos para a estrutura íntegra. Os resultados mostram que o diafragma piezelétrico é viável para a detecção de danos estruturais com base nas ondas de Lamb. A maior sensibilidade obtida foi para a frequência de 200 kHz, onde o índice normalizado foi de $3,2 \times 10^6$. A cerâmica convencional obteve a maior sensibilidade para a frequência de 150 kHz, onde o índice foi de $9,5 \times 10^5$.

Figura 24 – Índices de danos obtidos para o diafragma e cerâmica convencional.

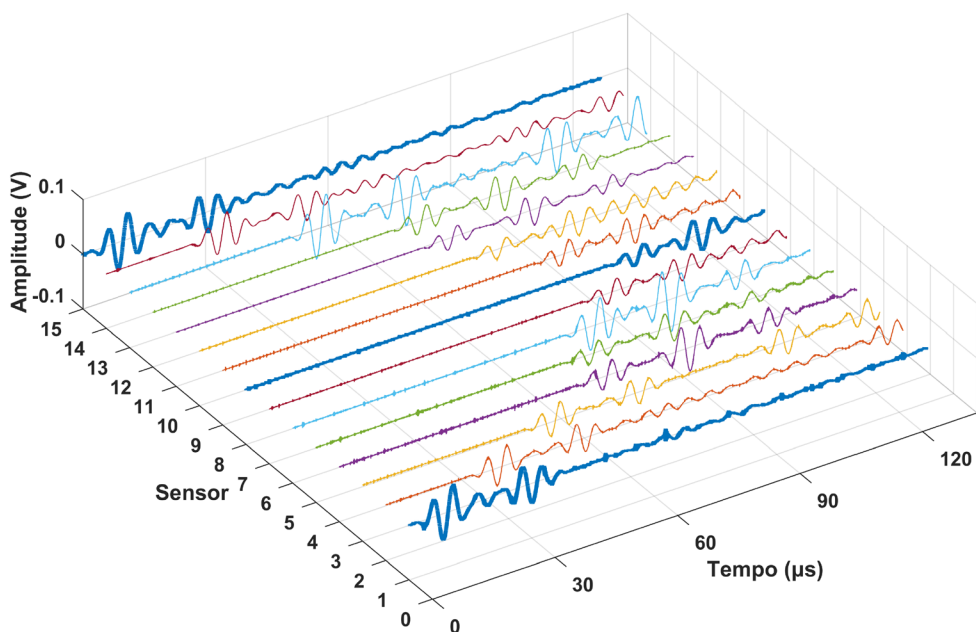


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Um teste mais completo incluindo a localização do dano foi realizado na placa com 16 diafragmas de 20 mm (7BB-20-6), conforme descrito na Seção 3.3. Antes de verificar a detecção de dano estrutural, os diafragmas foram avaliados quanto à capacidade de gerar

ondas de Lamb de forma omnidirecional, ou seja, em todas as direções. Portanto, o diafragma 1 com coordenada (0, 0) foi excitado com uma frequência de 210 kHz, que é a frequência que fornece a maior amplitude, conforme mostrado na Figura 17, e os sinais recebidos pelos outros 15 diafragmas foram amostrados. Os sinais são mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Sinais recebidos dos Diafragmas 2 a 16 quando o Diafragma 1 está transmitindo o sinal, mostrando a capacidade de transmissão omnidirecional.

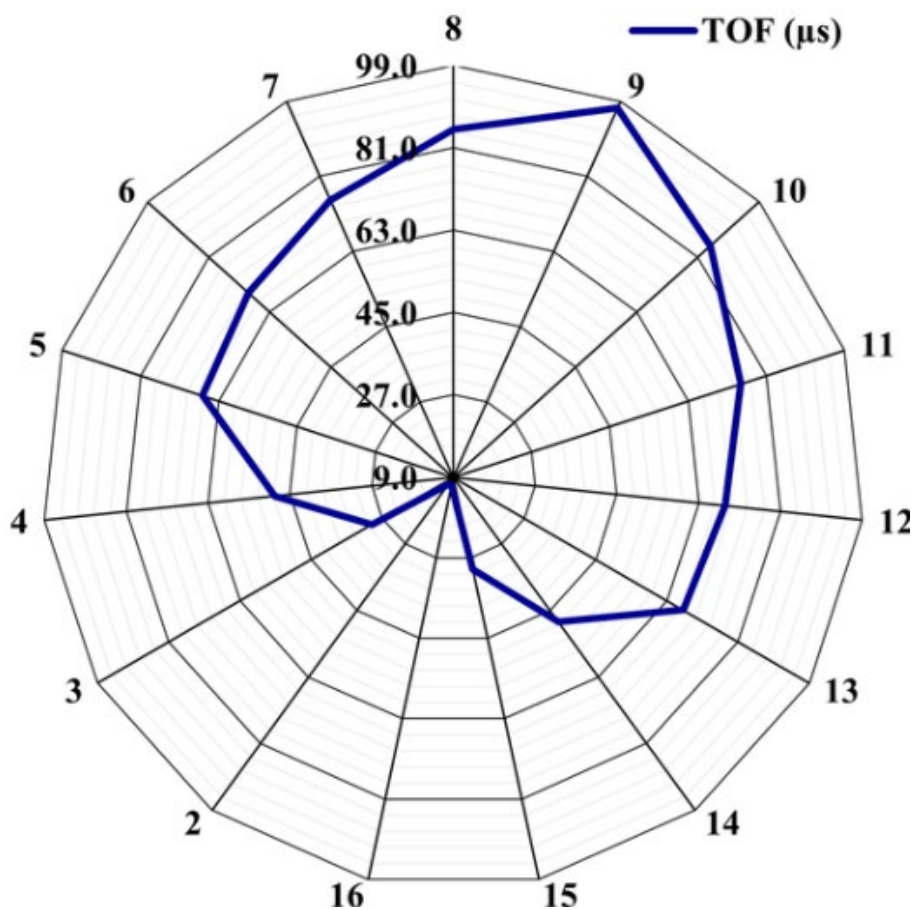


Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com os resultados da Figura 25, a transmissão omnidirecional do Diafragma 1 em relação aos demais diafragmas pode ser verificada, pois os 15 diafragmas detectaram a onda gerada. Uma análise mais detalhada pode ser obtida a partir do diagrama TOF (*time of flight*) em função dos sensores, conforme mostrado na Figura 26. De acordo com a Figura 26, os sensores equidistantes do atuador (diafragma 1) possuem valores TOF

semelhantes, resultando em um diagrama simétrico. Por exemplo, os sensores 2 e 16 que estão mais próximos do transmissor receberam as ondas primeiro (cerca de 11 μs), enquanto o sensor 9, que está na diagonal oposta na matriz do sensor, é o último a receber as ondas (cerca de 97 μs).

Figura 26 – Diagrama do *time of flight* (TOF) obtido para os diafragmas 2 a 16 quando o diafragma 1 está sendo excitado.



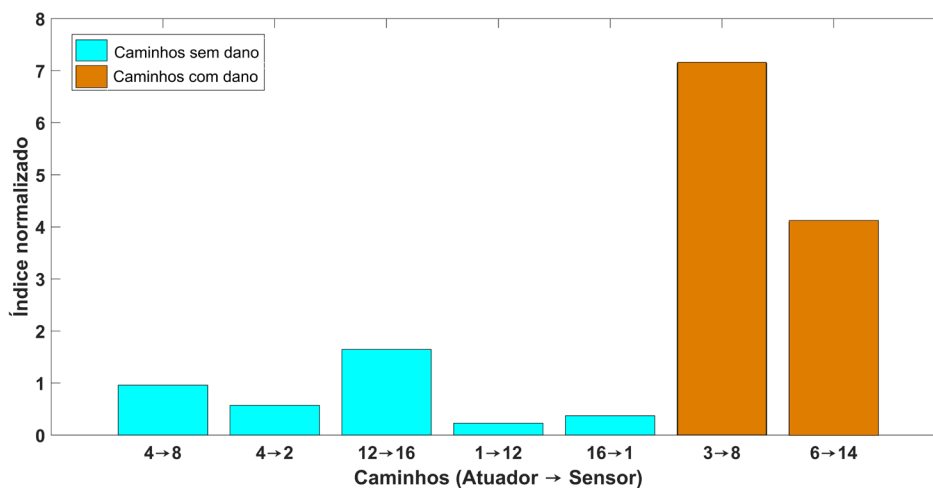
Fonte: Elaboração do próprio autor.

