



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

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

**Métodos para Aumento da Sensibilidade na Detecção de
Danos Estruturais Baseada na Medição da Impedância de
Transdutores Piezelétricos**

DANILO ECIDIR BUDOYA

Bauru – SP
2021



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Métodos para Aumento da Sensibilidade na Detecção de
Danos Estruturais Baseada na Medição da Impedância de
Transdutores Piezelétricos**

DANILO ECIDIR BUDOYA

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. Fabricio Guimarães Baptista

Bauru – SP
2021

Budoya, Danilo Ecidir.

Métodos para aumento da sensibilidade na detecção de danos estruturais baseada na medição da impedância de transdutores piezelétricos / Danilo Ecidir Budoya, 2021

81 f.

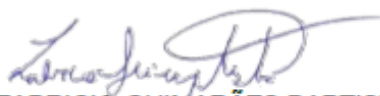
Orientador: Fabricio Guimarães Baptista

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

1. Impedância eletromecânica. 2. Alta frequência. 3. Monitoramento de integridade estrutural. 4. Capacitância negativa. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE DANILO ECIDIR BUDOYA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 15 dias do mês de dezembro do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de DANILO ECIDIR BUDOYA, intitulada **TÉCNICAS PARA AUMENTO DA SENSIBILIDADE NA DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADA NA MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS EM BAIXA E ALTA FREQUÊNCIA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. ROGÉRIO ANDRADE FLAUZINO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Prof. Dr. EDUARDO NOBUHIRO ASADA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Prof. Dr. MARCELO NICOLETTI FRANCHIN (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA CAMPOS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. 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

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
DANILO ECIDIR BUDOYA

DE: "TÉCNICAS PARA AUMENTO DA SENSIBILIDADE NA DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS
BASEADA NA MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS EM BAIXA E ALTA
FREQUÊNCIA"

PARA: "MÉTODOS PARA AUMENTO DA SENSIBILIDADE NA DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS
BASEADA NA MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS"

Bauru, 15 de dezembro de 2021.



Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista
Orientador

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Em especial ao meu pai, Ecidir Aparecido Budoya (in memorian), que por toda sua vida batalhou para a formação de seus filhos, mas que devido à pandemia da Covid-19, não poderá ver a realização de mais um dos seus sonhos. Agradeço por tudo, pela vida, por proporcionar condições para minha formação, por sempre se doar para trazer o melhor para sua família e pelo apoio, confiança e amor incondicionais. Espero que, onde quer que esteja, possa estar bem e feliz pela conclusão de mais uma etapa em minha vida, pois minhas conquistas sempre serão pelo senhor.

À minha mãe, Cleide Raquel Latini Budoya, que mesmo diante de tantas dificuldades e da recente perda, não deixou de incentivar e apoiar-me. Agradeço pelo amor e dedicação de uma vida inteira na busca de proporcionar sempre o melhor.

À minha namorada, Julianna Smanioto Delladona, pelo companheirismo e amor, principalmente no momento mais difícil da minha vida, em que não deixou de acreditar em mim, mesmo em meus piores momentos. À minha sogra, Maria Élide Smanioto, por toda ajuda e suporte nos momentos em que eu e minha família mais precisamos.

Aos meus familiares, irmã, tios e tias pelo suporte e incentivo. Em especial à Ivoneide A. Latini, Mário Augusto T. da Silva, João Moacir Budoya e Helena A. S. Budoya, por toda ajuda, companheirismo e força, principalmente nesses últimos meses.

Aos meus amigos e aos companheiros do Laboratório de Transdutores e Aquisição de Dados (LTAD), em especial ao Leandro Melo Campeiro, por toda ajuda durante todo o período de pós-graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista, pela profunda dedicação e ajuda durante todas as etapas deste trabalho, e por todo suporte e compreensão durante os momentos difíceis da recente perda do meu pai.

À comissão examinadora.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa (Processo 2018/09312-9) e auxílio financeiro (Processo 2017/23157-3) recebidos nesta pesquisa.

RESUMO

A medição da impedância elétrica de transdutores piezelétricos é uma das etapas mais importantes em sistemas de monitoramento de integridade estrutural com detecção de dano baseada na técnica da impedância eletromecânica (E/M). Muitos sistemas de medição alternativos têm sido propostos para substituírem os analisadores de impedância comerciais, por serem mais apropriados para aplicações em campo e medição de múltiplos transdutores. Os estudos reportados na literatura normalmente analisam o desempenho desses sistemas em baixa frequência. No entanto, a excitação do transdutor com frequência elevada, tipicamente acima de 1 MHz, permite a detecção de danos incipientes, tornando necessária a análise dos sistemas de medição em frequências elevadas. Portanto, esta tese de doutorado apresenta resultados de duas propostas que viabilizam a análise em frequências elevadas (acima de 1 MHz) e, inclusive, melhora a sensibilidade a variações estruturais também em baixas frequências. A primeira etapa deste trabalho apresenta resultados referentes à utilização de uma interface de capacitância negativa em conjunto com os outros elementos do sistema de medição. Foram realizadas análises teóricas que indicaram melhoria na sensibilidade do sistema de medição e, corroborando tal característica, os resultados dos testes práticos demonstraram o mesmo comportamento. Na segunda etapa, são apresentados resultados de testes práticos realizados em três estruturas de tamanhos diferentes ($100\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 0,2\text{ cm}$, $100\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0,2\text{ cm}$ e $100\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 0,2\text{ cm}$) em que se variou a amplitude dos sinais de excitação e também sua duração (por meio dos ciclos de estabilização) e, de acordo com o obtido, esta abordagem apresenta também resultados melhores em baixas frequências e viabiliza análises em altas frequências para todas as estruturas utilizadas.

Palavras-chave: impedância eletromecânica, alta frequência, monitoramento de integridade estrutural (SHM), transdutor piezelétrico, capacitância negativa, ciclos de estabilização

ABSTRACT

The measurement of electrical impedance of piezoelectric transducers is one of the most important steps in structural health monitoring (SHM) systems with damage detection based on the electromechanical impedance (EMI) technique. Many alternative measurement systems have been proposed to replace commercial impedance analyzers as they are more suitable for field applications and multi-transducer measurement. Studies reported in the literature usually analyze the performance of these systems at low frequency. However, excitation of the transducer with a high frequency, typically above 1 MHz, allows the detection of incipient damage, making it necessary to analyze measurement systems at high frequencies. Therefore, this doctoral thesis presents the results of two proposals that enable the analysis at high frequencies (above 1 MHz) and even improve the sensitivity to structural variations also at low frequencies. The first stage of this work presents results regarding the use of a negative capacitance interface together with the other elements of the measurement system. Theoretical analyzes were carried out which indicated an improvement in the sensitivity of the measurement system and, corroborating this characteristic, the results of the practical tests showed the same behavior. In the second stage, results of practical tests performed on three structures of different sizes are presented ($100\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 0.2\text{ cm}$, $100\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0.2\text{ cm}$ and $100\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 0.2\text{ cm}$) in which the amplitude of the excitation signals was varied and also their duration (through the stabilization cycles) and, according to what was obtained, this approach also presents better results at low frequencies and enables analyzes at high frequencies for all the structures used.

Keywords: electromechanical impedance, high frequency, structural health monitoring (SHM), piezoelectric transducers, negative capacitance, stabilization cycles

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração básica da técnica da impedância E/M.....	7
Figura 2 – Associação em paralelo de capacitores com capacitâncias C_0 e C_N	10
Figura 3 – Interface da capacitância negativa em paralelo com um transdutor piezelétrico e um medidor de impedância.....	11
Figura 4 – Comparação das sensibilidades relativas de um diafragma piezelétrico e um diafragma piezelétrico em paralelo com a interface de capacitância negativa.....	14
Figura 5 – Configuração experimental para os resultados envolvendo o uso da interface de capacitância negativa.....	18
Figura 6 – Capacitâncias experimentais	19
Figura 7 – Impedâncias elétricas para o método convencional e com uso da interface de capacitância negativa, entre 55 kHz e 70 kHz.....	20
Figura 8 – Impedâncias elétricas para o método convencional e com uso da interface de capacitância negativa, entre 1,11 MHz e 1,26 MHz.....	21
Figura 9 – Sinais obtidos com o método convencional e com uso da interface de capacitância negativa.....	22
Figura 10 – Sinais de PSD obtidos para o método convencional e com uso da interface de capacitância negativa.....	22
Figura 11 – Impedâncias elétricas para a estrutura sem e com dano, obtidas com método convencional, entre 66 kHz e 68 kHz.....	23
Figura 12 – Impedâncias elétricas para a estrutura sem e com dano, obtidas com a interface de capacitância negativa, entre 66 kHz e 68 kHz.....	24
Figura 13 – Índices RMSD calculados para o método convencional e com a interface de capacitância negativa, entre 55 kHz e 70 kHz.....	25
Figura 14 – Impedâncias elétricas para a estrutura sem e com dano, obtidas com método	

convencional, entre 1,11 MHz e 1,26 MHz.....	26
Figura 15 – Impedâncias elétricas para a estrutura sem e com dano, obtidas com a interface de capacitância negativa, entre 1,11 MHz e 1,26 MHz.....	26
Figura 16 – Índices RMSD calculados para o método convencional e com a interface de capacitância negativa, entre 1,11 MHz e 1,26 MHz.....	27
Figura 17 – Correntes de excitação para o método convencional e com a interface de capacitância negativa, entre 50 kHz e 2 MHz	28
Figura 18 – Estruturas utilizadas para os testes experimentais	34
Figura 19 – Visualização da montagem do diafragma piezelétrico e do dano à estrutura	34
Figura 20 – Coeficientes de variação para a Estrutura 1, obtidos próximos a 53500 Hz.....	35
Figura 21 – Coeficientes de variação para a Estrutura 2, obtidos próximos a 40300 Hz.....	36
Figura 22 – Coeficientes de variação para a Estrutura 3, obtidos próximos a 34550 Hz.....	36
Figura 23 – Coeficientes de variação para a Estrutura 1, obtidos próximos a 1080900 Hz.....	38
Figura 24 – Coeficientes de variação para a Estrutura 2, obtidos próximos a 1035500 Hz.....	38
Figura 25 – Coeficientes de variação para a Estrutura 3, obtidos próximos a 1038600 Hz.....	39
Figura 26 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 1 sem danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 53 kHz e 54 kHz	40
Figura 27 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 2 sem danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 40 kHz e 41 kHz	41
Figura 28 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 3 sem danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 34 kHz e 35 kHz	41
Figura 29 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 1 sem danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz.....	42
Figura 30 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 2 sem danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000	

Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz.....	43
Figura 31 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 3 sem danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz.....	43
Figura 32 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 1 sem e com danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 53 kHz e 54 kHz.....	45
Figura 33 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 2 sem e com danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 40 kHz e 41 kHz.....	45
Figura 34 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 3 sem e com danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 34 kHz e 35 kHz.....	46
Figura 35 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 1 sem e com danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz.....	47
Figura 36 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 2 sem e com danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz.....	47
Figura 37 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 3 sem e com danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz.....	48
Figura 38 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 1, na banda frequência de 50 kHz a 60 kHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização.....	49
Figura 39 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 2, na banda frequência de 35 kHz a 45 kHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização.....	49
Figura 40 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 3, na banda frequência de 30 kHz a 40 kHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização.....	50
Figura 41 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 1, na banda frequência de 1 MHz a 1,1 MHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização	51
Figura 42 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 2, na banda frequência de 1 MHz a 1,1 MHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização	51
Figura 43 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 3, na banda frequência de 1 MHz a 1,1	

MHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização52

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Combinações entre as configurações do sinal de excitação.....	31
Tabela II – Valores aproximados das frequências de análise para cada estrutura.....	32
Tabela III – Bandas de frequência adotadas em cada estrutura.....	32

LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

CCDM	<i>Correlation Coefficient Deviation Metric</i> - Desvio do coeficiente de correlação
CE	Ciclos de Estabilização
CD	Com danos
CN	Capacitância Negativa
DAQ	<i>Data Acquisition</i> – Dispositivo de aquisição de dados
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> – Transformada de Fourier discreta
E/M	Eletromecânica
FEM	<i>Finite Element Method</i> – Método dos Elementos Finitos
FRF	<i>Frequency Response Function</i> – Função de Resposta em Frequência
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LCR	<i>Instrumento de medição de impedância</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i> – Teste não destrutivo
PLB	<i>Pencil lead break</i> – Quebra do grafite
PSD	<i>Power Spectral Density</i> – Densidade Espectral de Potência
PZT	<i>Pb-Lead Zirconate Titanate</i> – Titanato zirconato de chumbo
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> – Desvio da raiz média quadrática
SD	Sem danos
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento de integridade estrutural

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
CE	<i>Ciclos de Tempo de Estabilização</i>	<i>Adimensional</i>
CV	<i>Coeficiente de Variação</i>	<i>%</i>
D	<i>Deslocamento Elétrico</i>	<i>C / m²</i>
E	<i>Campo Elétrico</i>	<i>V / m</i>
S	<i>Tensor de deformação mecânica (strain)</i>	<i>Adimensional</i>
T	<i>Tensão mecânica ou stress</i>	<i>N / m</i>
$Re(Z_1)$	<i>Parte real da impedância elétrica do transdutor para a estrutura sem danos</i>	Ω
$Re(Z_2)$	<i>Parte real da impedância elétrica do transdutor para a estrutura com danos</i>	Ω
R_1	<i>Resistor de valor fixo</i>	Ω
R_2	<i>Potenciômetro</i>	Ω
s	<i>Desvio padrão</i>	<i>Adimensional</i>
$\bar{X}$	<i>Média de valores</i>	<i>Adimensional</i>
Z	<i>Impedância elétrica</i>	Ω
Z_E	<i>Impedância elétrica do transdutor</i>	Ω
Z_D	<i>Impedância elétrica do diafragma piezelétrico</i>	Ω
Z_{DNC}	<i>Impedância elétrica do diafragma piezelétrico em paralelo com uma capacitância negativa</i>	Ω
Z_{B1}	<i>Impedância eletromecânica do disco de latão</i>	<i>N.s / m</i>
Z_{B2}	<i>Impedância eletromecânica do disco de latão</i>	<i>N.s / m</i>
Z_P	<i>Impedância mecânica do transdutor</i>	<i>N.s / m</i>
Z_{P1}	<i>Impedância eletromecânica do elemento piezelétrico</i>	<i>N.s / m</i>
Z_{P2}	<i>Impedância eletromecânica do elemento piezelétrico</i>	<i>N.s / m</i>
Z_S	<i>Impedância mecânica da estrutura</i>	<i>N.s / m</i>
C_C	<i>Coeficiente de correlação</i>	<i>Adimensional</i>
C_o	<i>Capacitância estática do diafragma</i>	<i>F</i>
C_N	<i>Capacitância negativa</i>	<i>F</i>

Símbolo	Descrição	Unidade
C_{REF}	<i>Capacitância de referência</i>	<i>F</i>
d_{31}	<i>Constante Piezelétrica</i>	<i>m / V</i>
ε	<i>Permissividade dielétrica</i>	<i>F / m</i>
ϕ_P	<i>Diâmetro do elemento piezelétrico</i>	<i>m</i>
h_P	<i>Espessura do disco cerâmico</i>	<i>m</i>
ρ_P	<i>Densidade de massa da cerâmica</i>	<i>Kg/m³</i>
j	<i>Unidade imaginária</i>	<i>Adimensional</i>
η	<i>Sensibilidade</i>	<i>Adimensional</i>
s_{11}^E	<i>Tensor de elasticidade ou compliance</i>	<i>m² / N</i>
ω	<i>Frequência</i>	<i>Hz</i>
ω_i	<i>Frequência da atual iteração</i>	<i>Hz</i>
ω_I	<i>Frequência inicial</i>	<i>Hz</i>
ω_F	<i>Frequência final</i>	<i>Hz</i>

PUBLICAÇÕES

Artigos completos publicados em periódicos no período do curso

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

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

CAMPOS, F. S.; CASTRO, B. A.; BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G.; ULSON, J. A. C.; ANDREOLI, A. L. Feature Extraction Approach Insensitive to Temperature Variations for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 13, n. 4, p. 536-543, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5226>

Artigo aceito para publicação no período do curso

BUDOYA, D. E.; CAMPEIRO, L. M.; BAPTISTA, F. G. Impedance-based SHM with high frequency excitation signals of variable amplitude and duration. **Proceedings of the 10th European Workshop on Structural Health Monitoring.**

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Organização do trabalho.....	4
Capítulo 2 - Princípio da Impedância Eletromecânica (E/M)	6
Capítulo 3 - Capacitância Negativa.....	10
3.1 Materiais e Métodos	15
3.2 Resultados	19
Capítulo 4 - Amplitude e Duração do Sinal de Excitação	29
4.1 Materiais e Métodos	30
4.2 Resultados	35
Conclusão.....	53
Sugestão para trabalhos futuros.....	55
Referências Bibliográficas.....	56
APÊNDICE A – Simulações no software ABAQUS Student Edition.....	59

Capítulo 1

Introdução

Sistemas de medição utilizados em sistemas de monitoramento de integridade estrutural, conhecidos como sistemas de SHM, do termo em inglês *structural health monitoring*, têm sido amplamente estudados para viabilizar o desenvolvimento de métodos de detecção de danos cada vez mais precisos, cujos benefícios são de interesse global (FARRAR; WORDEN, 2013; LI *et al.*, 2016). Entre esses benefícios, pode-se citar o aumento da segurança e a redução de gastos relacionados à manutenção, que podem se tornar preditivas ao invés de corretivas. Dentre as possíveis aplicações, incluem-se as grandes estruturas civis ou meios de transporte, como aeronaves, navios, barragens, pontes, oleodutos e construções civis. Os tipos de danos que podem sensibilizar e alertar tais sistemas de monitoramento são os que alteram as características mecânicas da estrutura, como rachaduras, furos, corrosão, desgaste, afrouxamento de conexões ou até mesmo variações de massa. Os benefícios de maior segurança e redução de custos com manutenção são alcançados pois os sistemas de SHM operam em tempo real ou periodicamente.

Os sistemas de SHM baseiam-se em testes que sejam minimamente invasivos às estruturas monitoradas, uma vez que nem sempre é possível suspender a operação completa de certas estruturas para a avaliação da condição estrutural da mesma. Esses testes são chamados de não destrutivos ou NDT (*Non-destructive testing*), e incluem a emissão acústica (CHINH, 2021; JINACHANDRAN *et al.*, 2019), ondas de Lamb (LI; DING; TAN, 2018; MÄLZER *et al.*, 2019; RAHBARI *et al.*, 2021), correntes de Foucault (CHEN *et al.*, 2018) e ondas ultrassônicas guiadas (ABBAS *et al.*, 2021; SABETI *et al.*, 2019). Além desses, a técnica da impedância eletromecânica (E/M) (ANTUNES *et al.*, 2019; HOSHYARMANESH *et al.*, 2017; SINGH; SIKDAR; MALINOWSKI, 2021) se destaca por permitir o uso de transdutores piezelétricos pequenos, leves e de baixo custo, operando simultaneamente como sensor e atuador, interferindo minimamente nas características da estrutura monitorada (FREITAS *et al.*, 2017).

A técnica da impedância E/M é baseada no efeito piezelétrico, ou seja, quando um transdutor é fixado à estrutura a ser monitorada, ocorre um acoplamento eletromecânico entre o transdutor e a estrutura. Assim, qualquer variação mecânica na estrutura resulta em uma variação correspondente na impedância elétrica do transdutor, e essa impedância pode ser obtida em diferentes faixas de frequência por um analisador de impedância comercial ou outro

sistema de medição alternativo.

Muitos estudos utilizam medidores LCR ou analisadores de impedância comerciais pois são sistemas altamente precisos e, principalmente, quando se deseja testar novas abordagens aos sistemas de detecção de danos tradicionais, são escolhidos devido a sua alta confiabilidade nas medições (ANNAMDAS; RADHIKA, 2013). No entanto, esses medidores geralmente são caros e, na maioria das vezes, grandes e inviáveis para aplicações em campo. Dessa forma, nem sempre possuem a flexibilidade de sistemas alternativos recentemente propostos, seja em termos de configurações de parâmetros (BUDOYA; BAPTISTA, 2018) ou a capacidade de unir diferentes técnicas (impedância E/M, ondas de Lamb, ondas guiadas, entre outras) num mesmo sistema de medição para uma análise mais precisa e completa (GUO; HUANG; SCHRÖDER, 2020; SEVILLANO; SUN; PERERA, 2016; ZHENG *et al.*, 2019).