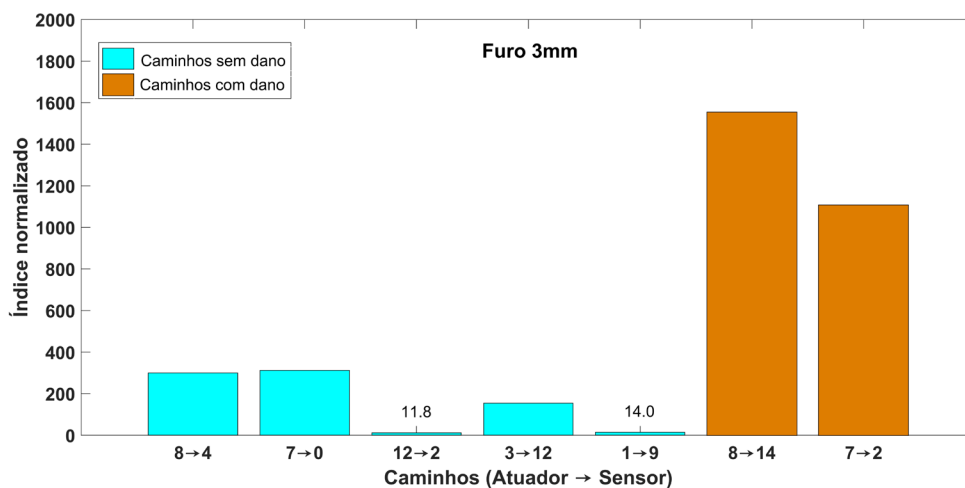
A transmissão omnidirecional é importante para detectar danos estruturais em qualquer parte da estrutura. Seguindo o procedimento descrito na seção anterior, dois furos

de diâmetros diferentes foram feitos na placa nas posições A e B para simular danos. Antes, as medições contendo informação da estrutura íntegra foram feitas e o algoritmo RAPID foi alimentado com as coordenadas dos transdutores mostrados na Tabela 2. É importante notar que a frequência de excitação de 210 kHz não fornece o comprimento de onda ideal para detectar pequenos danos, como orifícios de 1 mm e 3 mm de diâmetro. No entanto, também é sabido que a sensibilidade das ondas de Lamb aos danos não é uma função simples do comprimento de onda, envolvendo assim, outros fatores. A detecção de danos muito menores que o comprimento de onda tem sido amplamente relatada na literatura (LEE; STASZEWSKI, 2003). Neste estudo, a frequência de 210 kHz foi escolhida para permitir um alto valor de SNR, que é um fator importante para uma boa repetibilidade das medidas e detecção de pequenos danos. Para ilustrar a capacidade dos diafragmas piezelétricos de detectar pequenos danos, mostram-se na Figura 27 os índices de danos calculados usando a Equação (10) e o primeiro pacote de onda correspondente ao modo S_0 . Diferentes caminhos de ondas entre o atuador e o sensor foram considerados de acordo com suas disposições (1 a 16) na placa mostrada na Figura 16. Os índices foram normalizados em relação aos valores obtidos para a condição saudável. De acordo com a Figura 27, os índices obtidos para os caminhos atuador-sensor que se cruzam ou estão mais próximos dos furos de 1 mm e 3 mm são os que possuem maiores índices obtidos do que para os caminhos que não se cruzam ou estão mais distantes dos furos. Esses resultados indicam que os diafragmas piezelétricos podem detectar pequenos danos. A localização dos danos também é possível usando o algoritmo RAPID. Em seguida, os mapas de cores são obtidos usando o algoritmo RAPID usando a Equação (7) - (9). Mostram-se na Figura 28 os resultados para ambos os danos usando mapas de cores. Os valores são normalizados entre 0 e 1 e um limite em torno de 0,7 foi definido nos mapas de cores para destacar o local do dano, permitindo uma comparação visual com o dano real da estrutura (Figura 16).

De acordo com os resultados, os diafragmas piezelétricos em conjunto com o algoritmo RAPID são viáveis para detectar e localizar danos. O orifício de 1 mm foi localizado com coordenadas (144, 298), o que corresponde a uma distância de 6,3 mm de sua posição real na placa (150, 300). Para o furo de 3 mm, as coordenadas encontradas pelo algoritmo foram (301, 245), o que corresponde a uma distância de 5,1 mm de sua posição real na placa (300, 250). Essas coordenadas foram determinadas considerando a probabilidade máxima de dano indicada pelo algoritmo, que corresponde a $z = 1$ (100%) nos mapas de cores, conforme mostrado na Figura 28. Considerando as coordenadas das posições reais dos danos, o algoritmo indica 99,16% e 96,39% de probabilidades para os furos de 1 mm e 3 mm, respectivamente.

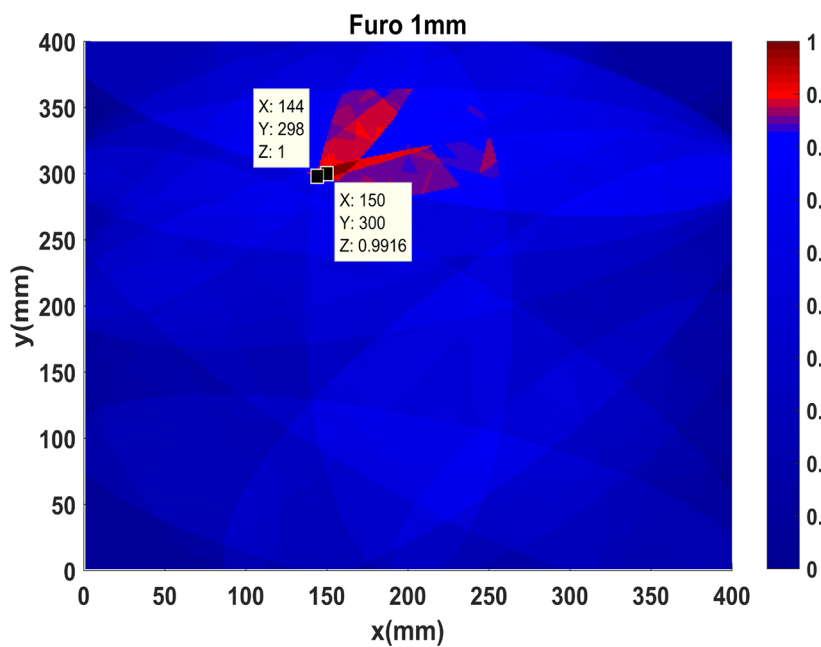
Figura 27 – Índices de danos obtidos para diferentes caminhos de onda atuador-sensor, cruzando e não cruzando os orifícios de 1 mm e 3 mm de diâmetro.

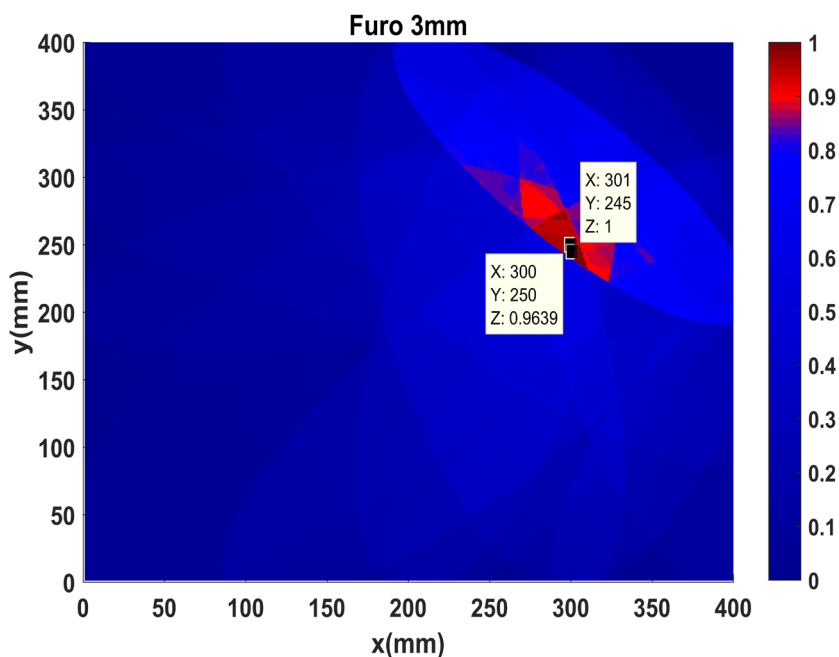




Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 28 – Mapas de localização de danos obtidos usando diafragmas piezelétricos; um limite em torno de 0,7 foi definido nos mapas de cores para destacar o local do dano, permitindo uma comparação visual com o dano real da estrutura.





Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.4.5- Custo-benefício.

De acordo com os resultados obtidos, os diafragmas piezelétricos apresentam algumas vantagens e desvantagens em relação às cerâmicas convencionais. Portanto, existe uma compensação na escolha e uso do transdutor apropriado de acordo com a aplicação desejada.

Os diafragmas piezelétricos são amplamente usados em vários dispositivos eletrônicos do dia-a-dia, onde a principal aplicação é normalmente a geração de som. Portanto, esses componentes são produzidos em série por diversos fabricantes a um custo muito baixo. Normalmente, dependendo do tamanho e do fabricante, o custo de um diafragma piezelétrico varia de cerca de US\$ 0,01 a US\$ 3,00 dólares. Por outro lado, o custo de uma cerâmica convencional varia de cerca de US\$ 0,50 a mais de US\$ 100,00 dólares. Além disso, como qualquer componente eletrônico básico produzido em massa, os diafragmas piezelétricos podem ser facilmente encontrados em tamanhos padrão em

diversos países sem a necessidade de importação direta, reduzindo custos com frete internacional, taxas alfandegárias e conversão de moeda. Essas características tornam os diafragmas piezelétricos vantajosos principalmente em pesquisas ou aplicações que requeiram um grande número de transdutores, como no monitoramento de grandes estruturas para a detecção e localização efetiva de danos.

Simulações utilizando FEM e resultados experimentais indicam que o disco de latão dos diafragmas tem pouca influência na geração e detecção de ondas de Lamb. Diafragmas e cerâmicas com dimensões semelhantes (considerando o elemento ativo do diafragma) fornecem resultados semelhantes em relação à amplitude da onda e sensibilidade a danos estruturais. No entanto, observa-se que o disco de latão aumenta ligeiramente o comprimento de onda, ou equivalentemente reduz a frequência de acoplamento máximo. Portanto, as curvas de sintonia das ondas de Lamb de um diafragma piezelétrico são ligeiramente deslocadas quando comparadas a uma cerâmica convencional com um tamanho semelhante ao elemento ativo do diafragma, como mostrado na Figura 17.

Em contraste com os diafragmas piezelétricos, as cerâmicas convencionais têm a vantagem de serem produzidas em diferentes espessuras. Normalmente, quanto maior a espessura, maior a amplitude do sinal elétrico gerado pelo transdutor. Conforme verificado neste estudo, a amplitude do sinal gerado por uma cerâmica mais espessa foi significativamente maior do que a amplitude alcançada pelos diafragmas. Outra vantagem dos transdutores mais espessos é a tensão máxima que pode ser aplicada. Embora os diafragmas piezelétricos possam ser submetidos a uma tensão máxima semelhante às cerâmicas convencionais da mesma espessura, cerâmicas mais espessas podem suportar tensões mais altas. Isso pode ser útil ao operar os transdutores como atuadores.