Apesar da técnica da impedância E/M ser estudada há décadas e já ser difundido o conhecimento quanto à eficácia em sistemas de SHM, há ainda algumas limitações na sua aplicação. Variações externas aos sistemas de medições, como temperatura e ambientes ruidosos, podem inviabilizar a correta aferição sobre a condição de uma estrutura monitorada. Baptista *et al.* (2014) verificaram que as medições de impedância elétrica dos transdutores piezelétricos sofrem grande interferência da atual temperatura da estrutura que está sob análise. Tais interferências causam deslocamentos tanto em frequência quanto em amplitude das curvas e, quanto maior a frequência de análise, maiores são os deslocamentos observados em frequência. No mesmo trabalho, foi proposta uma forma de compensação dos deslocamentos em frequência, mas que possui efetividade limitada à largura de banda que se deseja corrigir os efeitos causados pela variação de temperatura. Li *et al.* (2019) propuseram a utilização do método da cointegração para diferenciar os efeitos de variação de temperatura e da real ocorrência de danos e conseguiram identificar variações estruturais mesmo quando também houve variação na temperatura. Além da temperatura, vibrações externas ao sistema de medição também causam interferências nas curvas de impedância e podem facilmente inviabilizar a detecção de danos de forma confiável. Campeiro, da Silveira e Baptista (2018) inseriram sinais de ruído branco de diferentes amplitudes a uma estrutura sob análise e verificaram que as curvas de impedância elétrica do transdutor piezelétrico sofrem mais variações quanto maior a amplitude do sinal de ruído branco, utilizado como fonte de vibração externa, inviabilizando a ocorrência de danos estruturais. Nesse mesmo trabalho, os autores propuseram a utilização de sinais de excitação de maior amplitude no sistema de medição implementado e, com isso, conseguiram reduzir a interferência das vibrações externas causadas pelos sinais de ruído

branco de baixa amplitude. Castro, Baptista e Ciampa (2019) também realizaram testes com diferentes níveis de ruído inseridos à estrutura sob análise e utilizaram diferentes técnicas de processamentos de sinais para compensar os efeitos das vibrações. Dentre as técnicas abordadas, o critério de Hinkley apresentou os melhores resultados, tornando a análise apta, inclusive, a detectar e ordenar diferentes níveis de danos mesmo com as medições sendo obtidas em diferentes níveis de vibração.

Além dos fatores acima citados, normalmente, na técnica da impedância E/M, o transdutor é excitado somente em frequências de até 600 kHz (SAFAEI; NOLAN; ANTON, 2019), que é a região onde a impedância elétrica muda o suficiente para detectar danos estruturais. Como é bem sabido, para transdutores de pequena espessura, a deformação mecânica ocorre principalmente no plano ortogonal ao campo elétrico aplicado, isto é, no plano da estrutura monitorada. No entanto, quando o transdutor é excitado por sinais de alta frequência, normalmente acima de 1 MHz, a deformação fica na mesma direção que o campo elétrico aplicado, ou seja, se torna significativo na direção da espessura da estrutura monitorada, viabilizando o monitoramento de condições estruturais especiais não permitidas em baixas frequências (KAMAS; TEKKALMAZ, 2017).

Embora a análise de alta frequência seja desejada em algumas aplicações, é difícil excitar o transdutor piezelétrico com um sinal de alta frequência e medir variações na impedância elétrica devido a danos estruturais. Como os transdutores piezelétricos são dispositivos capacitivos, sua reatância capacitiva torna-se muito baixa em altas frequências, limitando as variações na impedância elétrica devido a alterações estruturais. Assim, a primeira parte deste trabalho apresenta a implementação e o uso de uma interface de capacitância negativa (CN) para reduzir a componente capacitiva de um diafragma piezelétrico e, assim, possibilitar análises de alta frequência e reduzir a corrente de excitação para que aplicações em sistemas embarcados também sejam viáveis. Para esta etapa, há também uma análise teórica sobre a variação da sensibilidade a alterações estruturais que possui como base um modelo eletromecânico unidimensional para comparação dos efeitos da utilização da interface de capacitância negativa. Este modelo foi escolhido pois não há ainda na literatura um modelo tridimensional para os diafragmas piezelétricos que foram utilizados, e tal elaboração exigiria uma demanda equivalente a uma nova pesquisa de doutorado ou mestrado, podendo ser, inclusive, uma sugestão para trabalhos futuros. No entanto, mesmo fazendo uso de um modelo unidimensional para esta análise teórica, foi possível obter resultados conclusivos sobre os efeitos da utilização da interface de capacitância negativa em conjunto com o sistema de

medição, que foram corroborados pelos resultados dos testes práticos.

Outra possibilidade de se atingir resultados satisfatórios mesmo que em frequências acima de 1 MHz é a aplicação de um sinal de excitação com maior amplitude ou com maior duração, permitindo que a estrutura tenha mais tempo ou maior estímulo em cada frequência analisada e, portanto, possa vibrar adequadamente nesta região. Sendo assim, este trabalho também apresenta resultados experimentais que possibilitam o monitoramento de integridade estrutural utilizando-se a técnica da impedância E/M em baixas e altas frequências (acima de 1 MHz) calibrando-se apenas parâmetros dos sinais de excitação, como a amplitude e o tempo de excitação para cada frequência da banda de varredura (BUDOYA; BAPTISTA, 2018; SAFAEI; NOLAN; ANTON, 2019). Para esta etapa do trabalho, foram analisadas três estruturas de diferentes dimensões com o intuito de verificar como estas se comportam nessas regiões de frequência e se há algum tipo de relação entre os parâmetros dos sinais de excitação e o tamanho da estrutura sob teste. Ao fim, foram realizadas simulações no software *ABAQUS Student Edition* com o objetivo de se verificar se os comportamentos observados na etapa experimental também se repetiam em simulações teóricas. No entanto, por tratar-se de uma versão gratuita do programa, há diversas limitações no seu uso e as simulações foram feitas somente em baixa frequência. Dessa forma, esses resultados são apresentados a fim de acrescentar dados relacionados à temática desta etapa do trabalho e, sendo assim, encontram-se na seção do Apêndice A.

A seção seguinte apresenta de que forma este trabalho está organizado.

1.1 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução sobre sistemas de SHM, assim como de sistemas baseados na técnica da impedância E/M, além da apresentação da motivação e objetivos para a realização do trabalho;
- Capítulo 2 – Apresentação do método da impedância E/M;
- Capítulo 3 – Apresentação da interface de capacitância negativa, com detalhamento sobre sua funcionalidade e eficácia tanto em termos teóricos quanto baseada em testes experimentais;

- Capítulo 4 – Apresentação de dois parâmetros dos sinais de excitação em sistemas de medição que utilizam sinais senoidais, que demonstraram ser fundamentais para a obtenção de medições mais precisas e sensíveis a detecção de variações estruturais;
- Prossegue-se, então, para a Conclusão, Sugestões para Trabalhos Futuros e as Referências bibliográficas;
- Por fim, é apresentado o Apêndice A, que contém os resultados das simulações realizadas no software *ABAQUS Student Edition*.

Capítulo 2

Princípio da Impedância Eletromecânica (E/M)

Como mencionado no capítulo anterior, a técnica da impedância eletromecânica baseia-se no efeito piezelétrico, que proporciona um acoplamento eletromecânico com a estrutura a ser monitorada. O tipo mais comum de transdutor utilizado para essa aplicação é a cerâmica de PZT (*Pb-lead Zirconate Titanate* – titanato zirconato de chumbo) (GIURGIUTIU, 2010). As equações constitutivas básicas para o efeito piezelétrico atuando como sensor (efeito piezelétrico direto) e como atuador (efeito piezelétrico reverso) são apresentadas nas Equações (1) e (2), respectivamente, desconsiderando-se os efeitos térmicos e magnéticos (MEITZLER *et al.*, 1988).

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (1)$$

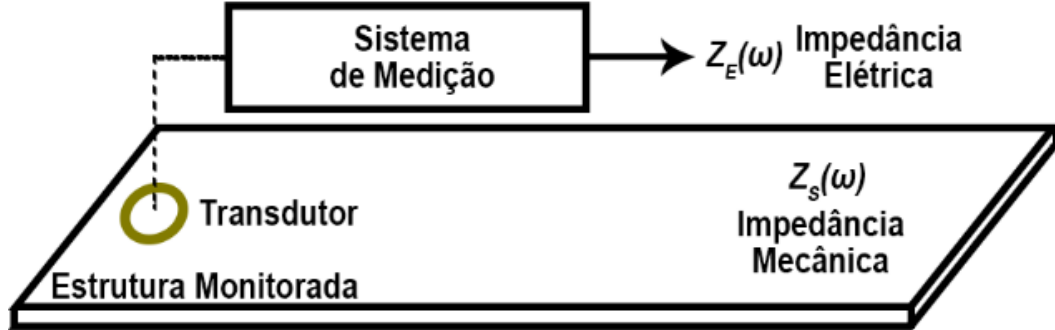
$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (2)$$

em que E_k e D_i são as componentes do campo elétrico e do deslocamento elétrico, respectivamente, d_{ikl} e d_{kij} são as constantes piezelétricas, s_{ijkl}^E são as constantes de elasticidade (*compliance*) para um campo elétrico constante, ε_{ik}^T são as constantes dielétricas para uma tensão mecânica constante, T_{kl} e S_{ij} são as componentes de tensão e deformação mecânica, respectivamente, e $i, j, k, l = 1, 2, 3$, representando os eixos do sistema de coordenadas natural do material piezelétrico.

O princípio básico de um sistema de SHM baseado na técnica da impedância E/M é mostrado na Figura 1, em que é apresentado um sistema de medição aferindo a impedância elétrica de um transdutor piezelétrico acoplado à estrutura monitorada.

Como mostrado na Figura 1, com o transdutor piezelétrico acoplado à estrutura monitorada, o sistema de medição excita o sensor e obtém simultaneamente a impedância elétrica em uma determinada frequência (ω). Recentemente, diafragmas piezelétricos (FREITAS *et al.*, 2017) ganharam relevância na técnica da impedância eletromecânica porque são baratos e fornecem resultados tão bons quanto aqueles das cerâmicas de PZT tradicionais.

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



Fonte: Autoria própria.

Os diafragmas piezelétricos foram utilizados para os testes deste trabalho e normalmente consistem em um disco de material piezelétrico (elemento ativo) em um disco de latão.

Freitas *et al.* (2017) desenvolveram um modelo unidimensional que relaciona a impedância elétrica obtida do diafragma piezelétrico com a impedância mecânica da estrutura monitorada. Por se tratar de uma abordagem unidimensional, considerando-se que a deformação na direção da espessura do transdutor é pouco expressiva, as Equações (1) e (2) podem ser reescritas como

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

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

Dessa forma, utilizando-se como princípio de funcionamento as Equações (3) e (4), a relação entre a impedância elétrica de um diafragma piezelétrico ($Z_D(\omega)$) acoplada a uma estrutura de impedância mecânica $Z_S(\omega)$ foi obtida em Freitas *et al.* (2017), considerando uma abordagem unidimensional e é dada por

$$Z_D(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} \left\| \left(\frac{2s_{11}^E}{\pi\phi_P d_{31}} \right)^2 \left[Z_{P2} + \frac{1}{2} \left(Z_{P1} + Z_{B1} + \frac{Z_{B2}(Z_{B1} + Z_S)}{Z_{B1} + Z_{B2} + Z_S} \right) \right] \right\| \quad (5)$$

em que $Z_D(\omega)$ é a impedância elétrica do diafragma piezelétrico na frequência ω ; Z_{P1} e Z_{P2} são as impedâncias eletromecânicas do elemento piezelétrico; Z_{B1} e Z_{B2} são as impedâncias

eletromecânicas do disco de latão; Z_S é a impedância mecânica da estrutura em análise; s_{11}^E é o tensor de elasticidade sob um campo elétrico constante; d_{31} é a constante piezelétrica; ϕ_P é o diâmetro do elemento piezelétrico; e C_0 é a capacitância estática do diafragma piezelétrico, onde o termo $1/j\omega C_0$ é sua reatância capacitiva. Mais detalhes sobre o modelo eletromecânico descrito pela Equação (5) podem ser encontrados em Freitas *et al.* (2017).

Vale enfatizar que o modelo apresentado pela Equação (5) não contempla as variações ocasionadas no eixo da espessura do material piezelétrico, que é onde a análise em altas frequências para a técnica da impedância eletromecânica também pode apresentar resultados. Tal modelagem pode ser desenvolvida em trabalhos futuros para maiores detalhes sobre variações em todos os sentidos de propagação das ondas mecânicas. Além disso, o diafragma utilizado para a modelagem possui um padrão de vibração mecânica predominantemente ortogonal à direção do campo elétrico aplicado. No entanto, há outros tipos de transdutores em que as vibrações mecânicas ocorrem em diferentes combinações de direções, inclusive somente na mesma do campo elétrico e, com isso, diferentes modelagens ainda são necessárias.

De qualquer forma, como apresentado pela Equação (5), qualquer variação mecânica na estrutura, como danos estruturais, resulta em uma variação correspondente na impedância elétrica $Z_D(\omega)$ do diafragma piezelétrico. Portanto, a condição de uma estrutura pode ser monitorada medindo-se regularmente a impedância elétrica de um transdutor piezelétrico acoplado à estrutura e comparando-se essa impedância com a assinatura obtida em um estado conhecido sem danos estruturais.

Entretanto, como pode ser visto na Equação (5), a reatância capacitiva limita as variações na impedância elétrica devido a mudanças estruturais, uma vez que a reatância é paralela ao restante dos termos da equação. Essa limitação é crítica, principalmente em altas frequências, pois quanto maior a frequência de análise, menor a reatância capacitiva e, consequentemente, menores as variações na impedância elétrica $Z_D(\omega)$ devido a variações na impedância mecânica Z_S da estrutura monitorada. Além de tais limitações nos valores de impedância elétrica, uma reatância capacitiva baixa requer alta corrente de excitação, que pode ser problemático para sistemas de medição comerciais, alternativos ou embarcados.

Portanto, no Capítulo 3 deste trabalho, é apresentada uma solução alternativa para os problemas acima citados, envolvendo o uso de uma interface de capacitância negativa em paralelo com o transdutor piezelétrico, de modo que a capacitância equivalente entre a capacitância estática C_0 do transdutor e a capacitância negativa C_N apresente valores próximos a zero e, consequentemente, permita que mudanças estruturais sejam mais evidentes na

impedância elétrica do transdutor. Assim, a análise de alta frequência se torna viável e a corrente de excitação exigida pelo transdutor é reduzida. O próximo Capítulo apresenta mais detalhes sobre a interface de capacitância negativa e como a sensibilidade dos transdutores piezelétricos a danos estruturais é aprimorada com o uso dessa interface.

No Capítulo 4 deste trabalho, é apresentada outra proposta para possibilitar uma melhoria na identificação de variações estruturais em altas frequências, e que também melhora a sensibilidade em baixas frequências de análise. Para este capítulo, a abordagem é relacionada a variações de parâmetros utilizados no sistema de medição, como a amplitude e o tempo de excitação para cada frequência da banda de varredura (BUDOYA; BAPTISTA, 2018; SAFAEI; NOLAN; ANTON, 2019). Os testes desta etapa foram realizados em três estruturas de tamanhos diferentes para que se pudesse observar se há alguma relação entre os tamanhos das estruturas e os parâmetros testados.

Capítulo 3

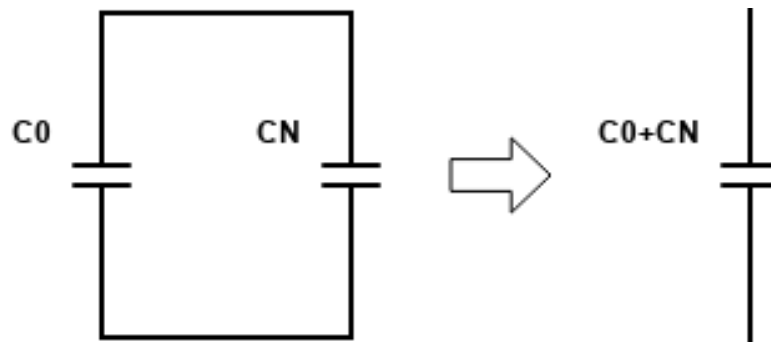
Capacitância Negativa

A utilização da capacitância negativa é bastante conhecida e, nesta seção, sua eficiência é teoricamente demonstrada para a melhoria da sensibilidade de transdutores piezelétricos para detecção de dano baseada na técnica da impedância E/M.

Um circuito de capacitância negativa é basicamente um conversor de impedância negativa baseado em um único amplificador operacional. A capacitância negativa tem sido utilizada com transdutores piezelétricos para melhorar o acoplamento eletromecânico em várias aplicações, como controle de vibração (BECK; CUNEFARE; COLLET, 2013), manipulação de ondas elásticas (BAO; WANG, 2019) e ressonadores micromecânicos (AKGUL *et al.*, 2014).

Conforme apresentado no Capítulo 2, a componente limitadora da técnica da impedância E/M em altas frequências é a capacitância estática C_0 do transdutor piezelétrico devido à reatância reduzida ($1/j\omega C_0$). Historicamente, essa capacitância é um desafio em muitas aplicações, como projetos de filtros, osciladores e sensores (AKGUL *et al.*, 2014). Assim, a diminuição do valor da capacitância estática do transdutor permite que alterações estruturais causem variações mais evidentes na assinatura da impedância elétrica. Uma maneira de diminuir a capacitância estática C_0 é introduzir, paralelamente ou em série com o transdutor, uma capacitância negativa C_N . Para os resultados deste trabalho, uma conexão paralela foi utilizada, e a capacitância equivalente em uma conexão paralela é dada por $C_0 + C_N$. Portanto, se $C_N = -C_0$, a capacitância equivalente é idealmente nula. Na Figura 2 é apresentado um esquema básico de associação de capacitores em paralelo.

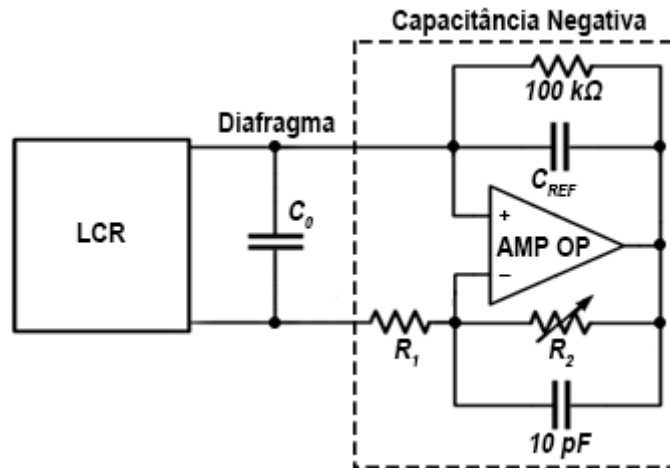
Figura 2 – Associação em paralelo de capacitores com capacitâncias C_0 e C_N



Fonte: Autoria própria.

Uma capacitância negativa pode ser obtida usando um circuito conversor de impedância baseado em um amplificador operacional (BECK; CUNEFARE; COLLET, 2013). Um circuito de capacitância negativa C_N , em conjunto com um transdutor piezelétrico com capacitância estática C_0 e um instrumento de medição de impedância (LCR), é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Interface da capacitância negativa em paralelo com um transdutor piezelétrico e um medidor de impedância



Fonte: Autoria própria.

De acordo com o apresentado na Figura 3, a capacitância negativa C_N é dada por (BECK; CUNEFARE; COLLET, 2013)

$$C_N = -\frac{R_2}{R_1} C_{REF} \quad (6)$$

em que C_{REF} é a capacitância de referência usada para obter a capacitância negativa; R_1 é um resistor de valor fixo; e R_2 é um potenciômetro para regular o valor negativo da capacitância.

Vale ressaltar que o circuito da Figura 3 apresenta problemas de estabilidade que dependem da resposta dinâmica do amplificador operacional e das capacitâncias parasitas. Dessa maneira, o capacitor de 10 pF e o resistor de 100 kΩ são usados para a operação estável do circuito, detalhados na Seção 3.1 deste trabalho.

Como mencionado acima, o valor da capacitância negativa C_N deve ser o mais próximo possível da capacitância estática do transdutor C_0 , de modo que a capacitância resultante seja idealmente zero; portanto, a impedância elétrica do diafragma piezelétrico mostrada na Equação

(5) é alterada da seguinte forma:

$$Z_{D_{NC}}(\omega) = \left\{ \left(\frac{2s_{11}^E}{\pi\phi_P d_{31}} \right)^2 \left[Z_{P2} + \frac{1}{2} \left(Z_{P1} + Z_{B1} + \frac{Z_{B2}(Z_{B1} + Z_S)}{Z_{B1} + Z_{B2} + Z_S} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

em que $Z_{D_{NC}}(\omega)$ é a impedância elétrica do diafragma piezelétrico em paralelo com uma capacitância negativa com um valor idealmente igual à capacitância estática do diafragma, isto é, $C_N = -C_0$. Idealmente, como mostrado na Equação (7), a nova impedância equivalente não possui nenhum componente capacitivo. Assim, mudanças estruturais não são mais atenuadas pela reatância capacitiva e podem apresentar altas variações correspondentes na impedância elétrica.

A sensibilidade de um determinado transdutor a danos estruturais pode ser obtida teoricamente através da análise das alterações em sua impedância elétrica, como mostrado nas Equações (5) e (7), causadas por variações na impedância mecânica Z_S de uma determinada estrutura (FREITAS *et al.*, 2017). Para esta abordagem, a derivada parcial em relação à impedância mecânica da estrutura monitorada Z_S é aplicada à impedância elétrica da seguinte maneira:

$$\eta(\omega) = \left| \frac{\partial |Z(\omega)|}{\partial Z_S} \right| \quad (8)$$

em que $Z(\omega)$ é a impedância elétrica, conforme dada pelas Equações (5) e (7).