Outra característica importante é a repetibilidade dos resultados. Os resultados

experimentais indicam que os dois tipos de transdutores são semelhantes neste aspecto, com uma ligeira vantagem para as cerâmicas convencionais. No entanto, a análise realizada neste estudo é inicial com base em 100 medições. Uma análise mais detalhada e de longo prazo ainda é necessária. Por fim, além de não afetar significativamente a geração e recepção das ondas Lamb, o disco de latão dos diafragmas torna esses dispositivos mais resistentes à quebra e mais fáceis de instalar na estrutura.

3.5 – Conclusão

Este estudo avaliou por meio de simulações computacionais-FEM e testes experimentais a viabilidade de diafragmas piezelétricos comerciais de baixo custo para a geração e recepção de ondas de Lamb, bem como para detecção de danos estruturais. Os resultados foram comparados com os obtidos por duas cerâmicas convencionais que serviram de referência. Os resultados indicam conclusivamente que existe uma compensação na escolha entre os dois tipos de transdutores. Os diafragmas piezelétricos e as cerâmicas convencionais semelhantes em tamanho ao seu elemento ativo fornecem resultados semelhantes no que diz respeito à amplitude das ondas geradas, sensibilidade a danos estruturais, efeitos da variação de temperatura e repetibilidade dos resultados. Portanto, desde que corretamente escolhidos, os diafragmas podem ser utilizados como transdutores alternativos para inspeções baseadas em ondas de Lamb, com a vantagem de serem produzidos em série por diversos fabricantes e, portanto, prontamente disponíveis a baixo custo. Isso é importante para expandir a pesquisa sobre ondas Lamb e reduzir os custos de instalação em sistemas SHM. Portanto, os resultados apresentados neste estudo de viabilidade podem ser uma referência para estender o uso de diafragmas piezelétricos comerciais, que são componentes sonoros originalmente utilizados para geração de som

eletrônico, em aplicações SHM baseadas em ondas de Lamb. No entanto, é importante destacar que este estudo é preliminar, onde foram realizadas simulações e ensaios experimentais em estruturas simples de alumínio. Testes adicionais precisam ser realizados em estudos futuros para avaliar a viabilidade de diafragmas piezelétricos para aplicações baseadas em ondas de Lamb em estruturas complexas e de outros materiais, como materiais compósitos, onde a relação sinal-ruído tende a ser baixa, bem como a repetibilidade de resultados de longo prazo e o desenvolvimento de um modelo analítico.

Capítulo 4

Análise comparativa das técnicas E/M e ondas de Lamb em alta frequência

Neste capítulo apresenta-se um estudo comparativo entre as técnicas E/M e das ondas de Lamb em um ambiente ruidoso, onde diferentes níveis de ruídos, diferentes níveis do sinal de excitação foram estudados afim de avaliar o comportamento de cada técnica e a melhor faixa de operação de cada uma.

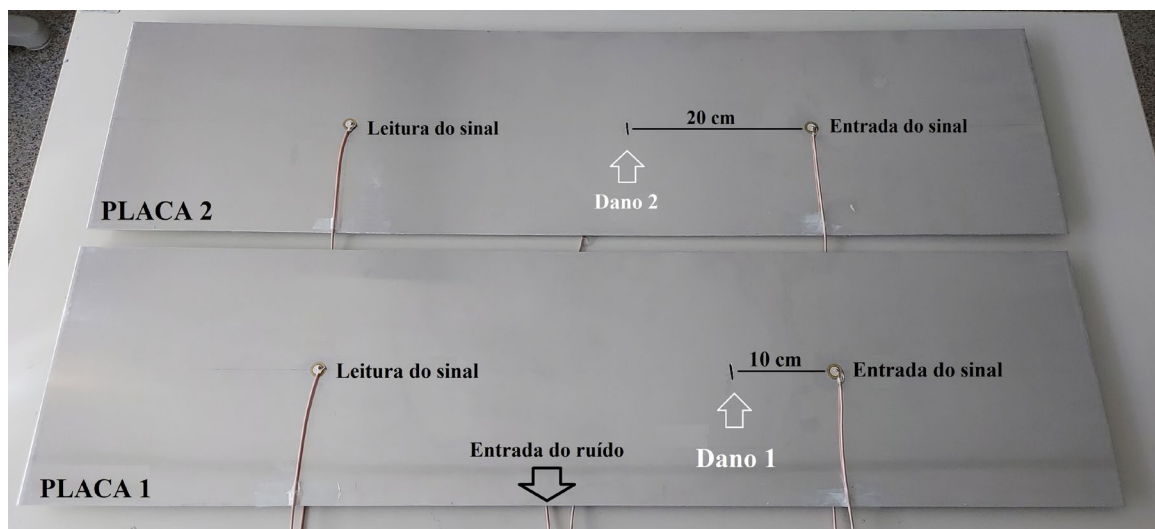
4.1 – Procedimento experimental

Para os testes experimentais, foram preparadas 2 placas de alumínio similares com o objetivo de comparar o desempenho das técnicas das ondas de Lamb e E/M em detectar danos com sinais de excitação em alta frequência sob efeitos de ruído para o correto diagnóstico da integridade estrutural. O foco do teste foi relacionar a sensibilidade em detectar danos e localizá-los, bem como relacionar com a potência do sinal e o limiar de detecção sob efeitos de ruído. Para isso, duas placas de alumínio de dimensões 1000 mm x 250 mm x 2 mm foram usadas onde em cada foram fixados um par de diafragma piezelétrico sobre o eixo central longitudinal afastados 250 mm da borda e separados 500 mm entre si, as distâncias são a partir do centro de cada transdutor. Essas distâncias foram escolhidas para garantir uma boa separação entre o modo S_0 e A_0 .

O diafragma piezelétrico utilizado foi o da Murata modelo 7BB-15-6, pois como apresentado em (CAMPEIRO *et al.*, 2021) é adequado para geração e recepção das ondas de Lamb e por ser amplamente utilizado na técnica da impedância eletromecânica (CHENHUI *et al.*, 2019; NEGI *et al.*, 2018; FREITAS; BAPTISTA, 2016). Os mesmos

foram fixados utilizando cola a base de cianoacrilato, e tomou-se cuidado para que o adesivo fosse fino e uniforme. Para simular danos estruturais, fissuras de 2 tamanhos foram feitos, uma com 7.5 mm x 2 mm e outra com 15 mm x 2 mm, respectivamente, denominadas como Dano 1 e Dano 2, distando 10 cm na Estrutura A e 20 cm na Estrutura B a partir do transdutor que excita a estrutura. Devido à fissura feita, para testar uma nova distância de detecção, foi necessário utilizar outra placa para que o Dano 1 não interferisse nos caminhos de onda do Dano 2, assim, possibilitando uma análise com dano mais distante. Na Figura 29 são ilustradas todas as distâncias e posições de fixação dos diafragmas.

Figura 29 – Configuração utilizada para comparar o desempenho das técnicas das ondas de Lamb e E/M em detectar danos com sinais de excitação em alta frequência sob efeitos de ruído



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para o sinal de excitação, no teste para as ondas de Lamb, um sinal *tone burst* de 3 ciclos modulado por janela Hanning, excitando a estrutura de 500 kHz a 950 kHz com passos de 50 kHz foi utilizado. Foram escolhidas essas frequências pois as velocidades de propagação são aproximadamente constantes para o modo S_0 , o modo escolhido para

detectar danos neste trabalho, pois, como apresentado em (ZHANG *et al.*, 2020) apresenta sensibilidade nessa região de frequência. Para o sistema E/M, foi utilizado o sistema proposto por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009) onde um sinal *chirp* variando de 500 kHz a 1000 kHz foi escolhido para excitar a estrutura. Para ambos sistemas, os sinais de excitação foram de 5 Vpp a 30 Vpp com passos de 5 Vpp.

Para gerar o sinal, um gerador de onda NI PXIe-5413 com 16 bits de conversor digital-analógico e um amplificador baseado no chip ADA4870 foi utilizado devido às limitações de corrente do gerador de ondas. Os sinais foram amostrados com uma taxa de 60 MHz utilizando um osciloscópio NI PXIe-5105. Esses dispositivos estão montados em um sistema PXI e conectados a um computador via barramento PXIe-PCIe. Como ruído, foi utilizado um ruído branco uniforme que foi inserido à estrutura através de um diafragma fixado ao centro da estrutura na parte inferior com amplitudes variando de 0.1 Vpp a 1 Vpp com passos de 0.1 Vpp, 2 Vpp, 5 Vpp e 10 Vpp, respectivamente. Um *buffer* baseado no CI LM675 foi utilizado para garantir os níveis de corrente ao diafragma.

Uma análise quantitativa foi feita tomando-se uso de índices de danos RMSD e CCDM, bem como o uso da relação sinal-ruído para averiguar o efeito do nível do ruído junto aos níveis do sinal de excitação e o uso da densidade espectral de potência (PSD) para analisar a potência de cada sinal quanto ao limiar de detecção de dano estrutural.