Para este estudo, foi considerado um diafragma piezelétrico 7BB-20-6, fabricado pela *Murata Electronics North America, Inc.* (Smyrna, GA, EUA). As dimensões e propriedades do diafragma são as seguintes (MURATA MANUFACTURING, 2008): constante piezelétrica (d_{31}) de -207×10^{-12} m/V; tensor de elasticidade (s_{11}^E) de 15.8×10^{-12} m²/N; capacitância (C_0) de 10 nF; diâmetro do disco cerâmico (ϕ_P) de 14,0 mm; diâmetro do disco de latão de 20 mm; espessura do disco de latão de 0,20 mm; densidade de massa de latão de 8500 kg/m³; tensor de elasticidade do latão de 9.1×10^{-12} m²/N; espessura do disco cerâmico (h_P) de 0,22 mm; e densidade de massa da cerâmica (ρ_P) de 7800 kg/m³.

As impedâncias elétricas dos transdutores sem e com capacitância negativa podem ser obtidas substituindo-se esses valores nas Equações (5) e (7), respectivamente. Além disso, as

impedâncias eletromecânicas Z_{P1} , Z_{P2} , Z_{B1} e Z_{B2} podem ser calculadas usando os outros valores de acordo com o modelo eletromecânico unidimensional (FREITAS *et al.*, 2017) dos diafragmas piezelétricos. Assim, as sensibilidades a danos estruturais de um transdutor convencional e de um transdutor com capacitância negativa em paralelo podem ser calculadas e comparadas utilizando-se a Equação (8).

Embora a Equação (7) represente a impedância elétrica ideal ao usar capacitância negativa para cancelar a capacitância estática do transdutor, na prática, um valor equivalente de capacitância nula não é alcançado devido à resposta em frequência e outras limitações do amplificador operacional. Assim, para esta análise teórica, foram considerados dois valores de capacitância: $C_0 = 10$ nF, que é a capacitância estática do modelo do diafragma 7BB-20-6 descrito anteriormente, e $C_0 + C_N = 1,3$ nF, que é o valor equivalente de capacitância obtido utilizando-se a interface de capacitância negativa durante testes experimentais para uma ampla faixa de frequências, conforme descrito na Seção 3.1 deste trabalho.

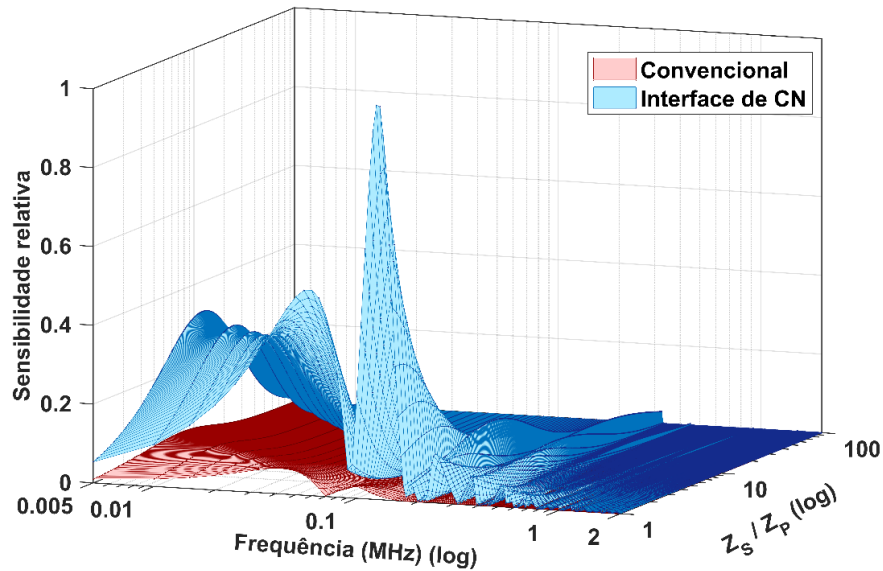
Além disso, o valor da impedância mecânica Z_S da estrutura monitorada não foi definido, fazendo com que seu valor varie de acordo com a impedância mecânica do transdutor Z_P , de acordo com a relação Z_S/Z_P . A impedância mecânica do transdutor é dada aproximadamente por (FREITAS *et al.*, 2017)

$$Z_P \cong \frac{\pi \phi_p h_p}{2} \sqrt{\frac{\rho_p}{s_{11}^E}} \quad (9)$$

As sensibilidades ao dano em função da frequência e da razão Z_S/Z_P obtida para o transdutor convencional e o transdutor em paralelo com a interface de CN são mostradas na Figura 4. A análise teórica foi realizada até 2 MHz, pois o circuito apresentado na Figura 3 mostrou-se estável até essa frequência, conforme descrito em detalhes na Seção 3.1.

Como mostrado na Figura 4, as curvas estão normalizadas entre os valores de 0 e 1 para uma comparação adequada. A sensibilidade obtida pelo transdutor utilizando capacitância negativa é significativamente maior que a do transdutor convencional. Esse comportamento é observado em toda a faixa de frequência e para todos os tamanhos de estrutura considerados (relação Z_S/Z_P). Embora a melhora na sensibilidade seja mais perceptível para baixas frequências, os picos de alta frequência aparecem com o uso da capacitância negativa, indicando melhora também nessa região.

Figura 4 – Comparação das sensibilidades relativas de um diafragma piezelétrico e um diafragma piezelétrico em paralelo com a interface de capacitância negativa



Fonte: Autoria própria.

Portanto, essa análise teórica indica que o uso de um transdutor piezelétrico em conjunto com uma interface de CN, com o objetivo de reduzir a capacitância estática do transdutor, traz benefícios em termos de sensibilidade a variações estruturais quando aplicado a sistemas de SHM baseados na impedância E/M. Além disso, à medida que a capacitância é reduzida e, conseqüentemente, a reatância capacitiva aumenta, a análise de alta frequência se torna viável especialmente para sistemas embarcados autônomos que não possuem grande capacidade de corrente elétrica. Vale ressaltar que o modelo utilizado para as simulações foi elaborado para uma proposta unidimensional e, como em altas frequências há também deformações mecânicas presentes no mesmo sentido da espessura do material piezelétrico, os resultados apresentados na Figura 4 tendem a ser ainda melhores quando forem aplicados a uma modelagem tridimensional.

É importante observar que a melhoria da sensibilidade do transdutor ao usar a interface de capacitância negativa não somente pode ser aplicada para detectar danos estruturais em estruturas de engenharia, mas também pode ser estendida a outros campos de pesquisa que monitoram variações nas quantidades mecânicas por meio das variações correspondentes na impedância elétrica dos transdutores. Outros campos de pesquisa que podem empregar os resultados aqui apresentados são biomedicina e odontologia, com aplicações como diagnóstico biomédico (JASIM *et al.*, 2019; SRIVASTAVA; BHALLA, 2019) e monitoramento de

implantes dentários (RIZZO, 2019).

A melhoria na sensibilidade para detectar danos estruturais foi validada experimentalmente por testes em uma barra de alumínio. A configuração experimental é apresentada na próxima seção.

3.1 Materiais e Métodos

Todos os testes foram realizados em uma barra de alumínio fina e estreita, com dimensões de 500 mm x 38 mm x 3 mm, representando adequadamente um modelo de propagação unidimensional, considerado para o desenvolvimento das Equações (5) e (7) e, conseqüentemente, os resultados apresentados na Figura 4. Como transdutor piezelétrico, um diafragma piezelétrico foi utilizado com as características apresentadas neste capítulo. O diafragma foi acoplado à estrutura com adesivo à base de cianoacrilato, com o centro a 25 mm de uma extremidade da barra de alumínio.

Como mencionado anteriormente, a faixa de estabilidade e frequência de operação da interface de CN apresentada na Figura 3 depende da resposta dinâmica do amplificador operacional. Neste estudo, o amplificador operacional LT1363, da *Analog Devices, Inc.*, foi escolhido devido à sua alta largura de banda e *slew rate*. O capacitor de 10 pF e o resistor de 100 k Ω , mostrados na Figura 3, são usados para cancelar o polo de entrada e otimizar o desempenho dinâmico, conforme recomendado pelo próprio fabricante. Além disso, um capacitor de 10 nF foi utilizado como capacitância de referência C_{REF} , um resistor de 10 k Ω como resistor fixo R_1 e um potenciômetro de 20 k Ω como R_2 . O circuito foi alimentado com uma alimentação de ± 15 V e foram utilizados capacitores de tântalo de *bypass* de 1 μ F.

Com essa configuração, a interface de CN operou estável em uma faixa de frequência de 50 kHz a 2 MHz e com um sinal de excitação de 0,5 VRMS. A capacitância equivalente estável obtida da associação paralela entre o transdutor piezelétrico e a interface de CN foi de aproximadamente 1,3 nF, ou seja, $C_0 + C_N \cong 1,3$ nF e, como mostrado na Seção 3.2, a capacitância equivalente varia ligeiramente de acordo com a resposta dinâmica do amplificador operacional. Vale ressaltar que o ajuste dos valores da interface de CN foi realizado de acordo com testes que visaram determinar qual era a faixa de atuação estável. Sendo assim, os valores adotados para este trabalho respeitam as limitações impostas pelos equipamentos utilizados, como limites de tensão e corrente do medidor LCR, e também as limitações relacionadas à

tecnologia dos componentes utilizados para a montagem da interface. É importante observar que uma faixa de frequência operacional mais ampla e uma capacitância equivalente menor podem ser obtidas de acordo com os equipamentos e componentes utilizados, como o tipo de capacitor utilizado como referência, os resistores e também o amplificador operacional utilizado na interface de CN.

Os testes experimentais realizados neste estudo consistiram em comparar as sensibilidades de danos estruturais do transdutor convencional e do transdutor com a interface de CN. Inicialmente, as duas condições (com e sem a interface de CN) foram analisadas e comparadas pelo teste da quebra do grafite (PLB – *Pencil Lead Break*). O teste PLB é uma ferramenta conhecida por gerar uma fonte de emissão acústica (ZHOU *et al.*, 2018) e também pode ser usado para avaliar a sensibilidade de transdutores piezelétricos na detecção de danos por impedância (ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR, 2015). Este teste consiste em quebrar uma ponta de grafite contra a estrutura em análise. Ao realizar a quebra, uma onda elástica com um amplo espectro de frequência é liberada e então é adquirida do transdutor utilizando um dispositivo de aquisição de dados (DAQ). O sinal obtido é então processado no domínio da frequência pelo cálculo da densidade espectral de potência (PSD – *Power Spectral Density*). Além da barra de alumínio e do diafragma piezelétrico já descritos, um módulo de aquisição NI PXIe-5105 com uma taxa de aquisição de 60 MHz foi utilizado para este teste. Além disso, os testes foram realizados com um grafite de 0,5 mm de diâmetro e comprimento de 3 mm, em contato com a estrutura em um ângulo de 40° (E07 COMMITTEE, 2010). Cinco quebras foram realizadas sem o uso de capacitância negativa, e outras cinco quebras foram realizadas com capacitância negativa, todas a 100 mm do diafragma piezelétrico.

O segundo teste consistiu em análises utilizando o método da impedância E/M. Os testes foram realizados em duas bandas de frequência diferentes (55 kHz a 70 kHz e 1,11 MHz a 1,26 MHz) e, para ambas, foram obtidas assinaturas de impedância elétrica do diafragma piezelétrico com e sem o uso da interface de CN. Como é sabido, a detecção de danos no método da impedância E/M é tipicamente baseada em uma comparação entre duas assinaturas de impedância, uma das quais é conhecida por estar em um estado íntegro (sem danos – também comumente chamada de *baseline*) e a segunda após qualquer dano. Geralmente, essa comparação é feita calculando-se índices de danos. Para os resultados desta etapa do trabalho, foi utilizado o desvio da raiz média quadrática (RMSD – *Root mean square deviation*), que é dado por (FARRAR; WORDEN, 2013)

$$RMSD = \sum_{\omega=\omega_l}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[\text{Re}(Z_2(\omega)) - \text{Re}(Z_1(\omega))]^2}{\text{Re}(Z_1(\omega))^2}} \quad (10)$$

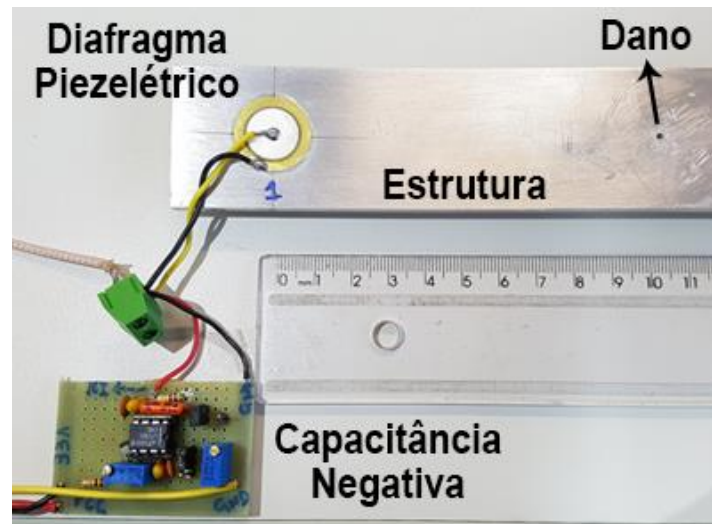
sendo que RMSD é o índice calculado entre a frequência inicial ω_l e a frequência final ω_F , $\text{Re}(Z_1(\omega))$ é a parte real da assinatura de impedância elétrica para estrutura sem danos e $\text{Re}(Z_2(\omega))$ é a parte real da impedância elétrica após a ocorrência de qualquer dano. O dano aplicado à estrutura foi um furo a 100 mm do transdutor piezelétrico, utilizando uma broca de 1,5 mm de diâmetro. Esse dano corresponde a uma variação de massa de aproximadamente 0,0093%. Vale enfatizar que as escolhas da posição e tamanho do dano foram feitas de acordo com testes prévios para que fosse possível verificar a atuação da interface de capacitância negativa numa situação em que já era possível detectar danos com a técnica tradicional e, com isso, verificar o aumento ou não da sensibilidade a variações estruturais quando utilizou-se a técnica tradicional em conjunto com a interface de capacitância negativa. Sendo assim, estudos sobre as limitações de sensibilidade da técnica a diferentes tamanhos e distâncias do dano ao transdutor piezelétrico, entre outras condições, ainda devem ser realizados em trabalhos futuros para a caracterização definitiva do método aqui apresentado.

Para obter as assinaturas de impedância, foi utilizado o medidor de impedância comercial LCR IM 3536, da HIOKI, equipado com o *test fixture* HIOKI 9262. Esse medidor consegue realizar medições em nível DC e também na faixa de 4 Hz a 8 MHz. Para tal, possui tensão variável de 10 mV até 5 VRMS e capacidade de corrente de 10 μ A até 100 mA RMS. A precisão das medições pode chegar a até $\pm 0,05\%$ do valor medido. Além disso, possui 4 velocidades de medição, de forma que as medições mais lentas são as mais precisas. É possível realizar medições de diversos parâmetros, como a impedância, admitância, ângulo de fase, reatância, condutância, susceptância, capacitâncias, resistências, indutâncias, entre outras. Além disso, tais medições podem ser feitas ponto a ponto, para cada sinal com frequência específica, ou para determinada banda de frequência, fazendo a varredura de acordo com as configurações desejadas de passo de frequência, frequência inicial e final. Por fim, tais medições podem ser visualizadas na tela do próprio medidor, armazenadas em um pen-drive ou ainda em um computador, já que possui diversas conexões disponíveis, entre elas a porta USB.

Sendo assim, o transdutor foi excitado com um sinal de 0,5 VRMS e as assinaturas de impedância foram obtidas com passos de 10 Hz para a banda de baixa frequência (55 kHz a 70 kHz) e passos de 100 Hz para banda de alta frequência (1,11 MHz a 1,26 MHz). As medições das assinaturas de impedância elétrica para a estrutura considerada sem danos foram obtidas

para as duas configurações (sem e com a interface de CN) para as duas faixas de frequência e, após a perfuração, foram obtidas novamente para as duas configurações nas duas faixas de frequência. A configuração experimental é mostrada na Figura 5. É importante observar que a interface mostrada na Figura 5 é apenas um protótipo para avaliar a metodologia proposta e não um produto final. Dessa forma, diferentes tecnologias e tipos de componentes podem exigir ajustes distintos e valores diferentes dos obtidos para a atuação estável observada neste trabalho. Além disso, uma interface mais compacta para uso com sensores autônomos pode ser facilmente obtida utilizando-se placas de circuito impresso específicas e dispositivos de montagem em superfície.

Figura 5 – Configuração experimental para os resultados envolvendo o uso da interface de capacitância negativa



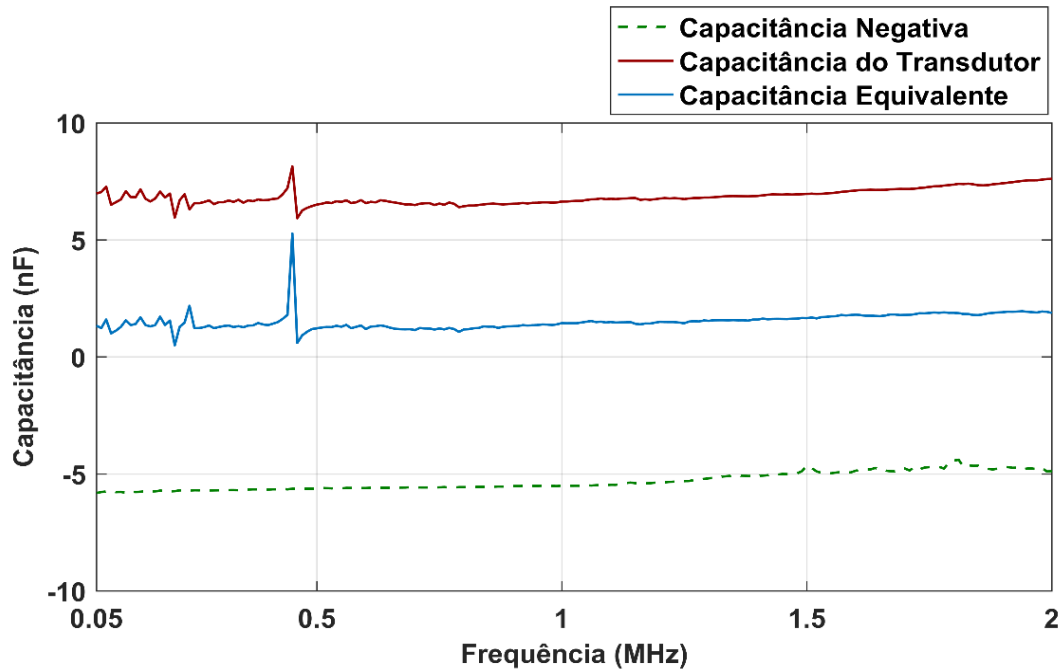
Fonte: Autoria própria.

Além dos testes já descritos, foram medidas a corrente fornecida pelo LCR e a capacitância do diafragma piezelétrico com e sem a interface de CN. Todos os testes foram realizados em temperatura ambiente controlada de aproximadamente 25 °C e com a estrutura suportada por blocos de borracha. Como é sabido, o método da impedância E/M é significativamente sensível à variação de temperatura (LI *et al.*, 2019), e o controle de temperatura é necessário para garantir que as variações observadas nas assinaturas de impedância sejam devidas a danos estruturais e não a efeitos de temperatura. Os resultados são apresentados na próxima seção.

3.2 Resultados

Inicialmente, como uma demonstração da operação da interface de capacitância negativa para reduzir o valor de capacitância do transdutor piezelétrico, apresenta-se, na Figura 6, as capacitâncias experimentais para toda a faixa de frequência operacional, de 50 kHz a 2 MHz, obtidas para a capacitância negativa (C_N), para o transdutor piezelétrico convencional (C_0) e para a capacitância equivalente do transdutor piezelétrico utilizando a interface de CN ($C_0 + C_N$). As capacitâncias foram medidas com o medidor LCR IM3536 com intervalos de frequência de 10 kHz e sinal de excitação de 0,5 VRMS.

Figura 6 – Capacitâncias experimentais



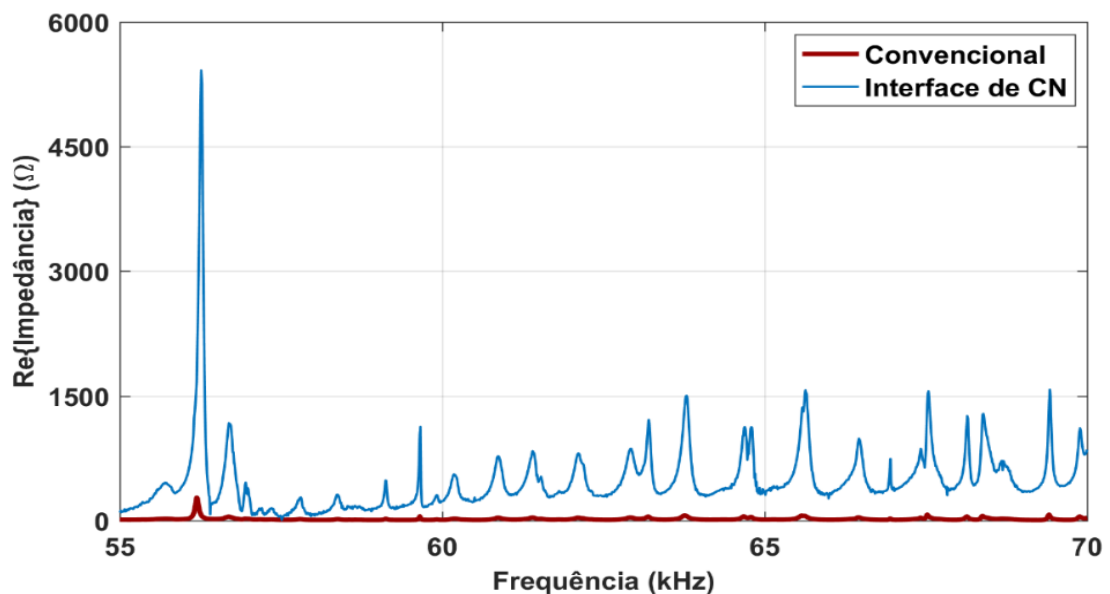
Fonte: Autoria própria.

Como mostrado na Figura 6, a capacitância negativa (C_N) varia de aproximadamente -5,8 nF a -4,4 nF em toda a faixa de frequência analisada. Essa variação depende da resposta dinâmica do amplificador operacional. Apesar da variação observada, a interface de CN operou estável, diminuindo a capacitância equivalente do transdutor ($C_0 + C_N$) conforme desejado. Como observado, o transdutor sozinho possui uma capacitância média (C_0) em torno de 7 nF. Utilizando a interface, a capacitância equivalente ($C_0 + C_N$) é reduzida para uma média em torno de 1,3 nF. A redução na capacitância é em média de aproximadamente 80%. É importante

observar que é possível reduzir a capacitância equivalente a alguns pF, mas a compensação não é eficaz ao excitar o transdutor em amplas faixas de frequência, como considerado para os resultados deste trabalho. Além disso, esse resultado depende da resposta em frequência do amplificador operacional usado. Portanto, em aplicações que exigem análises em faixas estreitas, uma capacitância equivalente muito pequena pode ser obtida. Finalmente, é importante notar que as variações pronunciadas observadas nas curvas de capacitância do transdutor isolado e do transdutor usando a interface de CN são devidas a picos ressonantes, que são esperados no método da impedância E/M.

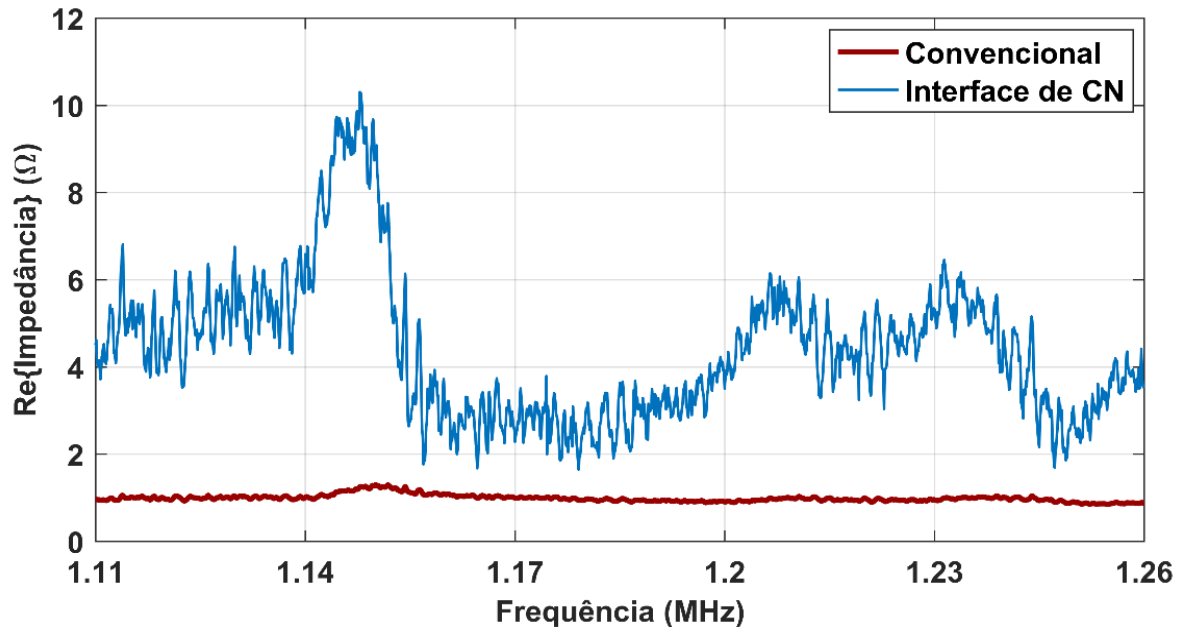
Os benefícios de reduzir a capacitância são os teoricamente analisados neste capítulo, como melhorar o acoplamento eletromecânico e a sensibilidade a danos estruturais, além de reduzir a corrente elétrica requerida pelo transdutor. Como exemplo, diminuir a capacitância equivalente causa uma mudança significativa nas assinaturas de impedância. Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas as partes reais das assinaturas de impedância elétrica obtidas para ambas as condições, com e sem a interface de CN, para faixas de frequência de 55 kHz - 70 kHz (baixa frequência) e 1,11 MHz - 1,26 MHz (alta frequência), respectivamente. Embora a interface de CN tenha sido caracterizada para uma ampla faixa de frequência de 50 kHz a 2 MHz, são apresentadas faixas estreitas para uma comparação apropriada entre as duas condições.

Figura 7 – Impedâncias elétricas para o método convencional e com uso da interface de capacitância negativa, entre 55 kHz e 70 kHz



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 – Impedâncias elétricas para o método convencional e com uso da interface de capacitância negativa, entre 1,11 MHz e 1,26 MHz

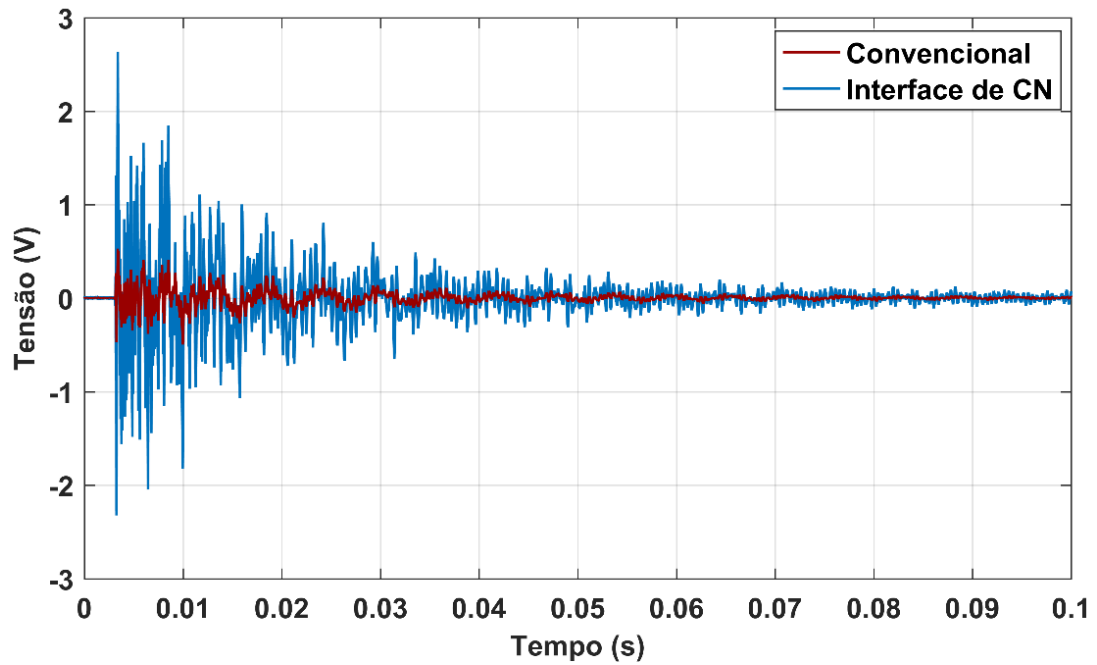


Fonte: Autoria própria.

Como mostrado nas Figuras 7 e 8, para ambas as faixas de baixa e alta frequência, as assinaturas obtidas utilizando a interface de capacitância negativa mostram maior amplitude do que as assinaturas obtidas usando apenas o transdutor piezelétrico. No entanto, vale ressaltar que o comportamento das assinaturas e as variações, como picos de ressonância, ocorrem nas mesmas regiões de frequência. Esse resultado indica que o uso da interface de CN torna as variações nos picos de ressonância mais significativas, tornando essa abordagem mais sensível para detectar danos estruturais ou alterações mecânicas na estrutura. Os próximos resultados confirmam essa conjectura.

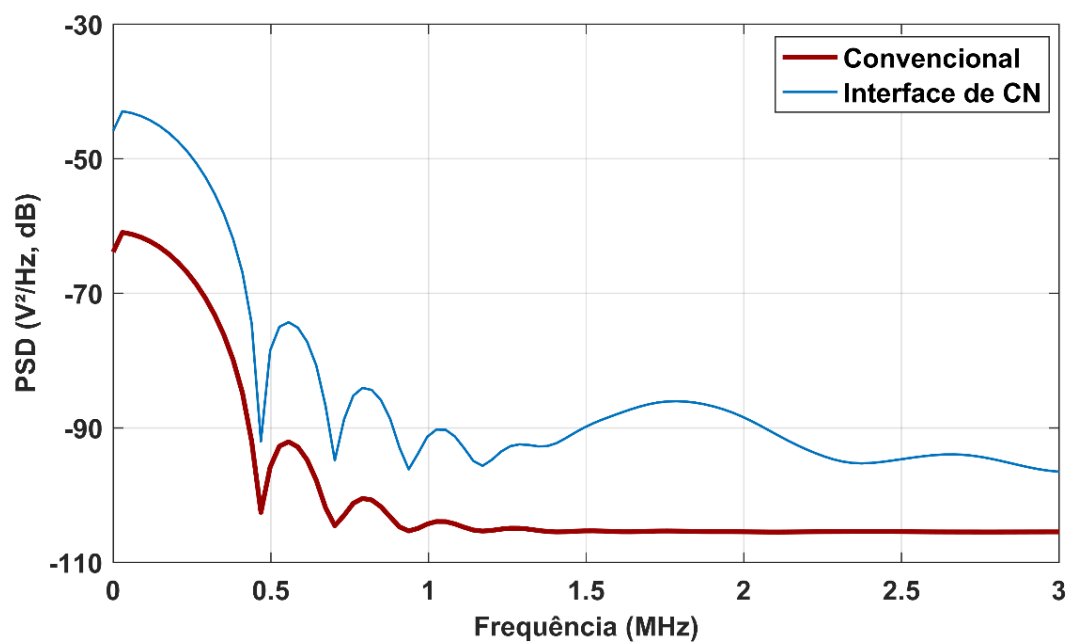
Como mencionado anteriormente, o teste PLB permite avaliar a sensibilidade do transdutor piezelétrico. Os sinais de resposta do transdutor devido à quebra do grafite nas duas condições, com e sem a interface de CN, são mostrados na Figura 9, e as PSDs correspondentes são mostrados na Figura 10. Deve-se notar que as curvas de PSD foram obtidas pela média de 5 medições.

Figura 9 – Sinais obtidos com o método convencional e com uso da interface de capacitância negativa



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Sinais de PSD obtidos para o método convencional e com uso da interface de capacitância negativa



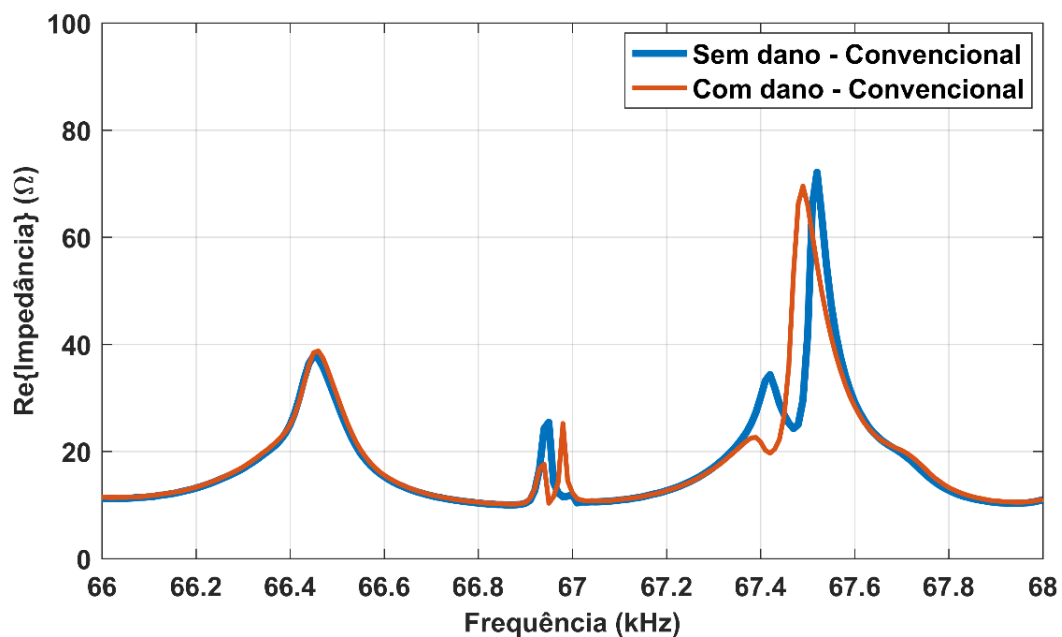
Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostram que a interface de CN melhora significativamente a resposta do transdutor. No sinal de resposta no domínio do tempo, mostrado na Figura 9, o valor do pico é próximo de 3 V utilizando-se capacitância negativa, enquanto no transdutor convencional, o pico é de apenas aproximadamente 0,5 V. Na resposta no domínio da frequência, mostrada na Figura 10, a diferença entre as duas PSDs é de aproximadamente 20 dB. Para altas frequências, acima de 1,5 MHz, o uso de capacitância negativa mostra sensibilidade não observável sem seu uso.

Este resultado experimental converge com o resultado teórico apresentado na Figura 4 e a melhoria nas assinaturas de impedância observadas nas Figuras 7 e 8. Portanto, os resultados indicam que a interface de capacitância negativa pode melhorar a sensibilidade do transdutor para detecção de variações ou danos estruturais, conforme mostrado nos próximos resultados desta seção.

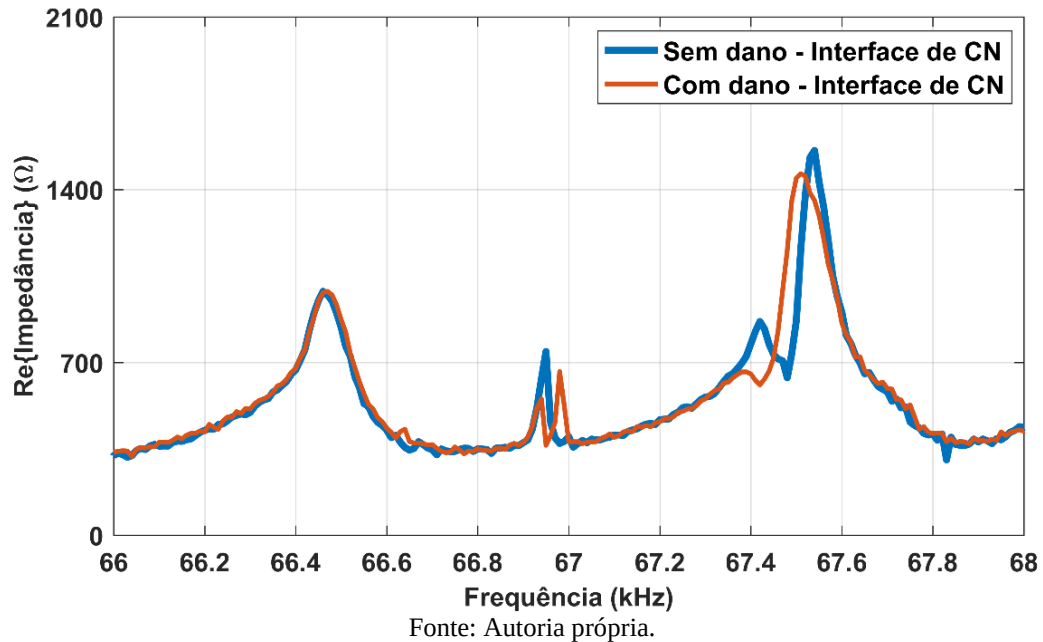
Conforme descrito na Seção 3.1, um pequeno orifício correspondente a apenas 0,0093% de variação de massa foi perfurado na estrutura para simular danos pequenos. As partes reais das assinaturas de impedância elétrica obtidas na faixa de baixa frequência para a configuração convencional e aquela utilizando a interface de CN são mostradas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Embora uma banda larga de 55 kHz - 70 kHz tenha sido analisada, uma banda estreita é exibida para garantir uma comparação satisfatória.

Figura 11 – Impedâncias elétricas para a estrutura sem e com dano, obtidas com método convencional, entre 66 kHz e 68 kHz



Fonte: Autoria própria.

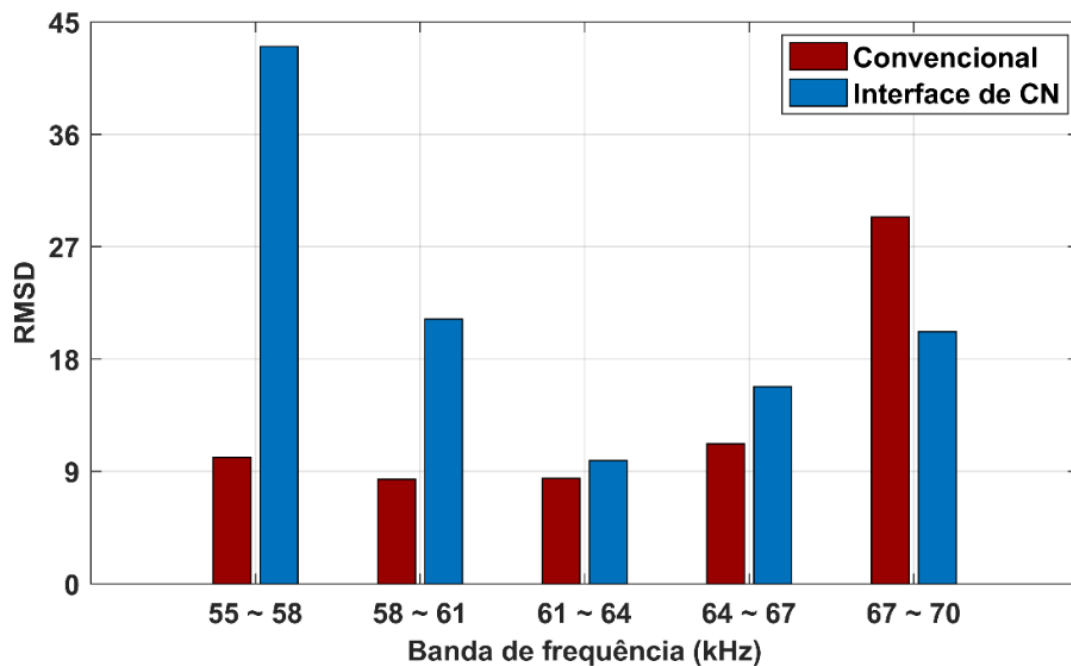
Figura 12 – Impedâncias elétricas para a estrutura sem e com dano, obtidas com a interface de capacitância negativa, entre 66 kHz e 68 kHz



Os comportamentos das assinaturas de impedância obtidas para ambas as condições (com e sem o uso da interface de capacitância negativa) são semelhantes, indicando que a capacitância negativa não altera a análise correta das condições estruturais, mas melhora o acoplamento eletromecânico e a sensibilidade a variações estruturais como danos quaisquer. Como mostrado na Figura 12, o uso da interface de CN torna as amplitudes das variações mais significativas, com picos próximos a 1600 Ω na faixa exibida, enquanto no método convencional, apresentado na Figura 11, os picos são inferiores a 80 Ω . Além disso, variações extras são observadas entre as condições estruturais consideradas íntegras e danificadas, que não foram detectadas sem o uso da interface de CN, indicando claramente uma melhora na sensibilidade a danos estruturais.