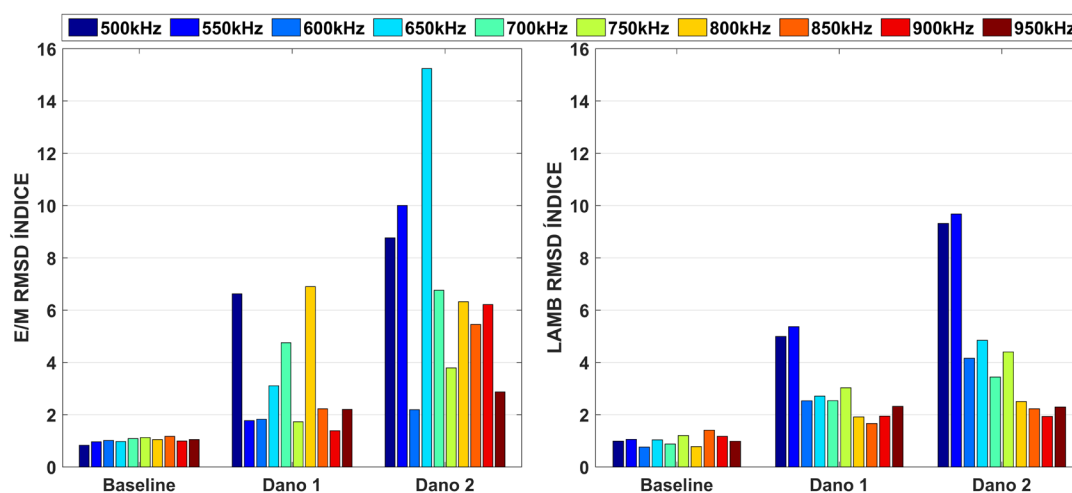
Para todos os testes, os transdutores foram conectados com cabos coaxiais do mesmo comprimento, e todas as medidas foram realizadas em temperatura controlada de 25 °C, tendo em média três medidas. Medidas com a estrutura íntegra e sem ruído foram tomadas e usadas como *baseline*. As placas foram apoiadas sobre blocos de borracha para minimizar os efeitos do ambiente. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos na próxima seção.

4.2 – Resultados

4.2.1 Sensibilidade em detectar e quantificar o dano

Embora, conhecer os efeitos do ruído em um sistema com sinais de excitação em alta frequência é de suma importância, primeiramente, é necessário verificar a eficácia das técnicas em detectar e quantificar os danos estruturais nessas faixas de frequência. Para essa etapa, as frequências de excitação apresentadas na seção anterior foram utilizadas, em condições de ambiente ideal, com ausência de ruído e temperatura controlada. Nesta seção é utilizado o dano a 10 cm do transdutor atuador. Para todas as frequências de excitação utilizadas tendo a técnica E/M com amplitude de excitação de 1 Vpp e ondas de Lamb com excitação de 30 Vpp, os valores do índice RMSD são apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Valores do índice RMSD para diferentes frequências de excitação, para a estrutura em condições íntegra e sem ruído.

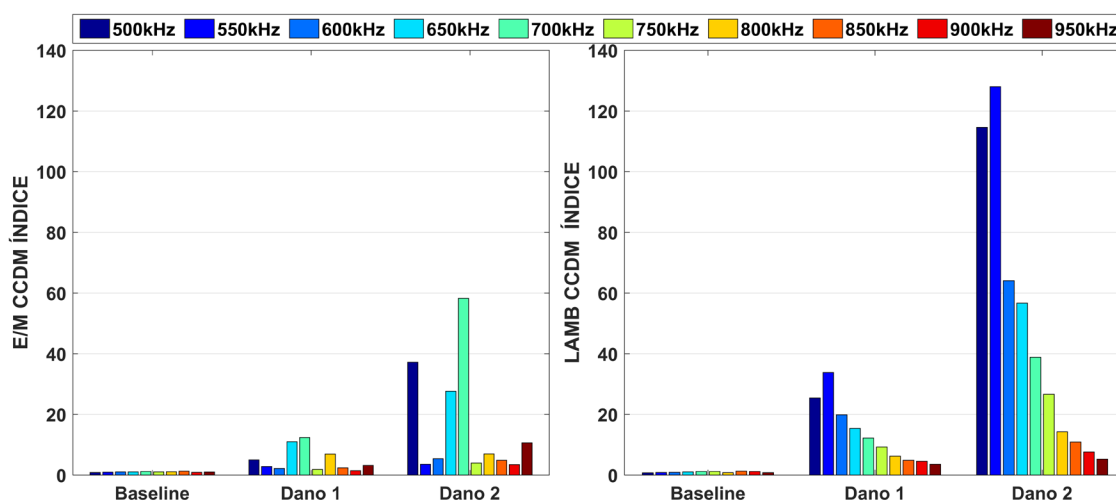


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como se pode observar na Figura 30, tanto para a técnica E/M quanto para as ondas de Lamb, foi observada a detecção de dano estrutural e a diferenciação de seus respectivos tamanhos na maioria das frequências selecionadas. Utilizando a técnica E/M, a única

frequência que não quantificou o dano foi a de 800 kHz para o RMSD utilizando a técnica E/M. Na Figura 31 são apresentados os valores do índice CCDM para a técnica E/M e para as ondas de Lamb.

Figura 31 – Valores do índice CCDM para diferentes frequências de excitação, para a estrutura em uma condição íntegra e sem ruído.



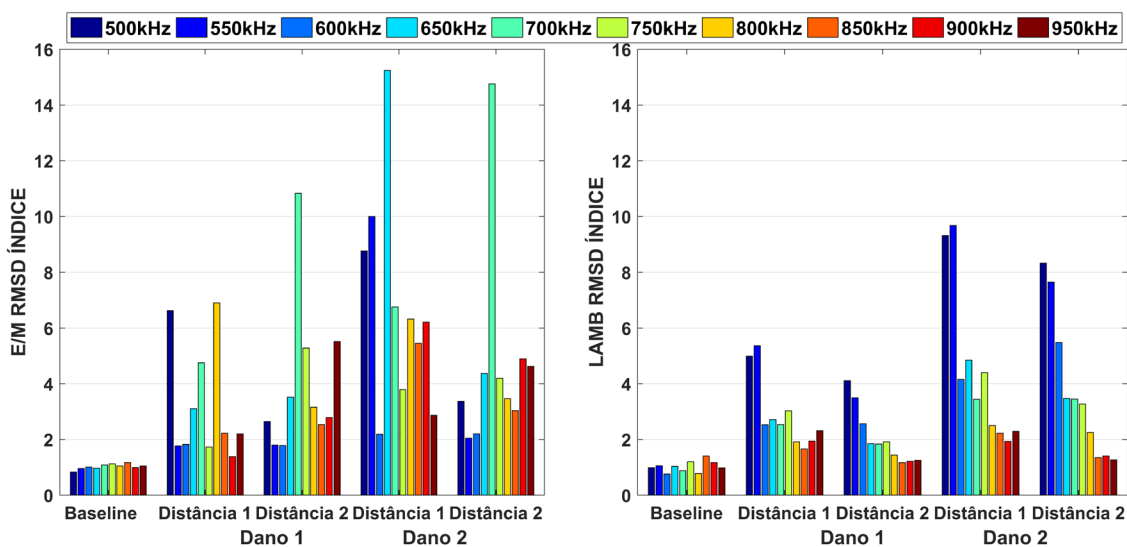
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como o RMSD para ambas as técnicas, o índice CCDM foi eficaz em detectar e quantificar o dano estrutural em todas as faixas de frequência, dos quais, o mesmo apresentou valores maiores quando utilizado a técnica das ondas de Lamb, apresentando assim, maior sensibilidade. Diferentemente do caso utilizando as ondas de Lamb, a E/M foi mais sensível em detectar e quantificar danos para a frequência de 700 kHz. Embora uma técnica seja mais eficiente que a outra em uma determinada frequência, ambas se mostraram eficientes em detectar e quantificar danos estruturais em alta frequência. Na próxima seção é analisada a sensibilidade em quantificar a distância ao dano estrutural.

4.2.2 Distância do dano

Após verificar a eficiência em detectar danos estruturais, nesta seção, é analisada a sensibilidade quanto a distância do dano ao transdutor que excita a estrutura. Para essa análise, são utilizadas as mesmas frequências e amplitudes de excitação apresentadas para as técnicas da Seção 3, porém, agora, com dano estrutural a 10 cm e 20 cm de distância. Apresenta-se na Figura 32 os valores obtidos para o índice RMSD para a técnica E/M e ondas de Lamb.

Figura 32 – Valores do índice RMSD usando as técnicas de ondas E/M e ondas de Lamb com danos em diferentes distâncias.

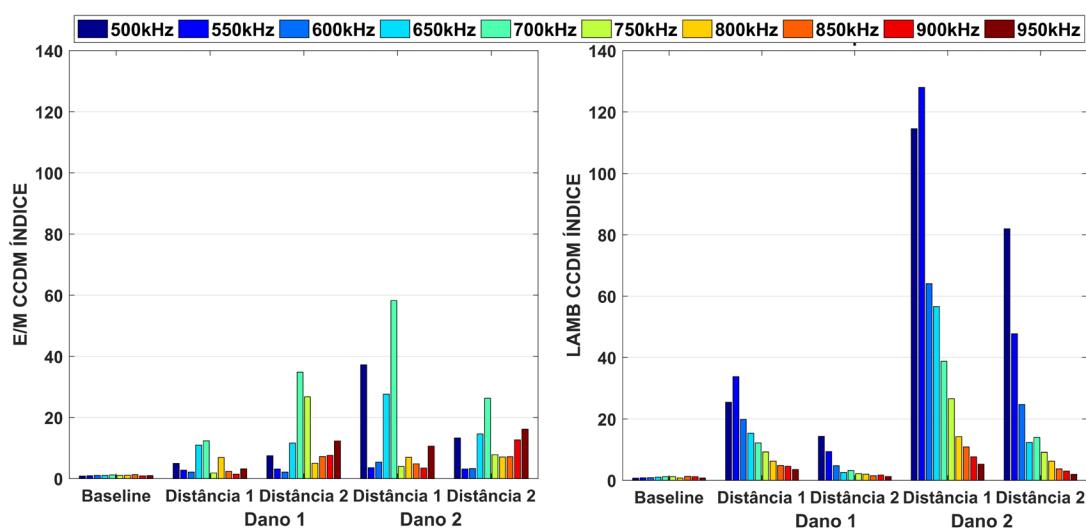


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como observado na Figura 32, embora a técnica E/M seja capaz de detectar dano estrutural, ela não se mostrou sensível para todas as frequências de excitação utilizada em separar o dano pela distância. Conforme apresentado, para o Dano 1, a sensibilidade ocorreu para as frequências de 500 kHz, 600 kHz e 800 kHz para E/M. Já para a ondas de Lamb, exceto a frequência de 600 kHz, não foi sensível em separar o dano pela distância.