A sensibilidade ao dano pode ser analisada quantitativamente calculando-se o índice RMSD, apresentado na Equação (10). O índice RMSD foi calculado em sub-bandas de 3 kHz, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Índices RMSD calculados para o método convencional e com a interface de capacitância negativa, entre 55 kHz e 70 kHz

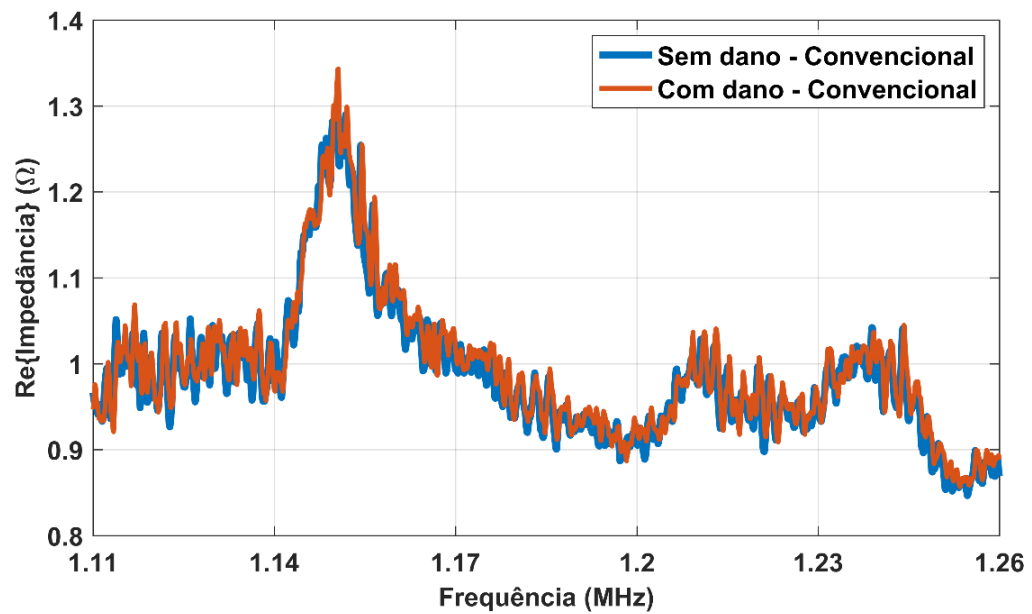


Fonte: Autoria própria.

Como mostrado na Figura 13, o índice RMSD obtido para as curvas com o uso da capacitância negativa foi maior para todas as sub-bandas de frequência, exceto para a sub-banda de 67 - 70 kHz. Essa inversão de comportamento visualizada na sub-banda de 67 a 70 kHz deve ser analisada mais profundamente, possivelmente em futuros trabalhos, para um melhor entendimento e possível correlação do comportamento observado com frequências de ressonância específicas das estruturas monitoradas. Em frequências altas, acima de 1 MHz, a melhora na sensibilidade ao dano foi mais significativa. As assinaturas de impedância obtidas para o transdutor convencional e para as que utilizam a interface de CN são apresentadas a seguir, nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

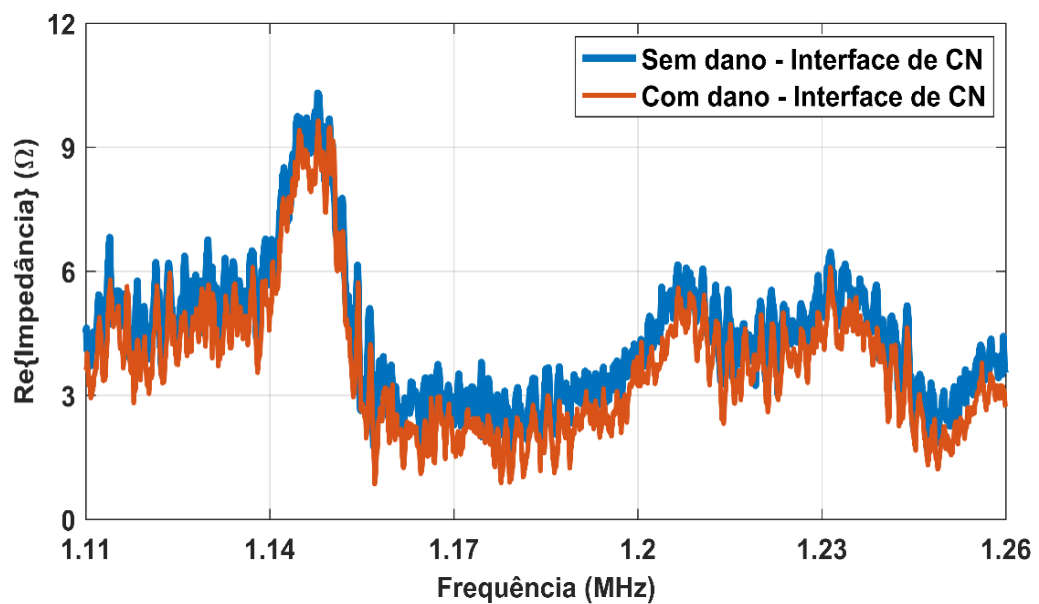
Assim como nas frequências mais baixas, os comportamentos das assinaturas obtidas com e sem capacitância negativa são semelhantes, preservando as mesmas tendências. No entanto, o uso da interface de CN torna as assinaturas de impedância elétrica referentes à estrutura íntegra e danificada mais distinguíveis, como mostrado na Figura 15. Em contraste, as assinaturas de impedância elétrica referentes à estrutura íntegra e danificada obtidas pelo transdutor na configuração convencional praticamente se sobrepõem, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Impedâncias elétricas para a estrutura sem e com dano, obtidas com método convencional, entre 1,11 MHz e 1,26 MHz



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Impedâncias elétricas para a estrutura sem e com dano, obtidas com a interface de capacitância negativa, entre 1,11 MHz e 1,26 MHz

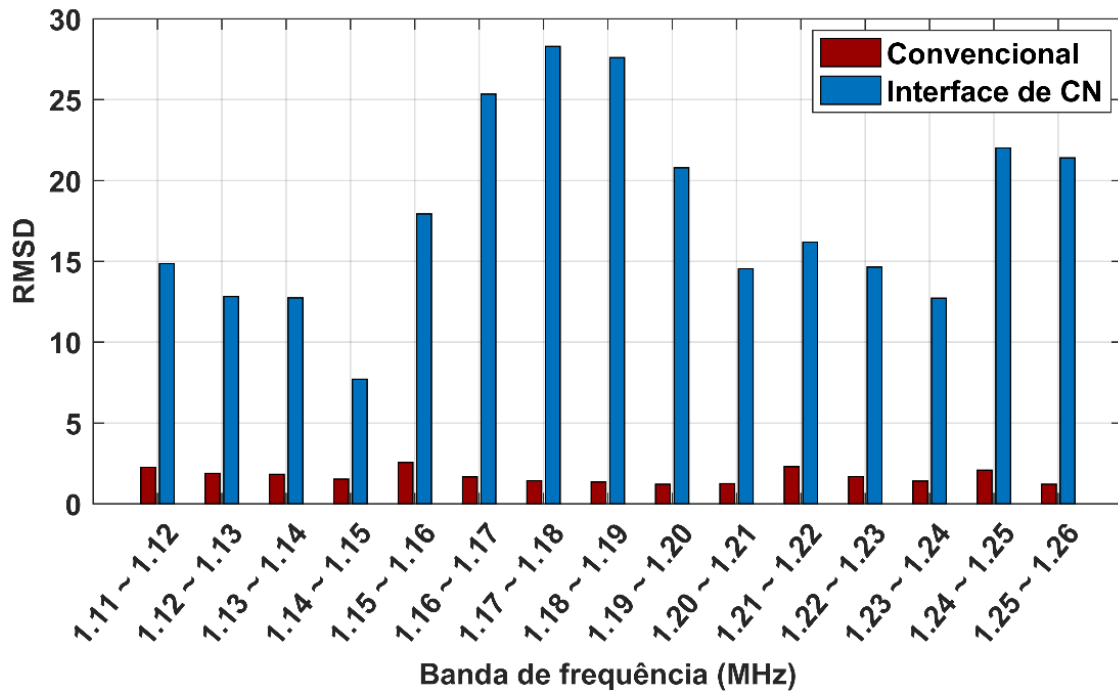


Fonte: Autoria própria.

Portanto, a interface de CN torna o transdutor significativamente mais sensível a danos

estruturais ou outros tipos de variação, como pode ser quantitativamente verificado pelos índices RMSD calculados para sub-bandas de 10 kHz, apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Índices RMSD calculados para o método convencional e com a interface de capacitância negativa, entre 1,11 MHz e 1,26 MHz

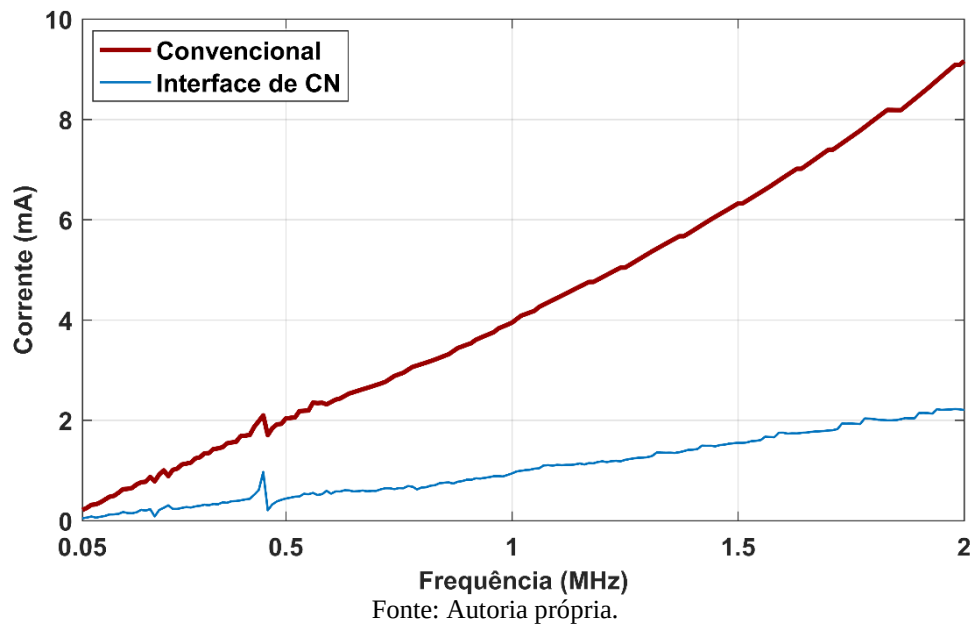


Fonte: Autoria própria.

De acordo com o apresentado na Figura 16, os índices RMSD obtidos com a interface de capacitância negativa são significativamente mais altos em todas as bandas de frequência analisadas. A diferença em algumas sub-bandas é de aproximadamente 1900%. Este resultado experimental combina bem com a análise teórica apresentada na Seção 3, indicando a eficácia do uso da interface de capacitância negativa para melhorar a sensibilidade a danos estruturais, especialmente em altas frequências.

Além da maior sensibilidade às variações estruturais em baixa e alta frequência, a redução da capacitância equivalente do sistema tem outro benefício, que é reduzir a corrente de excitação necessária do sistema de medição. Na Figura 17, apresenta-se a corrente elétrica eficaz exigida pelo transdutor em função da frequência para a configuração convencional e para a interface de CN.

Figura 17 – Correntes de excitação para o método convencional e com a interface de capacitância negativa, entre 50 kHz e 2 MHz



Na configuração convencional, a corrente requerida pelo transdutor aumenta com a frequência para um máximo de 9,5 mA para uma frequência de 2 MHz. Por outro lado, utilizando a interface de CN, a corrente é reduzida para apenas 2,2 mA na mesma frequência e esse resultado representa uma economia de aproximadamente 77%. Embora uma corrente da ordem de miliamperes possa parecer baixa em muitas aplicações, essa redução pode ser importante em sistemas de monitoramento autônomo, especialmente aqueles com múltiplos transdutores. Normalmente, sistemas de medição alternativos e autônomos têm corrente de saída baixa. Apesar dessa melhora na corrente de excitação, é importante notar que a interface de CN requer consumo de energia adicional, que depende do amplificador operacional utilizado.

Portanto, os resultados experimentais confirmam as conjecturas apontadas na análise teórica, indicando a efetividade da interface de CN na detecção de danos estruturais por impedância. Reduções na capacitância equivalente e excitação de corrente requerida e sensibilidade aprimorada a danos estruturais foram claramente observadas.

Capítulo 4

Amplitude e Duração do Sinal de Excitação

Como já dito e apresentado nos capítulos anteriores, embora a análise em alta frequência possa proporcionar análises mais minuciosas das condições estruturais, a característica capacitiva dos transdutores piezelétricos torna essas medições um desafio, já que sua reatância capacitiva se torna muito baixa em altas frequências, limitando as variações na impedância elétrica que sejam ocasionadas por modificações estruturais.

Além da solução utilizando a interface de capacitância negativa, apresentada no Capítulo 3, outra possibilidade de se atingir resultados satisfatórios mesmo que em frequências acima de 1 MHz é a aplicação de um sinal de excitação com maior amplitude ou com maior duração, permitindo que a estrutura tenha mais tempo ou maior estímulo em cada frequência analisada e, portanto, possa vibrar adequadamente nesta região. Portanto, este trabalho também apresenta resultados experimentais que possibilitam o monitoramento de integridade estrutural utilizando-se a técnica da impedância E/M em baixas e altas frequência (acima de 1 MHz) calibrando-se apenas dois parâmetros dos sinais de excitação, a amplitude e o tempo de excitação para cada frequência da banda de varredura (BUDOYA; BAPTISTA, 2018; SAFAEI; NOLAN; ANTON, 2019). Por tratar-se de uma região de análise nova para a técnica da impedância E/M, foram analisadas três estruturas de diferentes dimensões com o intuito de verificar como essas estruturas comportam-se nessas regiões de frequência e se há algum tipo de relação entre os parâmetros de excitação e o tamanho da estrutura sob teste.

O incremento dos valores de amplitude dos sinais de excitação causa uma melhoria na relação sinal-ruído do sistema e, conseqüentemente, as variações estruturais tornam-se mais diferenciáveis quando as curvas de impedância são comparadas entre si. Além disso, principalmente para os sistemas com sinais de excitação senoidais, há a necessidade de um tempo mínimo de excitação para cada frequência que compõe o sinal de varredura, para que o comportamento estrutural seja refletido fidedignamente nas curvas de impedância obtidas dos transdutores piezelétricos acoplados à estrutura sob análise (BUDOYA; BAPTISTA, 2018). Para que se tenha um melhor entendimento e embasamento teórico para os resultados experimentais que são apresentados neste capítulo, também foi brevemente estudado o comportamento dinâmico das estruturas por meio de simulações no software *ABAQUS Student Edition*. No entanto, por tratar-se de uma versão gratuita do programa, há diversas limitações

no seu uso e os testes foram feitos somente em baixa frequência, mas conforme foi apresentado, está de acordo com o verificado pelos testes experimentais. Os resultados das simulações estão no Apêndice A.

Na sequência, na Seção 4.1, são apresentados os materiais e métodos dos testes experimentais que relacionam a capacidade de detecção de danos estruturais em baixa e alta frequência (acima de 1 MHz) quando são alteradas duas variáveis dos sinais de excitação dos transdutores piezelétricos acoplados a três estruturas de diferentes tamanhos. Esses parâmetros são a amplitude do sinal de excitação e a duração do mesmo para diferentes valores de frequência dentro da banda de varredura do sinal desejado. Por fim, na Seção 4.2, são apresentados os resultados.

4.1 Materiais e Métodos

Os testes foram realizados em três estruturas de alumínio com as seguintes dimensões:

- **Estrutura 1:** 100 cm × 5 cm × 0,2 cm;
- **Estrutura 2:** 100 cm × 10 cm × 0,2 cm;
- **Estrutura 3:** 100 cm × 25 cm × 0,2 cm.

Como transdutor piezelétrico, foi utilizado um diafragma piezelétrico com as seguintes características: base de latão com 20 mm de diâmetro e 0,20 mm de espessura, e elemento ativo com 14 mm de diâmetro e 0,22 mm de espessura. O diafragma foi acoplado à estrutura com adesivo à base de cianoacrilato, com o centro a 3 cm de uma extremidade da barra de alumínio.

Para os testes desta etapa, foi utilizado o sistema de medição de impedância elétrica com sinais de excitação senoidais, projetado no software *LabVIEW*, e o componente utilizado para o divisor de tensão foi um resistor de 100 Ω (BAPTISTA; FILHO, 2009). Para as medições, foram utilizados os módulos NI PXIe-5413, que é um gerador de formas de onda arbitrárias de 16 bits, e o NI PXIe-5105, que é uma placa de osciloscópio de 12 bits com largura de banda de 60 MHz. Por limitações do gerador de onda, foi utilizado ainda um amplificador baseado no chip ADA4870, da *Analog Devices*, para suprir a demanda de corrente. Para todos os testes desta etapa, foi utilizado 60 MHz como taxa de amostragem e os cálculos de impedância foram realizados com base nas DFTs das 20 mil amostras obtidas na parte final dos sinais de excitação e resposta. São utilizadas as amostras finais dos sinais tanto de excitação como de resposta pois

os sistemas senoidais possuem uma etapa de excitação utilizada para atingir a estabilização comportamental da estrutura, que são os chamados Ciclos de Tempo de Estabilização ou então somente Ciclos de Estabilização, que é, inclusive, um dos parâmetros que foram investigados nos testes descritos a seguir.

A primeira parte dos testes experimentais visou avaliar a repetição entre os valores dos picos de determinada região de ressonância da estrutura de acordo com as configurações diferentes dos sinais de excitação, como a amplitude do sinal e a quantidade de ciclos de estabilização que foram utilizados. Para isso, foram calculados, então, os coeficientes de variação dos pontos máximos obtidos nas curvas de cada configuração. Nesta etapa, foram obtidas 100 medições para cada combinação de configuração entre amplitude do sinal de excitação e ciclos de estabilização. Calculou-se, então, a média aritmética e os desvios padrão entre cada conjunto de 100 medições e a relação para a obtenção do coeficiente de variação é apresentada na Equação (11), e é dada por

$$CV(\%) = \frac{s}{\bar{X}} \times 100 \quad (11)$$

em que $\bar{X}$ é a média e s é o desvio padrão dos 100 valores para determinada combinação de teste. As configurações das combinações são apresentadas na Tabela I.

Tabela I - Combinações entre as configurações do sinal de excitação

Combinações (C)		Ciclos de Estabilização				
		0	100	400	1000	2000
Tensão [V]	0,25	C1	C2	C3	C4	C5
	1	C6	C7	C8	C9	C10
	5	C11	C12	C13	C14	C15
	15	C16	C17	C18	C19	C20

De acordo com a Tabela I, a combinação C1 indica que o sinal de excitação foi configurado com 0 ciclos de estabilização e amplitude de 0,25 V, e assim por diante para as demais combinações. Vale ressaltar, novamente, que para cada uma das combinações (C1 a C20) foram obtidas 100 medições de impedância e, para o cálculo do coeficiente de variação (CV), foram utilizadas as médias e desvio padrão de cada grupo dessas 100 medições. Este teste foi realizado para as três estruturas, tanto em baixa quanto em alta frequência.

Os pontos escolhidos foram os referentes aos maiores picos de ressonância em suas respectivas regiões de frequência. Vale ressaltar ainda que cada estrutura apresentou tais picos de ressonância em diferentes frequências e, portanto, as medições foram ajustadas de acordo com a necessidade. Além disso, os picos de ressonância se apresentaram em frequências distintas e com amplitudes diferentes para cada configuração (C1 a C20) utilizada, ainda que se tratando da mesma estrutura. As medições também foram ajustadas a essas condições de modo a sempre obter o maior valor do pico de ressonância de cada estrutura sob cada combinação utilizada nos sinais de excitação. Dessa forma, apresenta-se na Tabela II, os valores de frequência em que foram obtidos os picos de ressonância para cada estrutura. Como explicado, esses valores de frequência são aproximados e não são os mesmos para todas as combinações.

Tabela II – Valores aproximados das frequências de análise para cada estrutura

	Baixa Frequência (Hz)	Alta Frequência (Hz)
Estrutura 1	53500	1080900
Estrutura 2	40300	1035500
Estrutura 3	34550	1038600

A segunda e última parte dos testes experimentais visou apresentar como a variação desses parâmetros (tensão de excitação e Ciclos de Estabilização) pode interferir diretamente na capacidade de detecção de danos estruturais em sistemas de monitoramento baseados na técnica da impedância E/M. Esta etapa também foi realizada em baixa e alta frequência, para as três estruturas. Assim como para a etapa anterior, cada estrutura foi excitada numa faixa de frequência diferente, em regiões em que os picos de ressonância fossem maiores e mais evidentes. Para todas as configurações e bandas de frequência, foram obtidas 2 medições de impedância para a estrutura sem a ocorrência de dano e 1 medição para a estrutura após a ocorrência de dano. Na Tabela III são apresentadas as bandas de frequência em que cada estrutura foi analisada.

Tabela III – Bandas de frequência adotadas em cada estrutura

	Baixa Frequência (Hz)	Alta Frequência (Hz)
Estrutura 1	50000 ~ 60000	1000000 ~ 1100000
Estrutura 2	35000 ~ 45000	1000000 ~ 1100000

Estrutura 3	30000 ~ 40000	1000000 ~ 1100000
--------------------	---------------	-------------------

Como dano estrutural, foi utilizada uma porca de aço com dimensões de 6 mm × 3 mm, que foi fixada às estruturas com adesivo a base de cianoacrilato, a 10 cm de distância do centro do diafragma piezelétrico. É importante ressaltar que foi utilizado este método de simulação de dano estrutural, pois como pode ser visualizado na Tabela I, muitas medições foram realizadas por estrutura. Para cada uma, foram 80 medições de impedância realizadas para a estrutura sem danos e mais 40 após a inserção de dano. Levando-se em conta que as medições com muitos ciclos de estabilização precisaram de até aproximadamente 5 minutos, se tivesse sido utilizado como dano um furo, por exemplo, o tempo entre a medição de uma determinada combinação (C1 a C20) sem a presença de danos e sua respectiva medição após a presença de dano seria muito grande, e variações externas quaisquer (barulhos e vibrações externas, alteração de temperatura devido a variações externas mais bruscas no clima, ainda que o ambiente de medição possua controle de temperatura por ar-condicionado, variações no fornecimento de energia e até mesmo estresse por uso prolongado dos equipamentos utilizados) poderiam interferir nos resultados. Sendo assim, esta parte dos testes experimentais foi realizada em etapas para cada estrutura, com intuito de evitar variações externas quaisquer entre as medições sem e com a presença de dano à estrutura.

Para a verificação da ocorrência de dano estrutural, foi utilizado o índice CCDM (do termo em inglês *Correlation Coefficient Deviation Metric*), que é o desvio do coeficiente de correlação, dado por

$$CCDM = 1 - C_C \quad (12)$$

em que C_C é o coeficiente de correlação calculado utilizando-se as partes reais das impedâncias elétricas do transdutor piezelétrico para a estrutura considerada íntegra e após a possível ocorrência de um dano.

Para o cálculo dos índices, foram utilizadas subfaixas de frequência de 2 kHz para a análise em baixa frequência em todas estruturas, e subfaixas de 10 kHz para a análise em alta frequência, também para todas estruturas. Essa diferença no valor da subfaixa utilizada deve-se ao comportamento observado nas assinaturas de impedância nas bandas analisadas, já que acima de 1 MHz as curvas de impedância apresentam poucos picos de ressonância facilmente

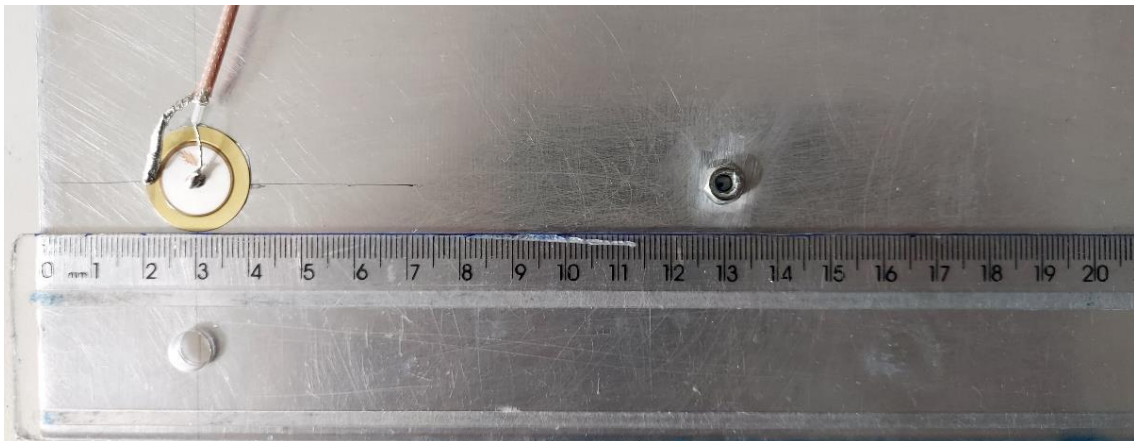
destacáveis. No entanto, para ambas as regiões, o passo de frequência utilizado nos sinais de varredura foi de 10 Hz. Os índices obtidos para as curvas sem e com dano foram normalizados por índices obtidos para duas curvas distintas das estruturas sem danos. Vale enfatizar que estes testes foram realizados para cada uma das combinações apresentadas na Tabela I e para todas estruturas. A montagem experimental pode ser visualizada nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Estruturas utilizadas para os testes experimentais



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Visualização da montagem do diafragma piezelétrico e do dano à estrutura



Fonte: Autoria própria.

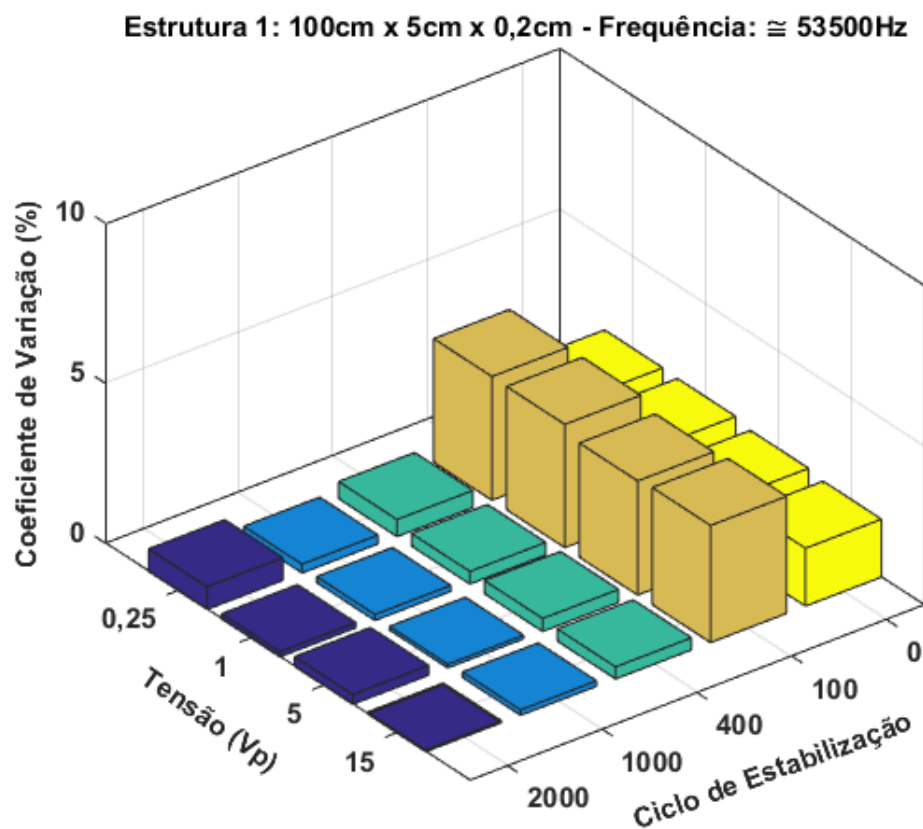
Por fim, para validar os efeitos dos Ciclos de Estabilização visualizados nas assinaturas de impedância elétrica obtidas nos testes experimentais, foram realizadas simulações básicas baseadas no método dos elementos finitos (FEM) no software *ABAQUS* (Student Edition License, 2020). Os resultados dessas simulações são apresentados no Apêndice A, ao final do trabalho. A seguir, na Seção 4.2, são apresentados os resultados obtidos dos testes descritos

nesta seção.

4.2 Resultados

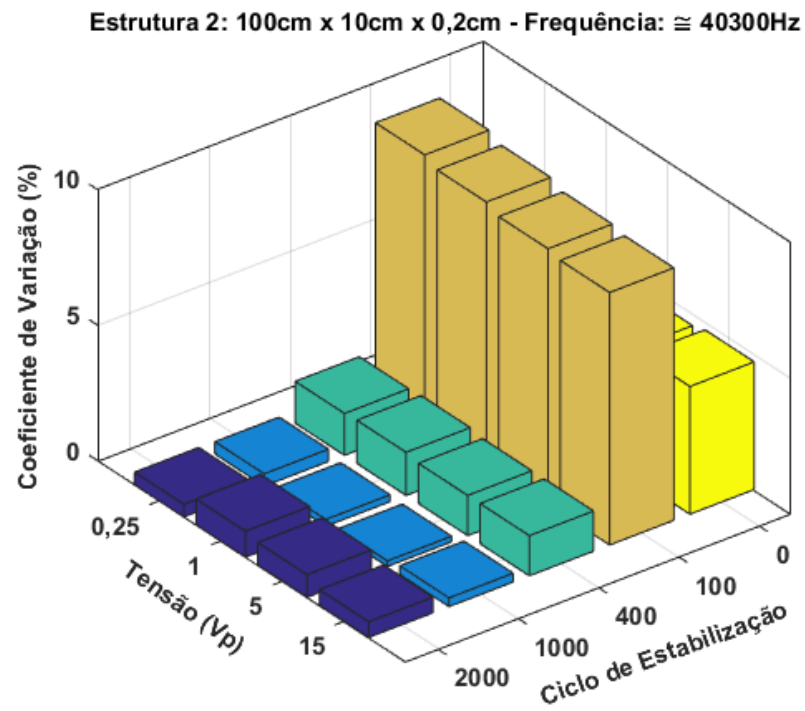
Inicialmente, são apresentados os dados referentes aos testes de repetição, conforme descritos anteriormente. Como foram analisadas duas regiões distintas de frequência para cada estrutura, nesta etapa são apresentados dois gráficos em três dimensões em barras por estrutura, um contendo os valores dos coeficientes de variação para a análise em baixa frequência e o outro em alta frequência. Sendo assim, apresenta-se nas Figuras 20, 21 e 22, respectivamente, os gráficos para as Estruturas 1, 2 e 3 em baixa frequência.

Figura 20 – Coeficientes de variação para a Estrutura 1, obtidos próximos a 53500 Hz



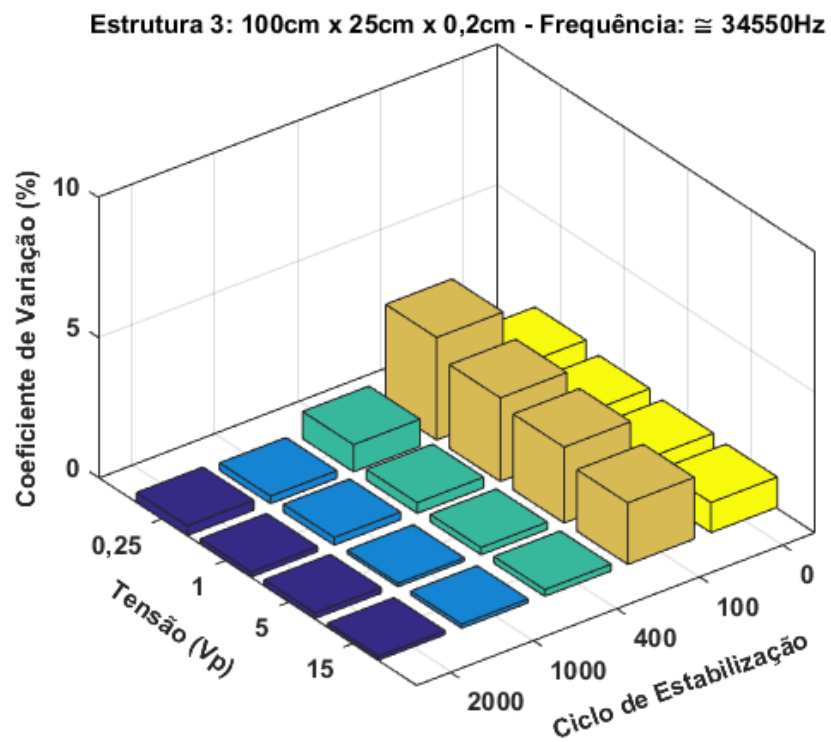
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Coeficientes de variação para a Estrutura 2, obtidos próximos a 40300 Hz



Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Coeficientes de variação para a Estrutura 3, obtidos próximos a 34550 Hz



Fonte: Autoria própria.

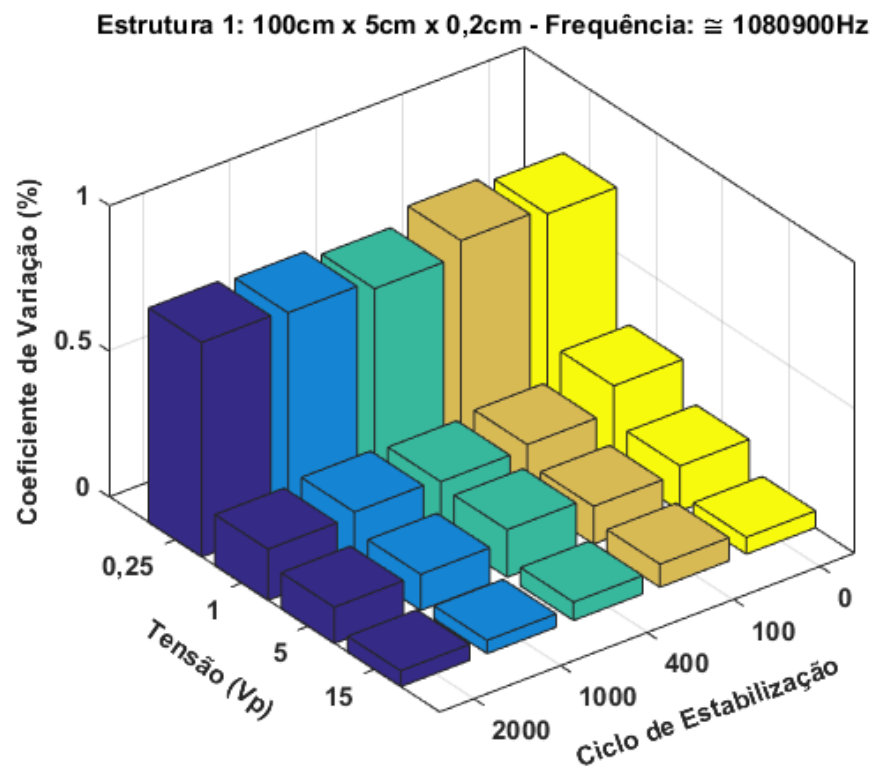
Analisando-se as Figuras 20, 21 e 22, é possível visualizar alguns comportamentos que se repetem, independentemente da estrutura analisada, como por exemplo os valores dos coeficientes de variação serem menores para a configuração em que se utilizou 0 Ciclos de Estabilização do que para a configuração em que foram utilizados 100 Ciclos de Estabilização. Isso deve-se ao simples fato de que com 0 Ciclos de Estabilização, as curvas de impedância elétrica obtidas dos diafragmas piezelétricos não apresentam praticamente nenhum comportamento referente aos picos de ressonância das estruturas, sendo, portanto, curvas contendo basicamente informações da impedância do próprio transdutor. Dessa forma, ao adicionar mais amostras aos sinais de excitação, a estrutura possui mais tempo para vibrar e suas características começam a aparecer. Isso fica mais claro ainda nesta seção, quando as curvas de impedância elétrica para as diferentes configurações da Tabela I, da Seção 4.1, são apresentadas.

De uma forma geral, por serem sistemas operando de forma dinâmica, é difícil que se obtenha comportamentos lineares em relação aos parâmetros analisados, mas ainda assim é possível notar uma clara tendência de melhora dos coeficientes de variação, nesta região de análise de baixas frequências, principalmente quando os Ciclos de Estabilização são incrementados. Deve-se citar também que não houve relação entre os valores dos coeficientes de variação e os tamanhos das estruturas, já que os coeficientes referentes às Estruturas 1 e 3 apresentaram valores próximos e os da Estrutura 2 acabaram sendo os maiores. Por fim, vale notar ainda que variações devido ao incremento de tensão dos sinais de excitação não foram tão evidentes nos coeficientes de variação para esta região de análise, sendo possível notar alguma tendência de melhora apenas para os índices da Estrutura 3, apresentados na Figura 22.

Na sequência, são apresentados nas Figuras 23, 24 e 25, os coeficientes de variação referentes às medições acima de 1 MHz, respectivamente, para as Estruturas 1, 2 e 3.

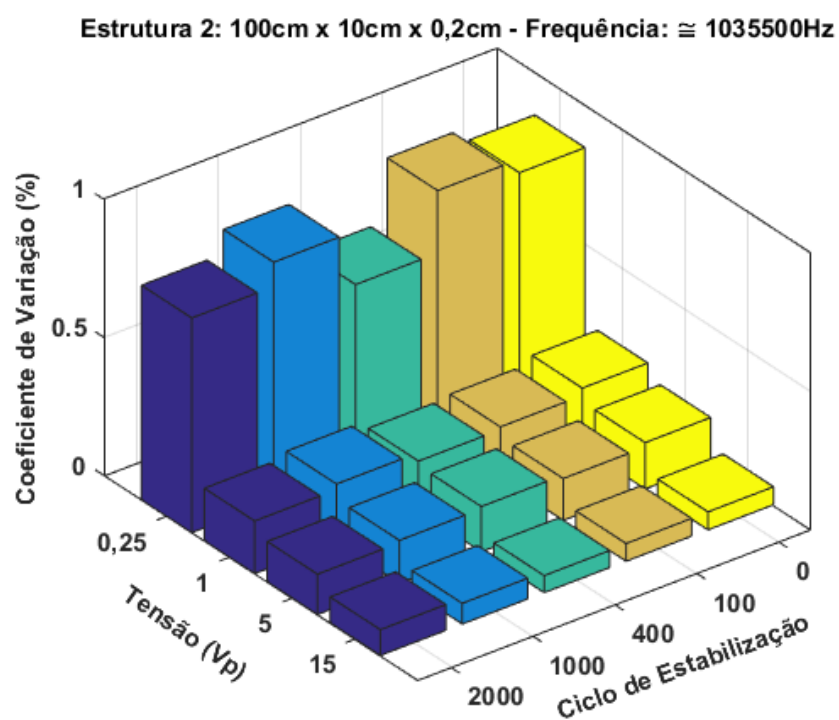
Como pode ser visualizado nas Figuras 23, 24 e 25, e diferentemente do comportamento observado nas Figuras 20, 21 e 22, a tendência de melhora nos coeficientes de variação aconteceu quando houve incremento na tensão dos sinais de excitação, mas teve pouca alteração quando os Ciclos de Estabilização foram variados. Vale ressaltar também que as medições em frequências mais elevadas (acima de 1 MHz) apresentaram maior precisão que as medições em frequências mais baixas, tendo em vista que a maioria das configurações utilizadas apresentou coeficiente de variação abaixo de 0,5%, com os piores casos próximos a 1%, enquanto que as medições em baixas frequências tiveram a maioria dos casos abaixo de 5%, e os piores casos abaixo de 10%, que foram observados para a Estrutura 2, na Figura 21.

Figura 23 – Coeficientes de variação para a Estrutura 1, obtidos próximos a 1080900 Hz



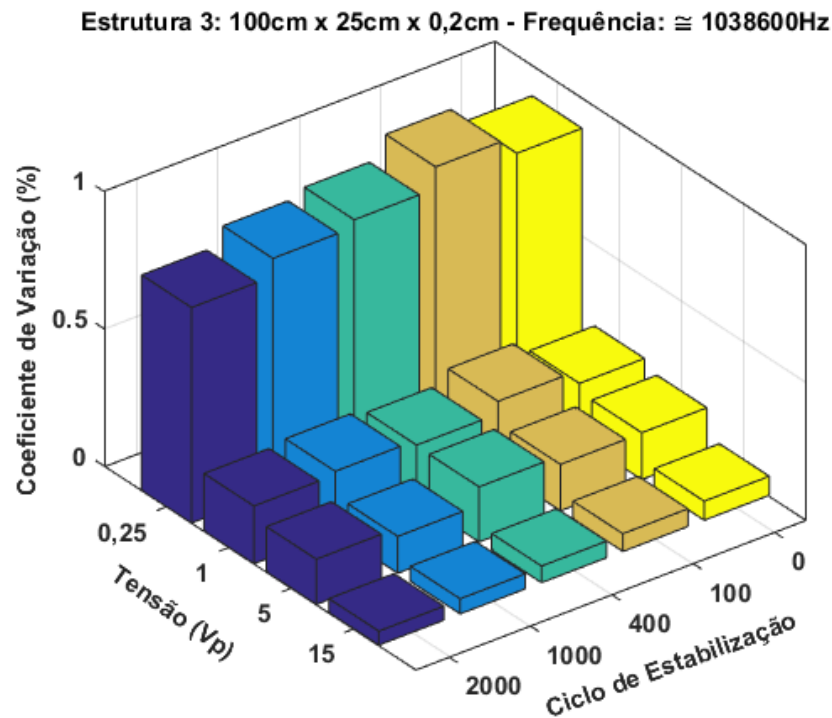
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Coeficientes de variação para a Estrutura 2, obtidos próximos a 1035500 Hz



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Coeficientes de variação para a Estrutura 3, obtidos próximos a 1038600 Hz



Fonte: Autoria própria.

Apesar das variações observadas entre as regiões de frequência analisadas, pode-se afirmar que independentemente da estrutura analisada, se forem utilizadas configurações ideais, ambas as regiões apresentam boa repetição das medições e, conseqüentemente, estariam aptas a detectar variações nas impedâncias elétricas dos diafragmas piezelétricos devido a variações mecânicas nas estruturas.