A análise para ensaio experimental com o Dano 2, o maior dano, as melhores frequências foram de 500 kHz, 550 kHz, 650 kHz, 800 kHz, 850 kHz e 900 kHz para a técnica E/M e, para as ondas de Lamb, as frequências que não foram eficientes na proposta dessa análise foram as de 600 kHz e 700 kHz. Apresentam-se na Figura 33 os valores obtidos para o índice CCDM para a técnica E/M e ondas de Lamb.

Figura 33 – Valores do índice CCDM utilizando a técnica E/M e ondas de Lamb com dano em distâncias diferentes.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

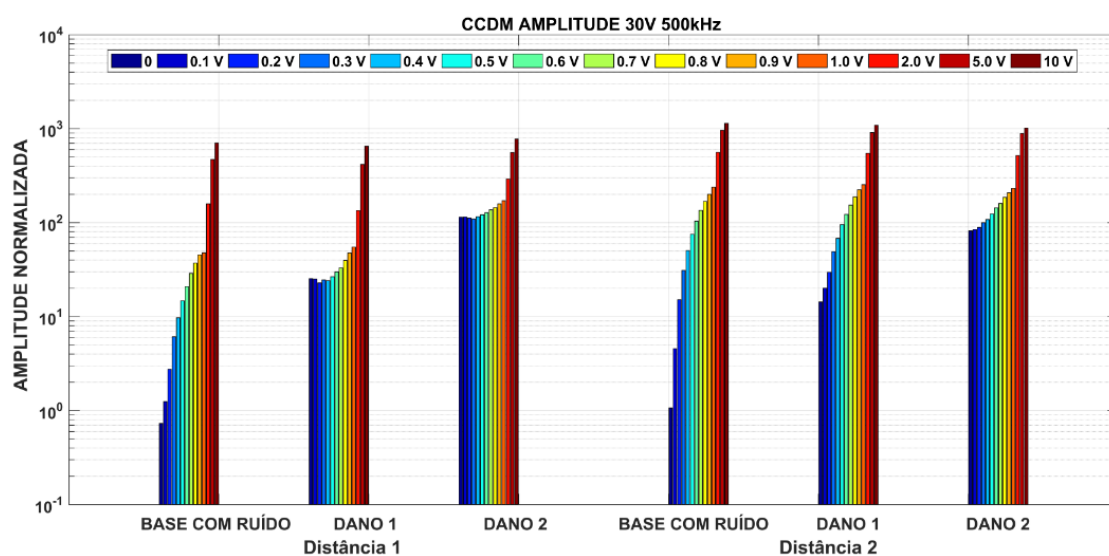
De acordo com os dados da Figura 33 para o Dano 1, a única frequência sensível para E/M foi a de 800 kHz. Para o Dano 2, as frequências acima de 700 kHz não foram eficazes em separar a distância entre os danos. Já o melhor caso, as ondas de Lamb, além de detectar e quantificar, separou a distância entre os danos em todas as frequências escolhidas. Sendo assim, essa técnica se mostrou superior em quantificar, detectar e localizar danos utilizando o índice CCDM. Embora a técnica E/M corresponder melhor para os danos maiores, o que já é esperado, o foco deve ser dado em danos incipientes, que é o verdadeiro foco de um sistema SHM, e para casos com danos menores que o Dano 1, o

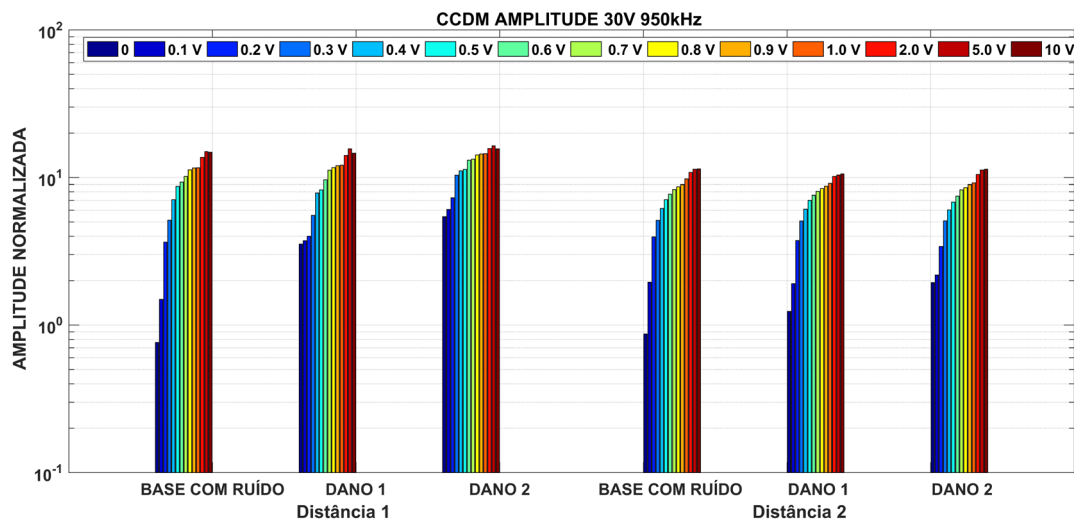
sistema poderá ser capaz de detectar a existência de um dano, mas não em apresentar sua localização aproximada. Após ser demonstrado que ambas as técnicas são capazes de detectar danos estruturais nessas frequências utilizando diafragmas piezelétricos, na próxima seção são analisados os efeitos do ruído no processo de detecção do dano estrutural, o que na realidade, representa os ambientes onde estão inseridos os sistemas SHM.

4.2.3 Efeitos do ruído

Entender como amenizar os efeitos do ambiente nos sistemas SHM é fundamental para se evitar um falso negativo, que é o pior caso nesses sistemas. Nessa primeira parte, são analisadas as diversas amplitudes do ruído em duas frequências seleccionadas, a de 500 kHz e 950 kHz, para ambos tamanhos de dano estrutural, no qual, os seus efeitos se estendem para todas as faixas de frequência utilizada nesse trabalho. Apresentados na Figura 34 os valores do índice CCDM para a técnica das Ondas de Lamb.

Figura 34 – Valores do índice CCDM utilizando a técnica das Ondas de Lamb com excitação em 500 kHz e 950 kHz.

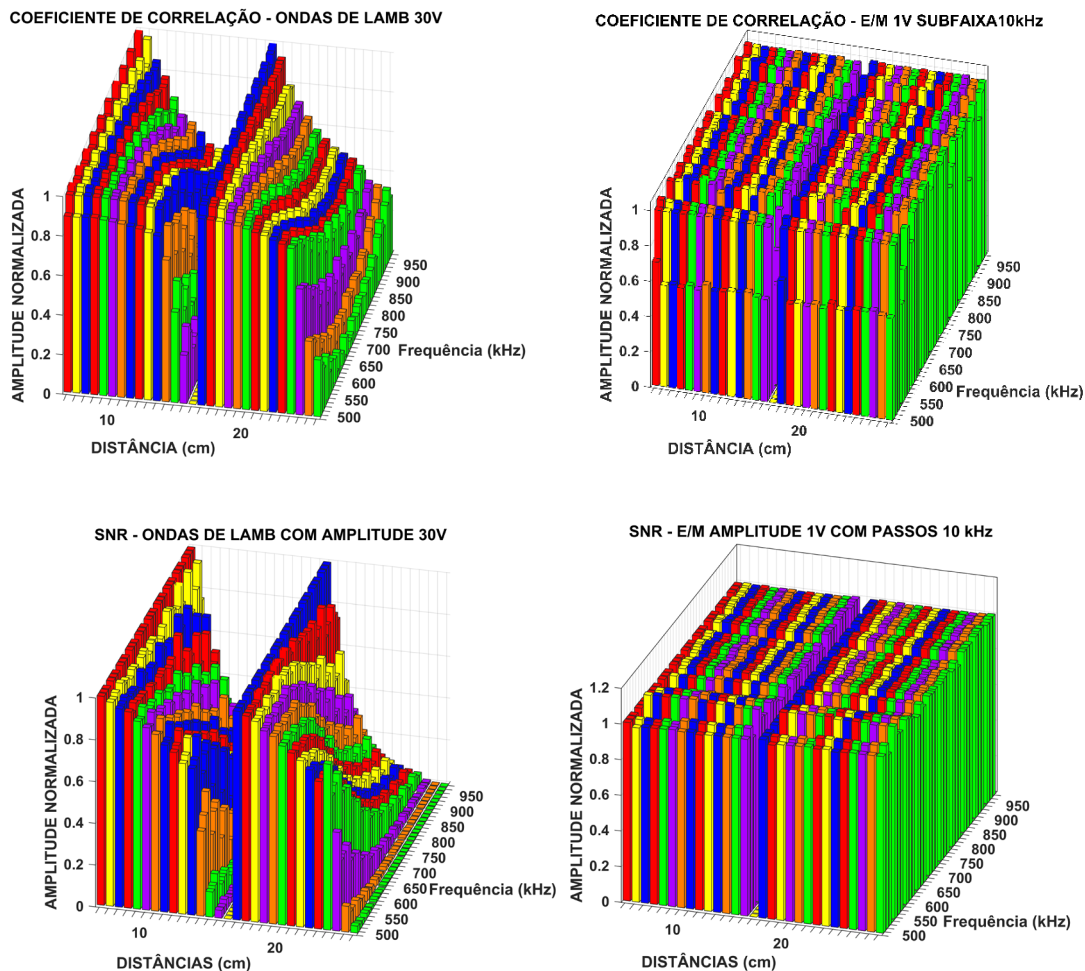




Fonte: Elaboração do próprio autor.

Embora as frequências apresentadas sejam distantes entre si, o mesmo comportamento foi observado nas demais faixas de frequência e também para o índice RMSD. Assim, como apresentado na Figura 34, tanto para 500 kHz quanto para 950 kHz a *baseline* teve seus valores alterados na presença de ruído e seus valores aumentaram conforme a intensidade do ruído cresceu, podendo indicar uma falsa presença de dano estrutural, um falso positivo. Para o cálculo do índice de dano foi utilizada a *baseline* com o respectivo ruído, o que se mostrou eficiente para compensar os efeitos do ruído de baixa amplitude, até 0,7 V em 500 kHz, porém, ineficiente para o caso de 950 kHz, devido à baixa SNR do sinal nessa faixa de frequência. Para o índice RMSD para a frequência de 500 kHz usando a *baseline* com respectivo ruído se mostrou eficiente até 1 V de ruído para o Dano1 e 0,2V para o Dano 2. Para 950 kHz foi possível detectar dano estrutural para baixa amplitude de ruído, porém, não foi sensível em distinguir entre as distâncias. Para ilustrar o efeito do ruído em todas as frequências utilizadas e como ele interfere nos sinais, na Figura 35 são apresentados o coeficiente de correlação e a relação sinal ruído para as técnicas E/M e ondas de Lamb.

Figura 35 – Coeficiente de correlação e SNR para a técnica E/M e das Ondas de Lamb.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

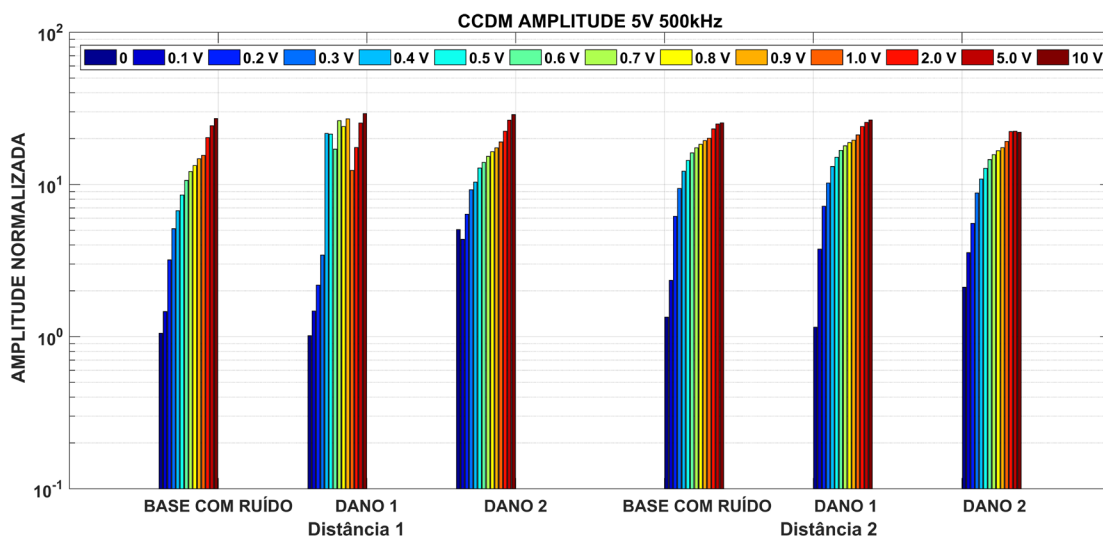
Embora não seja possível apresentar todos os dados para todas as frequências de modo apresentado na Figura 34, uma análise do coeficiente de correlação e da relação sinal-ruído apresentam de forma simples e compacta o que ocorre para todas as frequências e todos os casos estudados. Conforme apresentado na Figura 35, para as ondas de Lamb, o ruído agiu de forma impactante nos resultados, como pode ser observado, a correlação foi de 1 para um valor menor que 0.1, indicado quase nenhuma relação com o sinal de excitação do sistema. Lembrando que cada fileira colorida representa um nível de ruído. Já na análise da SNR, seus valores foram de 1 para praticamente 0 quando a amplitude do

ruído aumenta para 10 V, indicando sobreposição total do ruído sobre o sinal original, situação de extrema delicadeza para as ondas de Lamb. O que já era esperado, pois conforme um dos axiomas em sistemas SHM, quanto mais sensível um sistema para detectar dano estrutural, mais sensível ele será às intempéries do meio (WORDEN *et al.*, 2007). Analisando-se a técnica E/M, ela se mostrou mais robusta e menos sensível às variações do ruído e do aumento de frequência, o que interfere na sua sensibilidade, o que não impediu em detectar danos em algumas frequências, se mostrando uma técnica interessante para ambiente altamente ruidoso. Na próxima seção são analisados os efeitos da variação de amplitude do sinal de excitação, seu impacto para detectar danos e vantagens para atenuar os efeitos do ruído.

4.2.4 Potência do sinal de excitação

Após terem sido analisados os efeitos e impactos do ruído, nesta seção são apresentados os resultados utilizando-se outras amplitudes do sinal de excitação para ambas as técnicas com objetivo de aumentar a SNR do sinal e relacionar o consumo de energia com a sensibilidade, já que sistemas com alta potência são mais caros de serem construídos. Como apresentado na Seção 4.2, as amplitudes são incrementadas com passos de 5 Vpp, iniciando de 5 Vpp até 30 Vpp para ambas as técnicas. Na Figura 36 são apresentados os valores para CCDM utilizando a onda de Lamb para excitação de 5 V.

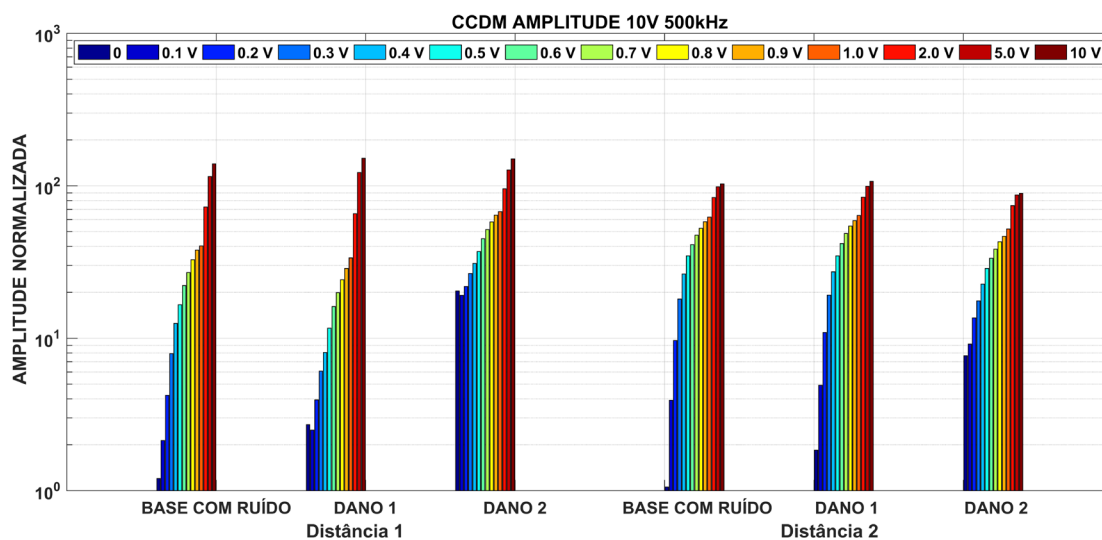
Figura 36 – Valores do índice CCDM utilizando a técnica das Ondas de Lamb com excitação em 500 kHz e 5 V de amplitude de excitação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode observado na Figura 36, mesmo sem ruído, utilizando as ondas de Lamb, o sistema não conseguiu detectar o Dano 1, pois o valor da baseline foi superior ao valor do índice para o Dano 1, sendo pois, somente um ruído de 0.1 V suficiente para ocasionar um falso positivo no sistema, o que não é vantajoso aos sistemas SHM. Conforme apresentado, mesmo utilizando a baseline do respectivo ruído, o sistema não foi eficiente de forma geral, sendo assim, não recomendado a utilização dessa amplitude. Na Figura 37 é apresentado o mesmo caso, porém, com excitação de 10 V.

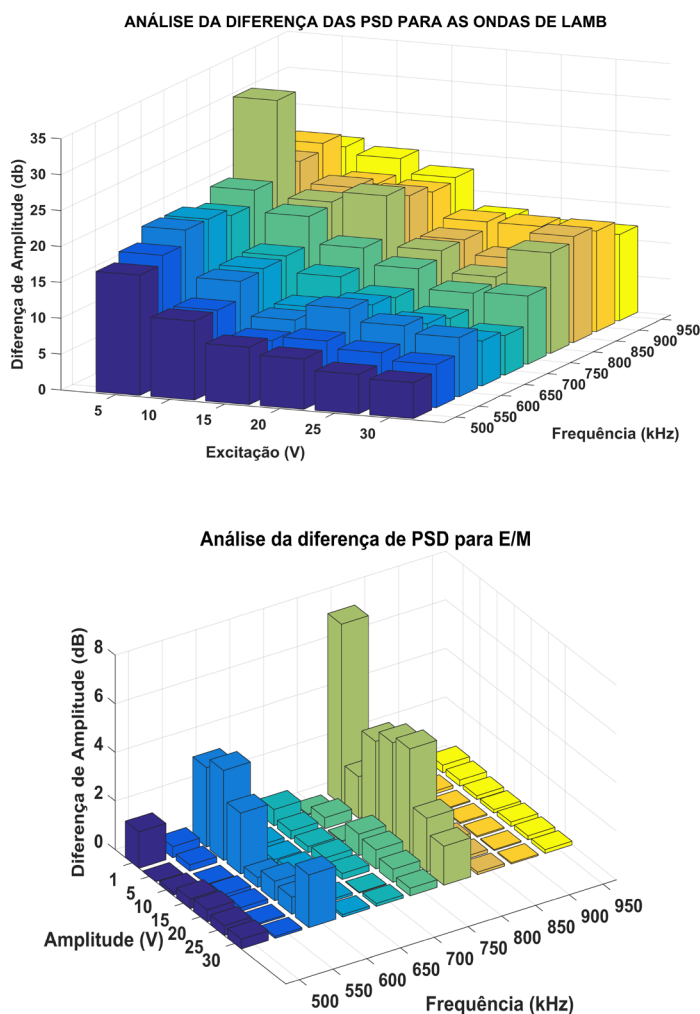
Figura 37 – Valores do índice CCDM utilizando a técnica das Ondas de Lamb com excitação em 500 kHz e 10 V de amplitude de excitação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme mostrado na Figura 37, com amplitude de 10 V, já foi possível detectar e separar a distância dos danos em um ambiente com até 0,2 V de ruído. O que já se torna vantajoso, pois, se conhecendo o ambiente em que está inserido o sistema SHM, o custo operacional será menor quanto menor for o ruído que se pode encontrar naquele ambiente. Para ilustrar de forma geral, na Figura 38 são apresentados os valores das diferenças das PSD comparadas com o caso ideal para o ruído de 10 V e para cada técnica utilizada.