Na sequência, são apresentados os resultados referentes aos testes envolvendo a capacidade de detecção de danos estruturais em baixa e alta frequência (acima de 1 MHz), para as três estruturas e utilizando todas as combinações de configurações, apresentadas na Tabela I, na Seção 4.1 deste trabalho. Visando apresentar os principais comportamentos sem tornar esta análise excessivamente repetitiva, os gráficos apresentados na sequência seguem a seguinte lógica, utilizando-se como base os resultados apresentados nas Figuras de 20 a 25:

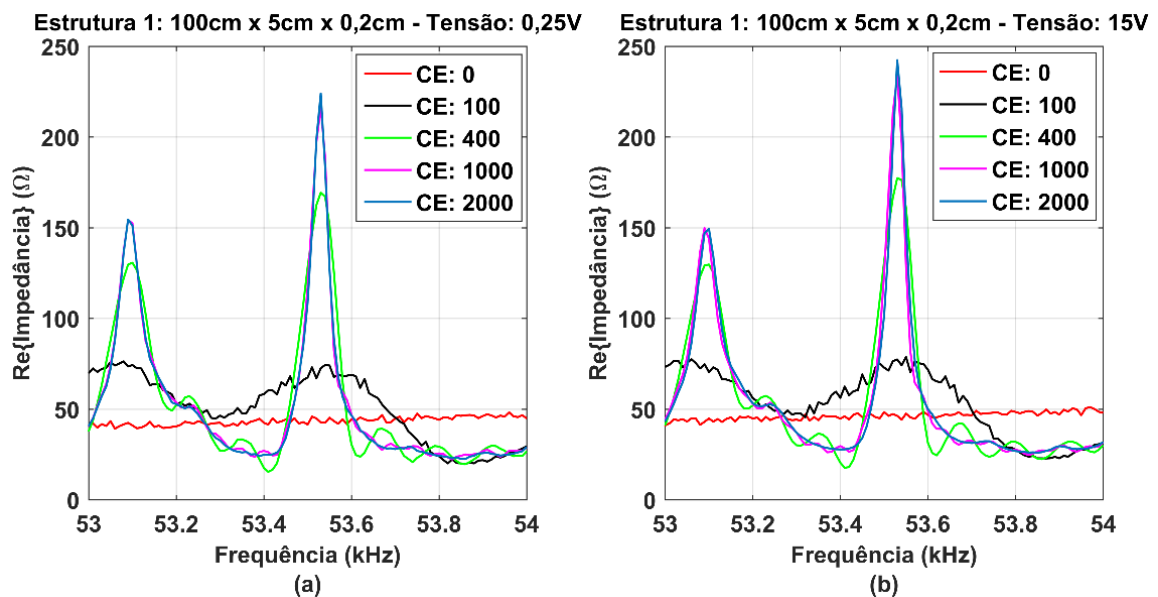
- **Gráficos em baixa frequência (abaixo de 1 MHz):** são apresentados com a finalidade de demonstrar, principalmente, as variações causadas pelo incremento no número dos Ciclos de Estabilização;
- **Gráficos em alta frequência (acima de 1 MHz):** são apresentados com a finalidade de demonstrar, principalmente, as variações causadas pelo incremento na tensão dos sinais

de excitação.

Vale ressaltar que os testes experimentais contemplaram todas as combinações apresentadas na Tabela I, na Seção 4.1, mas apenas alguns dos resultados são apresentados, pois já sintetizam de forma satisfatória os comportamentos que se deseja demonstrar.

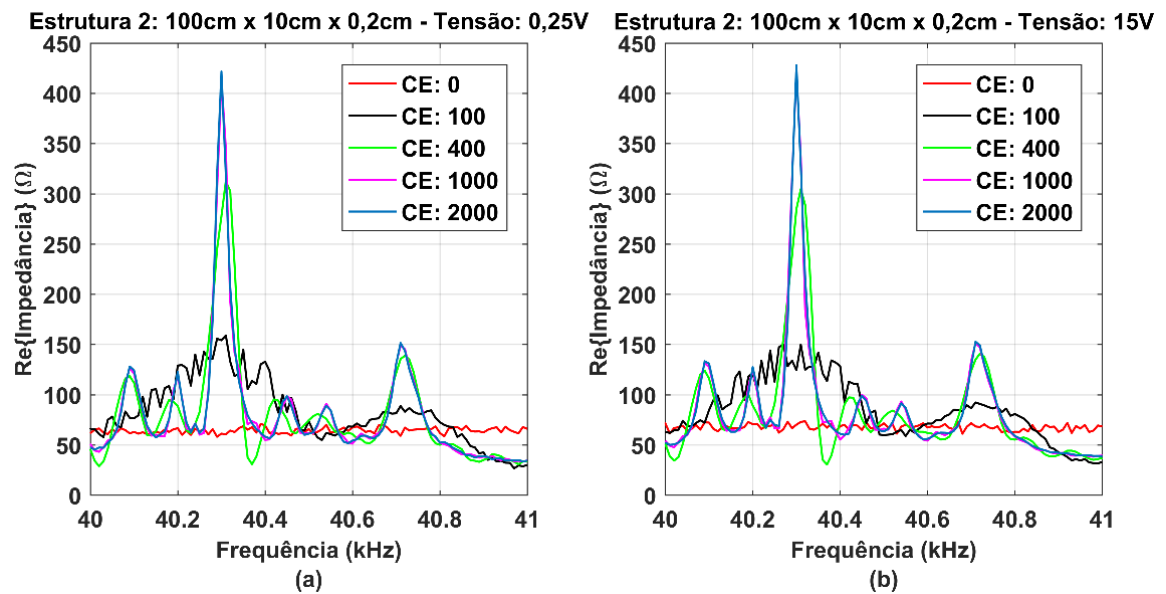
Sendo assim, são apresentadas nas Figuras 26, 27 e 28, respectivamente, as curvas da parte real da impedância elétrica para a condição sem danos das Estruturas 1, 2 e 3. Como dito, são apresentados apenas dois gráficos por estrutura e faixa de frequência analisada, de forma que nos gráficos (a) são apresentadas as curvas com sinal de excitação de 0,25 V e Ciclos de Estabilização diversos e, nos gráficos (b), são apresentadas as curvas com sinal de excitação de 15 V e Ciclos de Estabilização variados. Vale ressaltar que a abreviação “CE” utilizada nas legendas dos gráficos significa “Ciclos de Estabilização”. Além disso, apesar das curvas terem sido obtidas de acordo com as bandas de frequência apresentadas na Tabela III, na Seção 4.1, nas Figuras 26, 27 e 28 apresenta-se apenas uma pequena banda para facilitar a visualização dos efeitos de variação dos parâmetros.

Figura 26 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 1 sem danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 53 kHz e 54 kHz



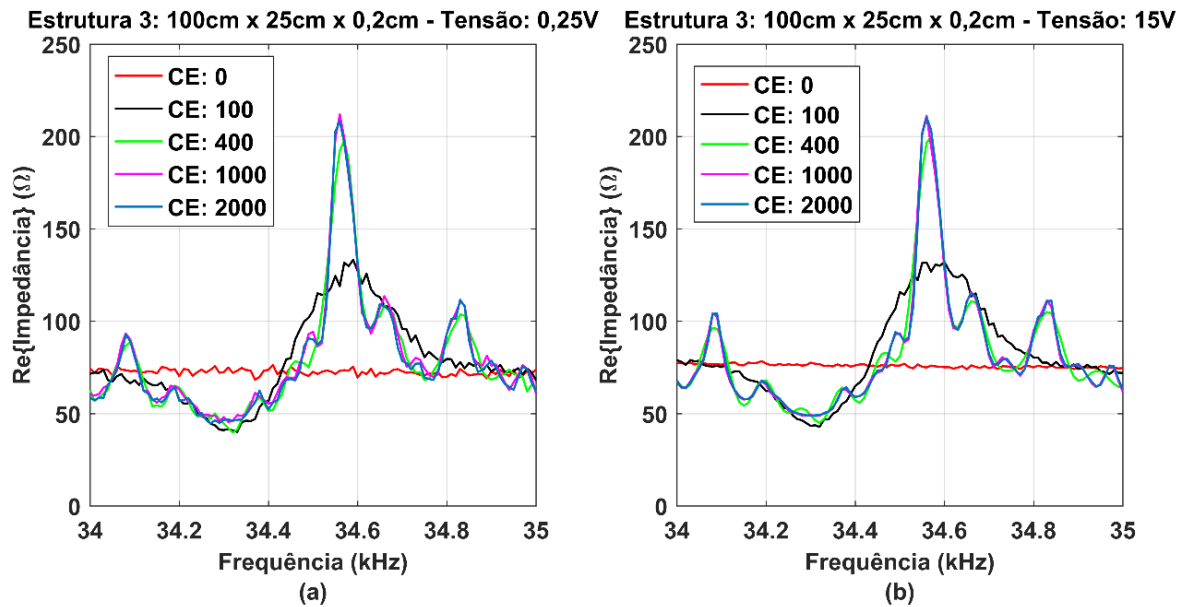
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 2 sem danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 40 kHz e 41 kHz



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 3 sem danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 34 kHz e 35 kHz

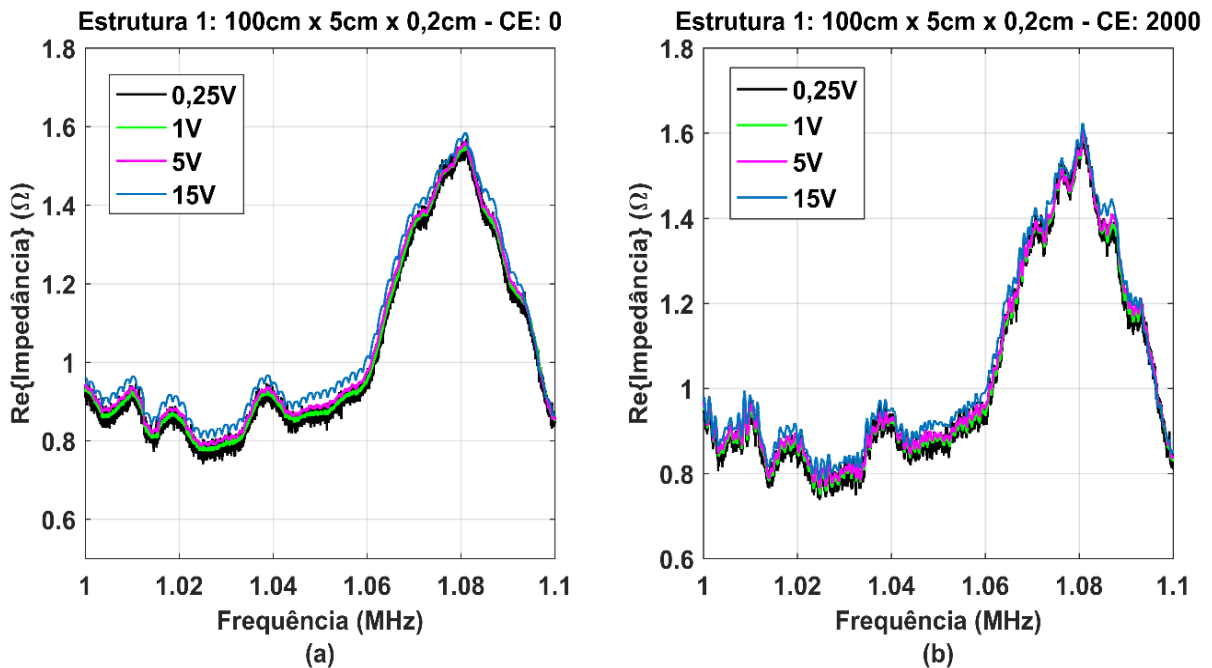


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser facilmente notado nas Figuras 26, 27 e 28, para as três estruturas, as curvas referentes às medições com 0 Ciclos de Estabilização não apresentam quaisquer picos de ressonância, dificultando, portanto, a obtenção de qualquer informação relacionada ao comportamento das estruturas. Tal condição melhora à medida que os Ciclos de Estabilização são incrementados.

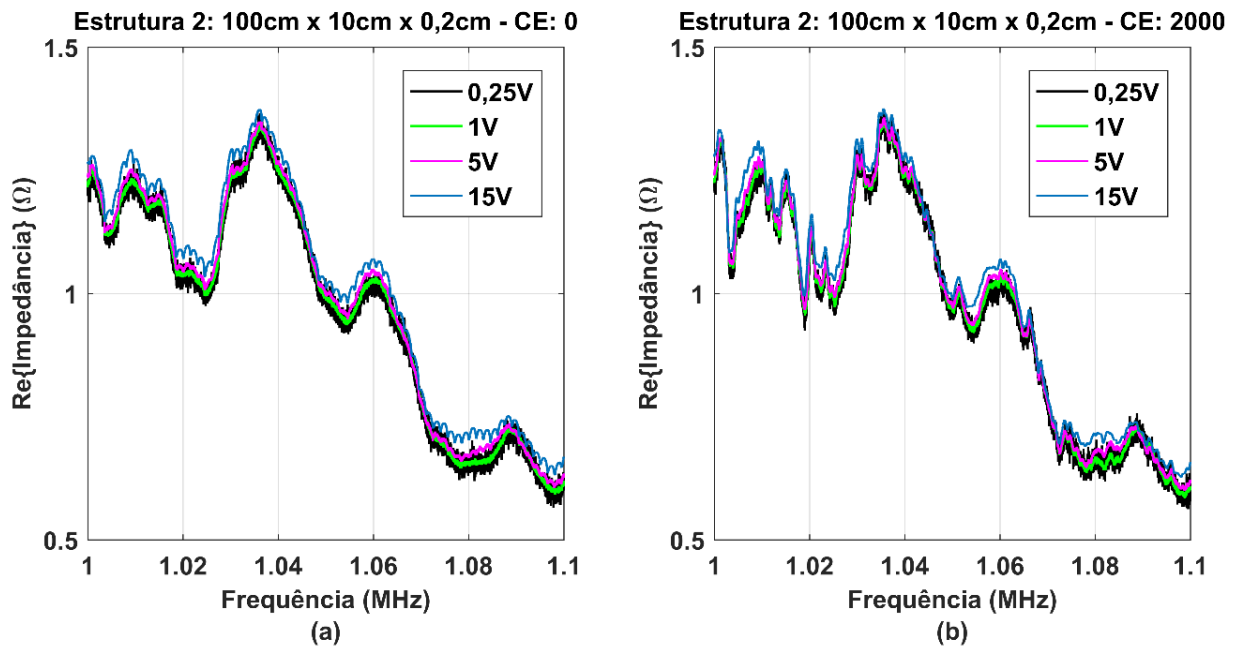
Na sequência, são apresentadas as curvas da parte real da impedância elétrica para a condição sem danos, para as Estruturas 1, 2 e 3, nas bandas de frequência acima de 1 MHz, respectivamente, nas Figuras 29, 30 e 31. Vale ressaltar que nesses gráficos, por estarem em frequências acima de 1 MHz, a intenção é mostrar, principalmente, os efeitos dos incrementos da tensão dos sinais de excitação, conforme já antecipado e, portanto, nos gráficos (a) são apresentadas as curvas com 0 Ciclos de Estabilização e tensões de excitação variadas e, nos gráficos (b), são apresentadas as curvas com 2000 Ciclos de Estabilização e tensões de excitação variadas.

Figura 29 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 1 sem danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz



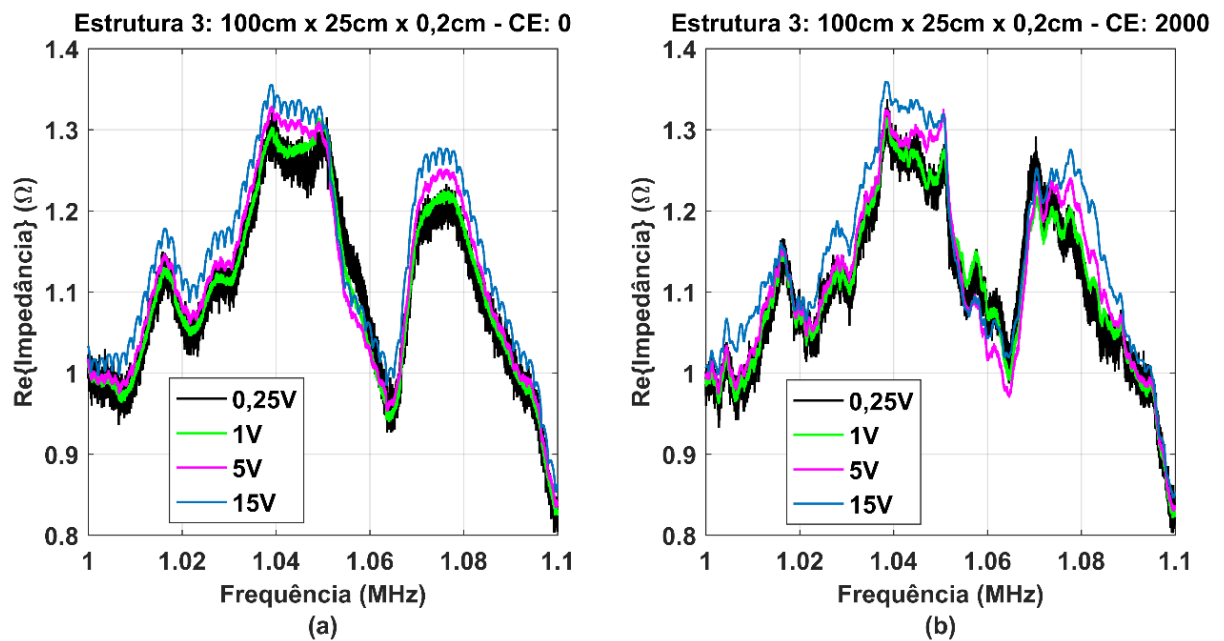
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 2 sem danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 3 sem danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz



Fonte: Autoria própria.

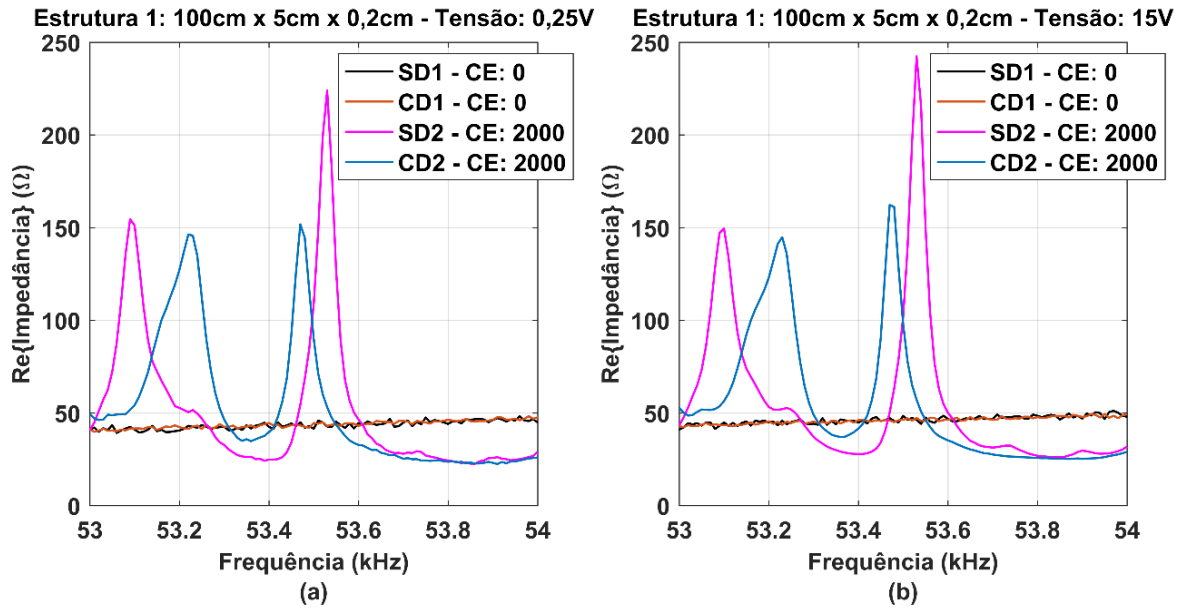
Analisando-se as curvas apresentadas nas Figuras 29, 30 e 31, nota-se que para todas as estruturas, quando há um incremento na tensão de excitação, as curvas apresentam menor variação entre os pontos de medição, tornando as curvas mais “finas”. Isso é importante para poder avaliar de forma mais segura o real comportamento da estrutura. Além disso, comparando-se as curvas dos gráficos (a) e (b), é possível perceber, principalmente, para as curvas com 15 V de tensão de excitação, que os incrementos em números de Ciclos de Estabilização permitem o surgimento de pequenos picos, enquanto que para as curvas com 0 Ciclos de Estabilização, as curvas acabam ficando com inúmeros “picos” arredondados. Nota-se, ainda, ao comparar as curvas das Figuras 29, 30 e 31, que quanto maior a estrutura, mais distantes as curvas com maiores tensões nos sinais de excitação ficam do restante das curvas, podendo ser um sinal de uma melhor obtenção do comportamento estrutural.