Figura 38 – Valores da diferença das PSD para E/M e para as ondas de Lamb.

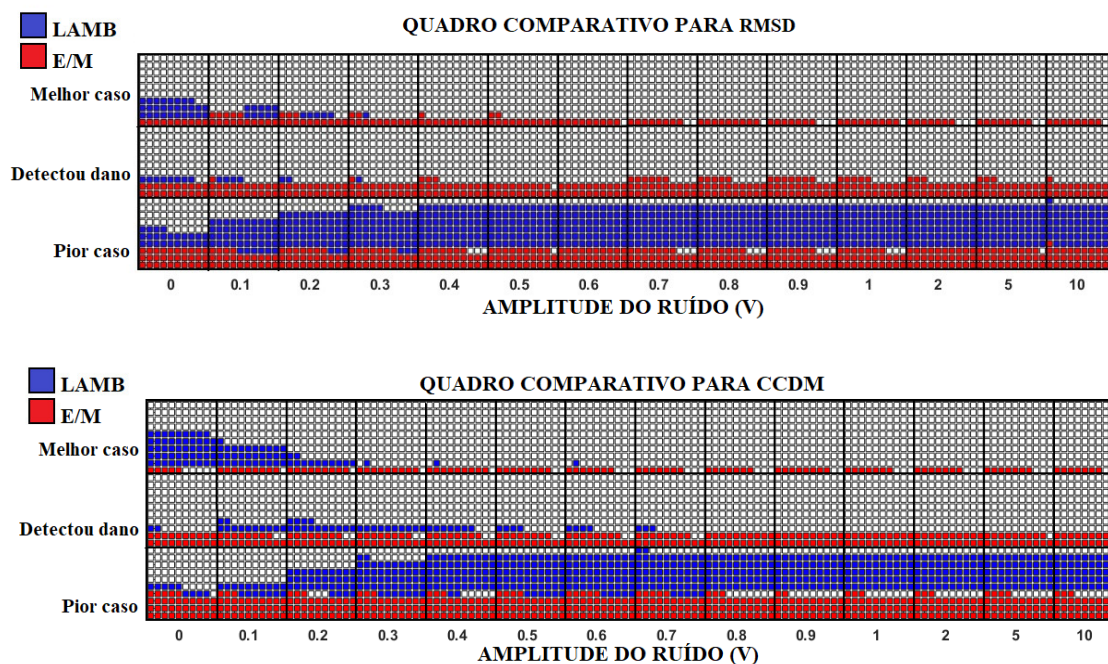


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme apresentado, quanto maior a amplitude de excitação das ondas de Lamb, menor a diferença das PSD. Portanto, pode-se concluir que menor será o efeito do ruído sobre o sinal lido. Para o caso da E/M, os valores ficaram próximos, confirmando assim a robustez da técnica aos efeitos do ruído. Para ilustrar de forma ampla, na Figura 39 é apresentado um quadro com a situação de detecção de cada técnica para cada nível de ruído. Sendo o melhor caso definido quando o dano é detectado, quantificado e localizado.

Formando assim, a primeira linha do quadro, seguido de detectado, quando o sistema é somente capaz de detectar um dano e terminando com o pior caso, onde nada é detectado.

Figura 39 – Quadro comparativo de detecção para todas as frequências com todos os ruídos para ambas as técnicas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode-se observar, a técnica das ondas de Lamb se destacou em ambos os índices para um nível de ruído até 0,2 V, sendo o índice CCDM o que apresentou melhor sensibilidade. Porém, embora seja mais sensível, o método E/M se sobressaiu em detectar dano estrutural em todos os níveis de ruído estudado neste trabalho. Embora o método E/M se mostrou robusto aos níveis de ruído estudado, as ondas de Lamb proporcionam mais facilidade, pois, além de detectar, ela quantifica e localiza o dano de forma mais rápida, reduzindo, assim, o tempo de parada e manutenção da estrutura por se saber a localização do dano estrutural.

4.3 – Conclusão

Neste capítulo foi apresentada uma comparação da eficácia das técnicas de E/M e ondas de Lamb em ambientes ruidosos, com foco na excitação de transdutores piezelétricos com sinais de alta frequência. Vários experimentos foram realizados em placas de alumínio para avaliar as duas técnicas de detecção, quantificação e localização de danos estruturais, tanto em condições ideais quanto em ambientes ruidosos.

Os resultados mostram que ambas as técnicas são significativamente afetadas pelo ruído, mesmo considerando o menor nível de ruído neste estudo, que é 0,1 V. No entanto, o método E/M se mostrou mais robusto e eficaz na detecção de danos em condições de ruído intenso. Por outro lado, o método da onda de Lamb é mais eficaz na quantificação e localização dos danos, o que é desejado em sistemas SHM para obter um diagnóstico completo da estrutura monitorada. Os resultados também mostram que os efeitos do ruído podem ser mitigados usando um índice de dano apropriado, bem como aumentando a amplitude do sinal de excitação, o que leva a um aumento no SNR.

Portanto, há uma compensação entre a eficácia na localização e quantificação dos danos estruturais e a robustez na detecção de danos em ambientes ruidosos. Os resultados apresentados neste trabalho podem orientar os pesquisadores na escolha da técnica de detecção de danos adequada, bem como sua combinação de acordo com as condições ambientais do sistema SHM.

Capítulo 5

Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Nesta tese foram apresentados resultados que são uma contribuição aos sistemas SHM. Os resultados foram obtidos tomando-se uso da técnica da impedância eletromecânica e das ondas de Lamb. Primeiramente, um estudo de viabilidade foi realizado a fim de se certificar que os diafragmas piezelétricos, comumente utilizados no método da impedância, eram eficazes em gerar e detectar as ondas de Lamb. Após essa confirmação, prosseguiu-se com o estudo comparativo dos efeitos do ruído sobre as técnicas da impedância eletromecânica e das ondas de Lamb utilizando-se sinais de excitação de alta frequência.

Para a primeira etapa, uma cerâmica piezelétrica amplamente reportada na literatura foi escolhida para servir de objeto de comparação, que juntamente com os diafragmas piezelétricos deu início a aquisição dos dados envolvendo um estudo a seguir: Resposta para cada modo de vibração (S_0 e A_0) em diferentes frequências, conhecidos como curvas de sintonia, efeitos da temperatura, precisão e da capacidade de detectar dano. Os resultados experimentais indicam que os diafragmas piezelétricos podem gerar e receber ondas de Lamb com eficiência, possuindo comportamento muito similar quanto as curvas de sintonia, as curvas de temperatura e do processo de precisão, com um desvio padrão muito próximo à cerâmica piezelétrica de referência, além de se apresentar como uma solução economicamente viável e de fácil aquisição em diversos países, reduzindo-se assim, o custo de implementação do projeto.

Para a segunda análise, estudou-se a capacidade da técnica da impedância eletromecânica e das ondas de Lamb em detectar, quantificar e localizar dano estrutural tomando-se sinais de excitação entre 500 kHz e 950 kHz. A princípio, foi escolhida uma

condição ideal, sem ruído, para essa análise. Os resultados experimentais demonstraram que ambas as técnicas foram eficientes em detectar, quantificar e localizar o dano estrutural simulado. Embora eficientes, a sensibilidade dependeu do índice de dano escolhido para a análise, que nessa tese foram os índices RMSD e CCDM, onde algumas frequências se mostraram melhores que outras em classificar o dano inserido.

Após verificar a efetividade em classificar o dano com sinais de excitação em alta frequência, uma análise envolvendo diversos níveis de ruído foi realizada. Os resultados experimentais demonstraram que independente do índice de dano escolhido, da frequência e amplitude de excitação, o ruído alterou os valores de forma geral em todos os casos. Ainda que tenham sido observadas essas alterações, tomando-se o uso de amplitudes maiores, foi possível classificar o dano para algumas frequências, isso ocorreu devido à melhora na relação sinal-ruído nos sinais de aquisição.

Por fim, embora ambas as técnicas de detecção tenham demonstrado eficiência na classificação do dano utilizando os índices RMSD e CCDM com sinais de alta frequência em um ambiente ruidoso, vale lembrar que um estudo em estruturas mais complexas e de outros materiais deve ser feito, bem como a utilização de outros índices de dano estrutural, podendo-se tomar uso de métodos ativos para o cancelamento do ruído, sendo essas sugestões para trabalhos futuros.

Referências

ALLEYNE, D.; CAWLEY, P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v.89, p. 1159-1168, 1991.

ANNAMDAS, V.; SOH, C. Three-dimensional electromechanical impedance model. I: Formulation of directional sum impedance. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 20, n. 1, p. 53– 62, 2007.

ANISIMOV, A. G.; GROVES, R. M. Extreme shearography: development of a high-speed shearography instrument for quantitative surface strain measurements during an impact event. **Optics And Lasers In Engineering**, v.140, 2021.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106502>.

AZUARA, G.; BARRERA, E.; RUIZ, M.; BEKAS, D. Damage detection and characterization in composites using a geometric modification of the RAPID algorithm. **IEEE Sensors**. v.20, n.4, p. 2084-2093, 2020.

BAPTISTA, F. G.; FILHO, J. V. A new impedance measurement system for PZT-based structural health monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.58, n.10, pp.3602-3608, 2009. [10.1109/TIM.2009.2018693](https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2018693)

BARUS, M.; WELEMANE, H.; NASSIET, V.; PASTOR, M. L.; CANTAREL, A.; COLLOMBET, F.; CROUZEIX, L.; GRUNEVOLD, Y. H. NDT-based design of joint material for the detection of bonding defects by infrared thermography. **Ndt & e International**, v.93, p.157-163, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.10.005>.

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

BRUNNER, A. J.; BIRCHMEIER, M.; MELNYKOWYCZ, M. M.; BARBEZAT, M. Piezoelectric fiber composites as sensor elements for structural health monitoring and adaptive material systems, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v.20, n.9, p. 1045-1055, 2009.

CAMPEIRO, L. M.; SILVEIRA, R. Z. M DA.; BAPTISTA, F. G. Impedance-based damage detection under noise and vibration effects. **Structural Health Monitoring**. v.17, p. 654-667, 2018. doi:[10.1177/1475921717715240](https://doi.org/10.1177/1475921717715240)

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; CIAMPA, F. Comparative analysis of signal processing techniques for impedance-based SHM applications in noisy environments. **Mechanical Systems And Signal Processing**, v.126, p. 326-340, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.02.034>.

CHANG, P, C.; FLATAU, A.; LIU, S, C. Review paper: Health monitoring of civil infrastructure. **Structural Health Monitoring**. v.2, n.3, p. 257-267, 2003.

CHENHUI, S.; JIANG, M.; LV, S.; LU, S.; ZHANG, L.; ZHANG, F.; QINGMEI, S. Improved Damage Localization and Quantification of CFRP Using Lamb Waves and Convolution Neural Network. **IEEE Sensors Journal**, v.19, p.5784-5791, 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/jsen.2019.2908838>.

CHOWDARY, D. Y.; ALAPATI, M. Effect of external vibrations on Electro-Mechanical impedance signatures in damage detection. **Materials Today: Proceedings**, v.45, p. 3398-3403, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.794>.

DE 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>

DU, C.; DUTTA, S.; KURUP, P.; YU, T.; WANG, X. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. **Sensors and Actuators: A.Physical**. v. 303, p. 111728, 2020.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. Structural health monitoring: a machine learning perspective. Chichester, West Sussex, U.K.; Hoboken, N.J: Wiley, 2013.

GAO, D.; WU, Z.; YANG, L.; ZHENG, Y. Integrated impedance and Lamb wave-based structural health monitoring strategy for long-term cycle-loaded composite structure. **Structural Health Monitoring**, v. 14, n.4, pp.763-776, 2017.

GE, J.; HU, B.; YANG, C. Bobbin pulsed eddy current array probe for detection and classification of defects in nonferromagnetic tubes. **Sensors and Actuators A**. v. 317, p.112450, 2021.

GIURGIUTIU, V. Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. Second Edition. Academic Press. p.1007, 2014.

GIURGIUTIU, V. Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v.16, n. 4, p.291-305, 2005.

IEEE Standard on Piezoelectricity. IEEE Standard 176,1988.

LEE, B. C.; STASZEWSKI, W. J. Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part II. Wave interactions with damage. **Smart Materials and Structures**. v.12, n. 5, p. 815–824, 2003.

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. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** v. 5, n. 1, p. 12–20, 1994.

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. Physical**. v.214, p.66-73, 2014.

- LI, L.; HAIDER, M. F.; MEI, H.; GIURGIUTIU, V.; XIA, Y. Theoretical calculation of circular-crested Lamb wave field in single- and multi-layer isotropic plates using the normal mode expansion method. **Structural Health Monitoring**. v.19, n.2, p.357-372, 2020.
- LI, W.; LIU, T.; ZOU, D.; WANG, J.; YI, T. PZT based smart corrosion coupon using electromechanical impedance. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v. 129, p. 455–469, 2019.
- LIN, X.; CHEN, G.; LI, J.; LU, F.; HUANG, S.; CHENG, X. Investigation of acoustic emission source localization performance on the plate structure using piezoelectric fiber composites. **Sensors and Actuators: A. Physical**. v. 282, p. 9-16, 2018.
- MA, Z.; YU, L. Lamb wave imaging with actuator network for damage quantification in aluminum plate structures. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v.32, n.2, p. 182-195, 2021.
- NEGI, P.; CHAKRABORTY, T.; KAUR, N.; BHALLA S. Investigations on effectiveness of embedded PZT patches at varying orientations for monitoring concrete hydration using EMI technique, **Construction And Building Materials**. v.169, p. 489-498, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.006>.
- PALLARÉS, F. J.; BETTI, M.; BARTOLI, G.; PALLARÉS, L. Structural health monitoring (SHM) and Nondestructive testing (NDT) of slender masonry structures: a practical review. **Construction And Building Materials**, v.297, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123768>.
- RIZZO, P.; DI SCALEA, F. L. Feature Extraction for Defect Detection in Strands by Guided Ultrasonic Waves. **Structural Health Monitoring**. v.5, n.3, p.297-308, 2006.
- SHAN, S.; CHENG, L. Mode-mixing-induced second harmonic A0 mode Lamb wave for local incipient damage inspection. **Smart Materials and Structures**. v.29, n.5, 2020.
- SHARMA, A.; KUMAR, S.; TYAGI, A. Noise filtering techniques for Lamb waves in structural health monitoring. **Multidiscipline Modeling In Materials And Structures**, v.14, p.676-694, 2018. <http://dx.doi.org/10.1108/mmms-08-2017-0089>.
- STEPINSKI, T.; MAŃKA, M.; MARTOWICZ, A. Interdigital Lamb wave transducers for applications in structural health monitoring. **NDT & E International**. v.86, p. 199-210, 2017.
- SU, C.; JIANG, M.; LIANG, J.; TIAN, A.; SUN, L.; ZHANG, L.; ZHANG, F.; SUI, Q. Damage identification in composites based on Hilbert energy spectrum and Lamb wave tomography algorithm. **IEEE Sensors J**. v.19, n.23, p. 11562-11572, 2019.
- SU, Z.; YE, L.; LU, Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. **Journal of Sound and Vibration**. v.295, p.753-780, 2006.
- SU, Z.; YE, L. Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag. 2009.

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**. 2013.

SU, C.; JIANG, M.; LV, S.; LU, S.; ZHANG, L.; ZHANG, F.; SUI, Q. Improved damage localization and quantification of CFRP using lamb waves and convolution neural network. **IEEE Sensors J.** v.19, n.14, p.5784-5791, 2019.

TALAKOKULA, V.; BHALLA, S.; GUPTA, A. Monitoring early hydration of reinforced concrete structures using structural parameters identified by piezo sensors via electromechanical impedance technique. **Mechanical Systems And Signal Processing**, v.99, p.129-141, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.042>.

WANDOWSKI, T.; MALINOWSKI, P. H.; OSTACHOWICZ, W. M. Improving the EMI-based damage detection in composites by calibration of AD5933 chip. **Measurement**. v.171, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108806>.

WORDEN, K.; FARRAR, C. R.; MANSON, G.; PARK, G. The fundamental axioms of structural health monitoring. **Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v.463, p.1639-1664, 2007. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2007.1834>.

WANG, D.; ZHOU, X.; SONG, H.; ZHU, H. A two-dimensional electromechanical impedance model and experimental verification of a PZT transducer. Proc. of 2016 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, Xi'an, China, p. 261-264, 2016

WU, J.; YANG, G.; WANG, X.; LI, W. PZT based soil compactness measuring sheet using electromechanical impedance. **IEEE Sensors J.** v.20, n.17, p.10240-10250, 2020.

XIAO, X.; GAO, B.; TIAN, G. Y.; CAI, Z. G.; WANG, K. Physical perspective forward-inverse learning for ultrasonic sensing diagnosis in small diameter and thin-wall tube. **Ultrasonics**. v.105, p. 106-115, 2020.

YU, L.; TIAN, Z. Guided wave phased array beamforming and imaging in composite plates. **Ultrasonics**, v. 68, p.43-53, 2016.

ZENG, L.; LIN, J.; HUANG, L. A Modified Lamb Wave Time-Reversal Method for Health Monitoring of Composite Structures. **Sensors**, v. 17, 955, 1-15, 2017.

ZHAO, X.; GAO, H.; ZHANG, G.; AYHAN, B.; YAN, F.; KWAN, C.; ROSE, J. L. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring. **Smart Materials and Structures**. v.16, n.4, p.1208–1217, 2007.

ZHANG, Z.; PAN, H.; WANG, X.; LIN, Z. Machine Learning-Enriched Lamb Wave Approaches for Automated Damage Detection. **Sensors**, v.20, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20061790>

ZHENG, Y.; LIU, K.; WU, Z.; GAO, D.; GORGIN, R.; MA, S.; LEI, Z. Lamb waves and electro-mechanical impedance based damage detection using a mobile PZT transducer set. **Ultrasonics**, v.92, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2018.06.008>.

ZOUBI, A. B.; KIM, S.; ADAMS, D. O.; MATHEWS, V. J. Lamb wave mode decomposition based on crossWigner-Ville distribution and its application to anomaly imaging for structural health monitoring. **IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. v.66, n.5, p. 984-997, 2019.