A seguir, são apresentadas para as três estruturas e duas regiões de frequência (abaixo e acima de 1 MHz), as curvas da parte real da impedância elétrica para as condições sem e com dano, no intuito de demonstrar como as diferentes configurações impactam na obtenção correta da condição estrutural. Assim como os gráficos anteriores, as figuras contendo informações na baixa frequência privilegiam a visualização dos comportamentos causados pela variação dos Ciclos de Estabilização, enquanto que as que contém informações relativas à alta frequência dão preferência à visualização dos efeitos causados pela variação da tensão dos sinais de excitação. Dessa forma, são apresentadas nas Figuras 32, 33 e 34, respectivamente, as curvas de impedância elétrica referentes às condições sem e com dano para as Estruturas 1, 2 e 3, na baixa frequência.

Vale enfatizar que para as curvas desta etapa do trabalho, também são apresentadas subfaixas distintas daquelas apresentadas na Tabela III, na Seção 4.1, visando uma melhor visualização dos comportamentos. As abreviações “SD” e “CD” significam, respectivamente, “Sem danos” e “Com danos”, e os índices “1” e “2” foram utilizados apenas para atrelar as condições sem e com danos de cada configuração utilizada.

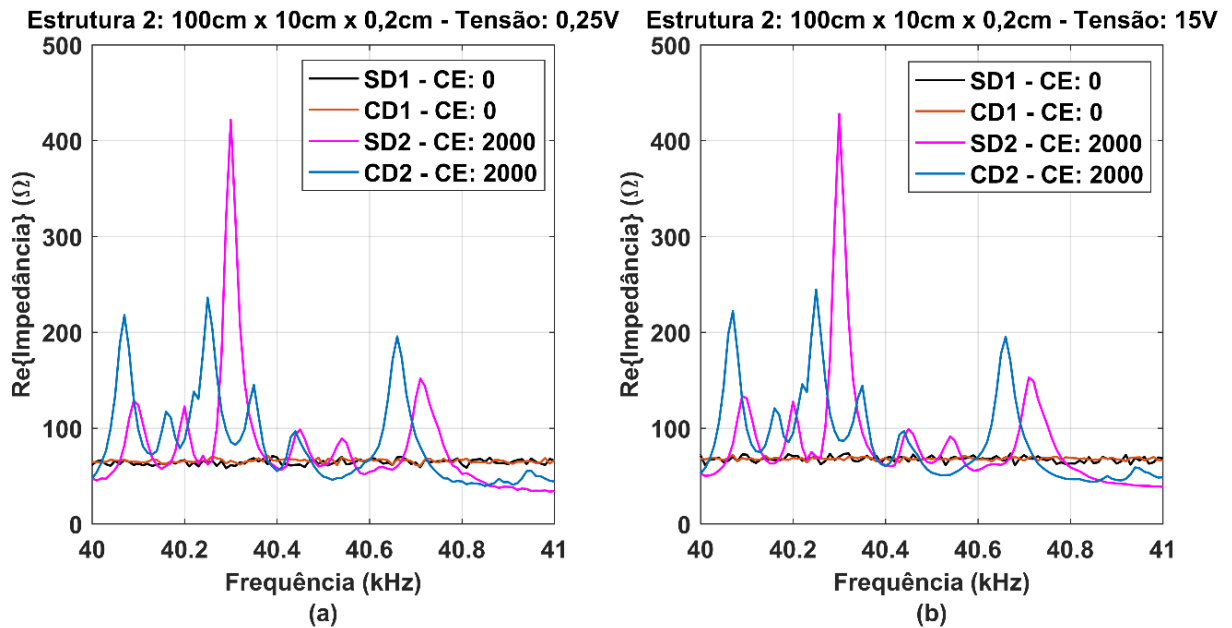
Como esperado, para todas as estruturas, nesta região de frequências mais baixas, as curvas referentes à utilização de 0 Ciclos de Estabilização praticamente inviabilizam a detecção de variações estruturais, como já havia sido comentado em resultados anteriores, enquanto que as curvas obtidas com a utilização de 2000 Ciclos de Estabilização mostram-se completamente aptas a detectar variações estruturais.

Figura 32 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 1 sem e com danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 53 kHz e 54 kHz



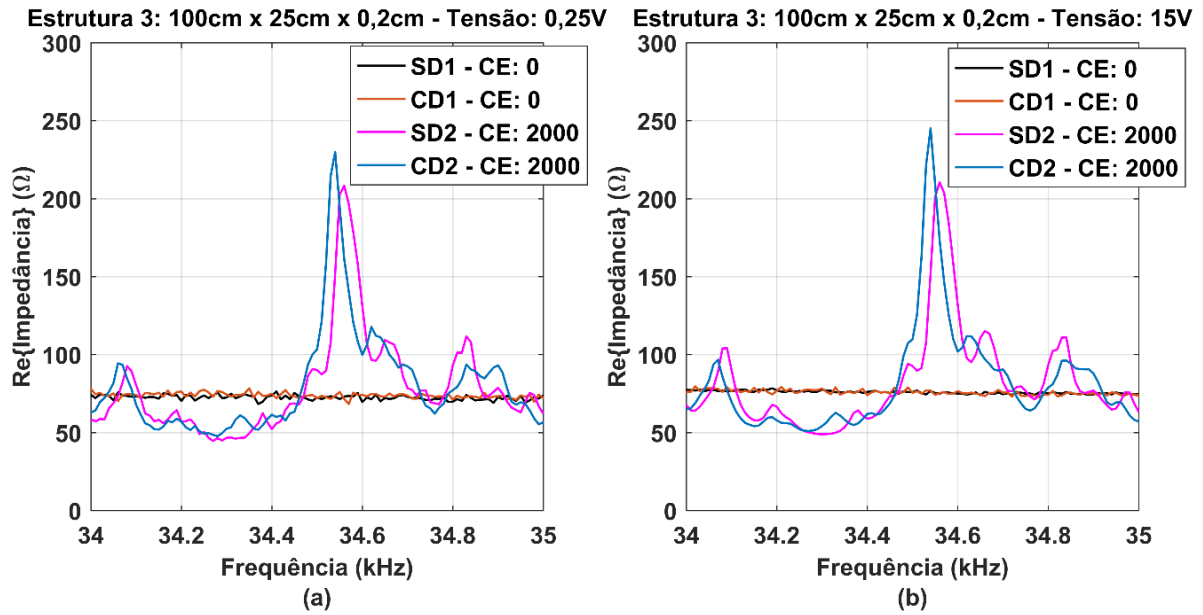
Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 2 sem e com danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 40 kHz e 41 kHz



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 3 sem e com danos, obtidas com amplitude de excitação de (a) 0,25 V e (b) 15 V, entre 34 kHz e 35 kHz

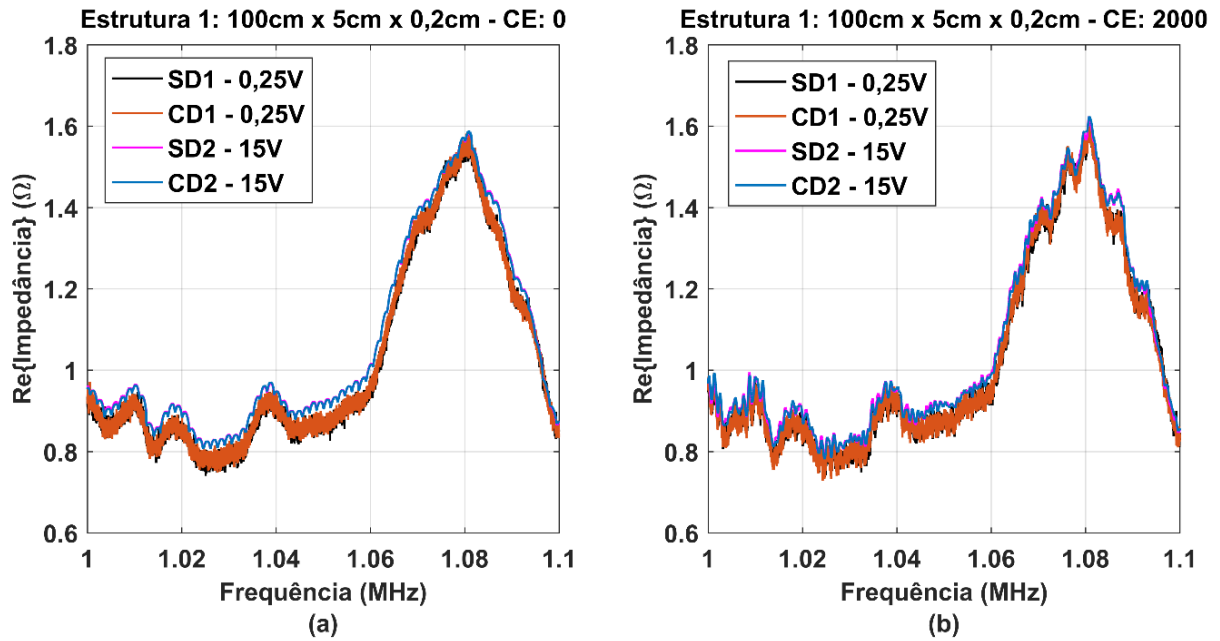


Fonte: Autoria própria.

A seguir, nas Figuras 35, 36 e 37, são apresentadas, respectivamente, as curvas de impedância elétrica referentes às condições sem e com dano para as Estruturas 1, 2 e 3, na alta frequência. Como já explicado, nesta região de frequência optou-se por visualizar, principalmente, os comportamentos quando são variadas as tensões dos sinais de excitação. Portanto, os gráficos (a) são referentes às curvas utilizando 0 Ciclos de Estabilização e os gráficos (b) são referentes às curvas que utilizam 2000 Ciclos de Estabilização.

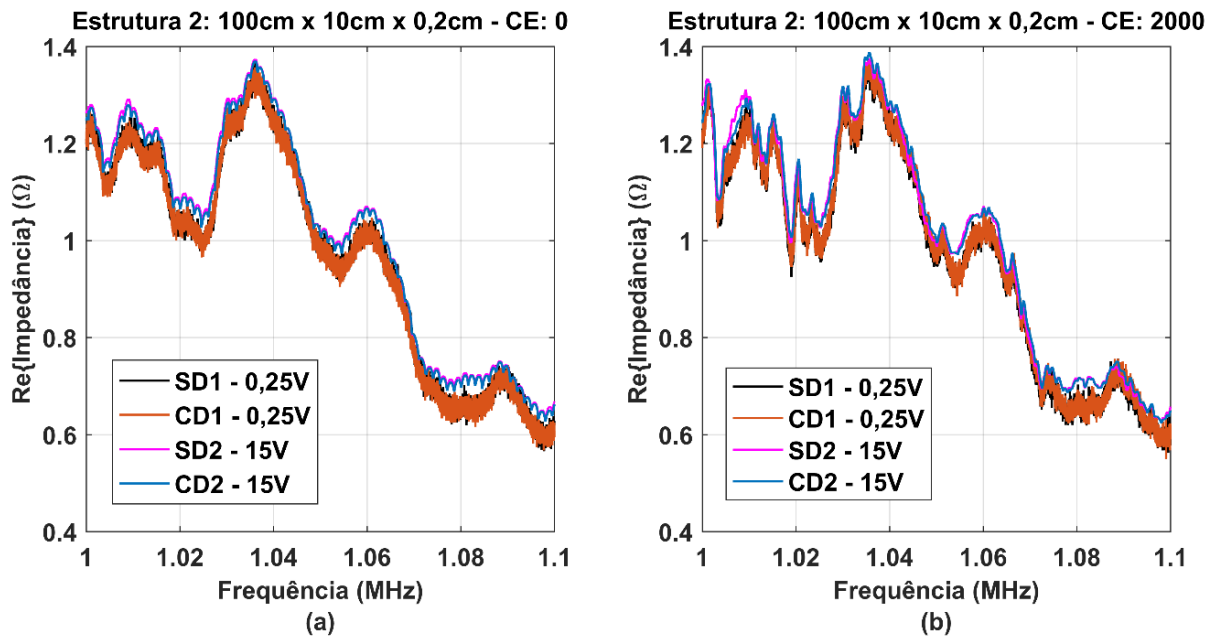
Conforme pode ser observado, as curvas referentes aos gráficos (a) das Figuras 35, 36 e 37 não apresentaram grande capacidade de distinção entre as condições sem e com danos estruturais. O mesmo ocorre para a maioria das curvas em que foram utilizados 0,25 V de tensão e 2000 Ciclos de Estabilização para os sinais de excitação, sendo possível notar, visualmente, maiores diferenças apenas para a Estrutura 3, com as curvas apresentadas na Figura 37. Já para as curvas em que se utilizou 15 V e 2000 Ciclos de Estabilização, as maiores diferenças também são para as assinaturas da Estrutura 3, mas pequenas regiões também podem ser observadas nas outras estruturas, como próximo a 1,01 MHz para a Estrutura 2, na Figura 36.

Figura 35 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 1 sem e com danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz



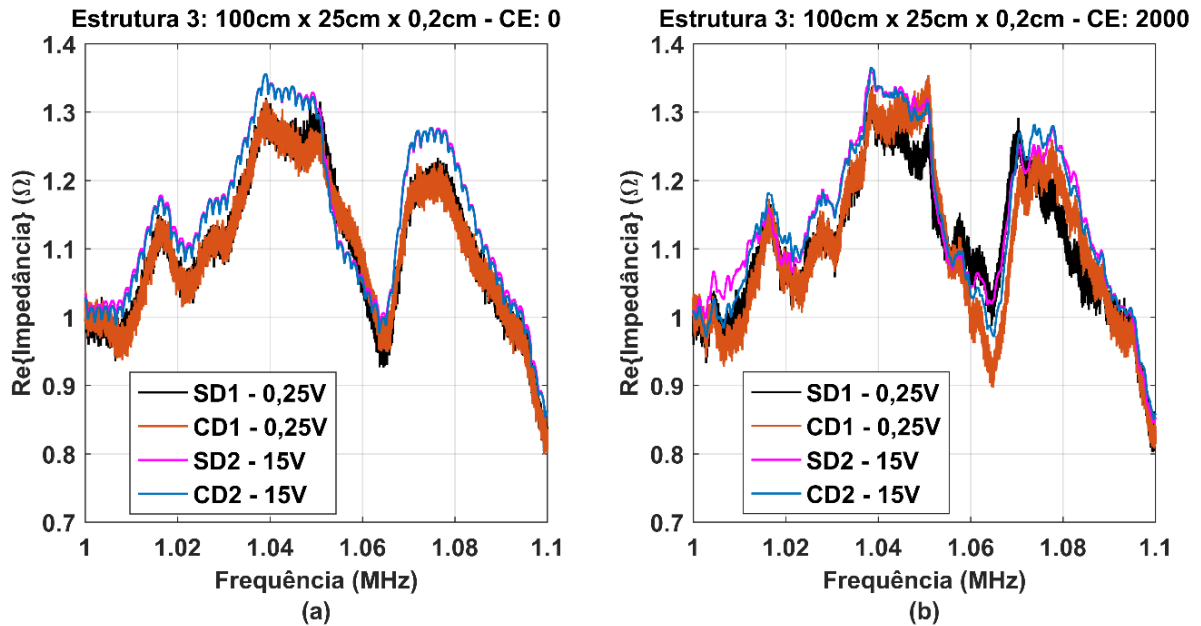
Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 2 sem e com danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz



Fonte: Autoria própria.

Figura 37 – Impedâncias elétricas para a Estrutura 3 sem e com danos, obtidas com (a) 0 e (b) 2000 Ciclos de Estabilização, entre 1 MHz e 1,1 MHz



Fonte: Autoria própria.

Para finalizar a apresentação dos resultados dos testes experimentais, a seguir são apresentados os índices CCDM obtidos com as análises das três estruturas e duas bandas de frequência. Assim como o restante do trabalho, não são apresentados todos os índices de todas as combinações apresentadas na Tabela I, da Seção 4.1, para não tornar o trabalho repetitivo. Sendo assim, para que haja correspondência entre os resultados já visualizados nas Figuras de 32 a 37, são apresentados nas Figuras 38, 39 e 40, respectivamente, os índices CCDM para as Estruturas 1, 2 e 3, na baixa frequência, para as combinações entre 0,25 V e 15 V e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização.

Como pode ser facilmente visualizado, para as três estruturas, as configurações com 2000 Ciclos de Estabilização apresentaram os maiores índices CCDM, com destaque para a configuração que utilizou 15 V de amplitude para o sinal de excitação. As configurações que utilizaram 0 Ciclos de Estabilização apresentaram valores muito pequenos se comparados com as demais configurações e, portanto, não são consideradas aptas à detecção de variações estruturais. Vale destacar, mais uma vez, que em baixas frequências, o incremento dos Ciclos de Estabilização torna a detecção de variações estruturais mais favorável, sendo, portanto, mais importante do que a amplitude do sinal de excitação utilizado.

Figura 38 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 1, na banda frequência de 50 kHz a 60 kHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização

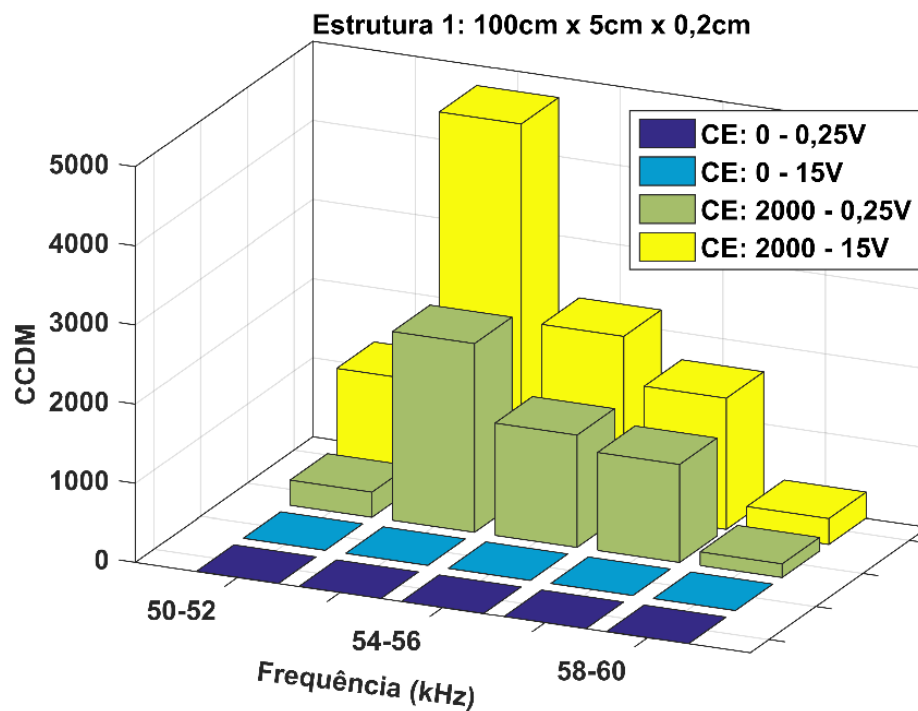


Figura 39 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 2, na banda frequência de 35 kHz a 45 kHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização

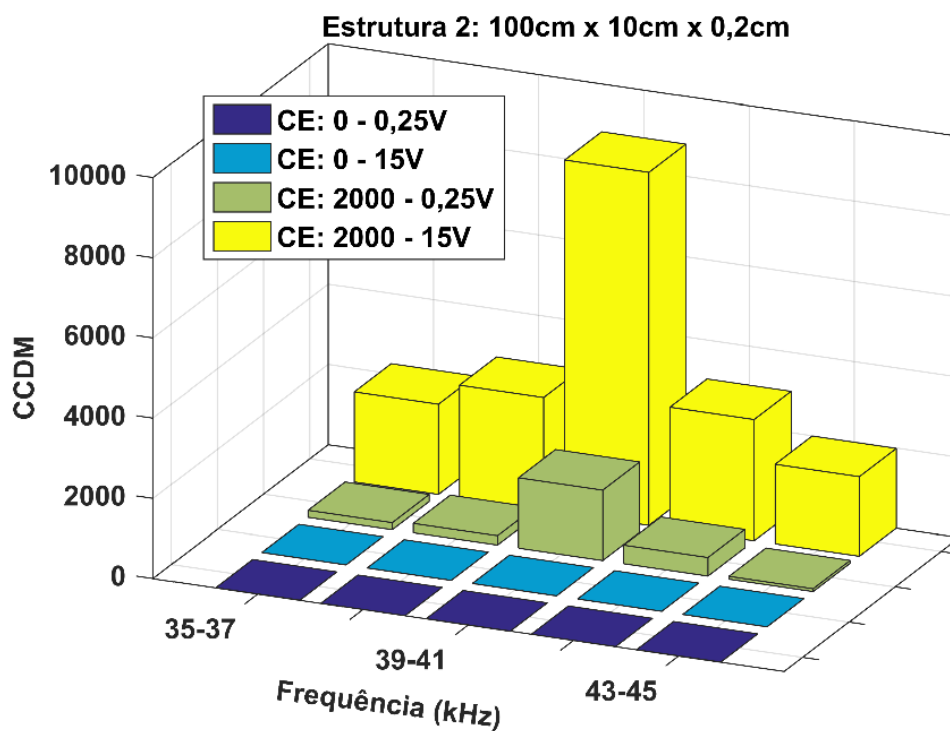
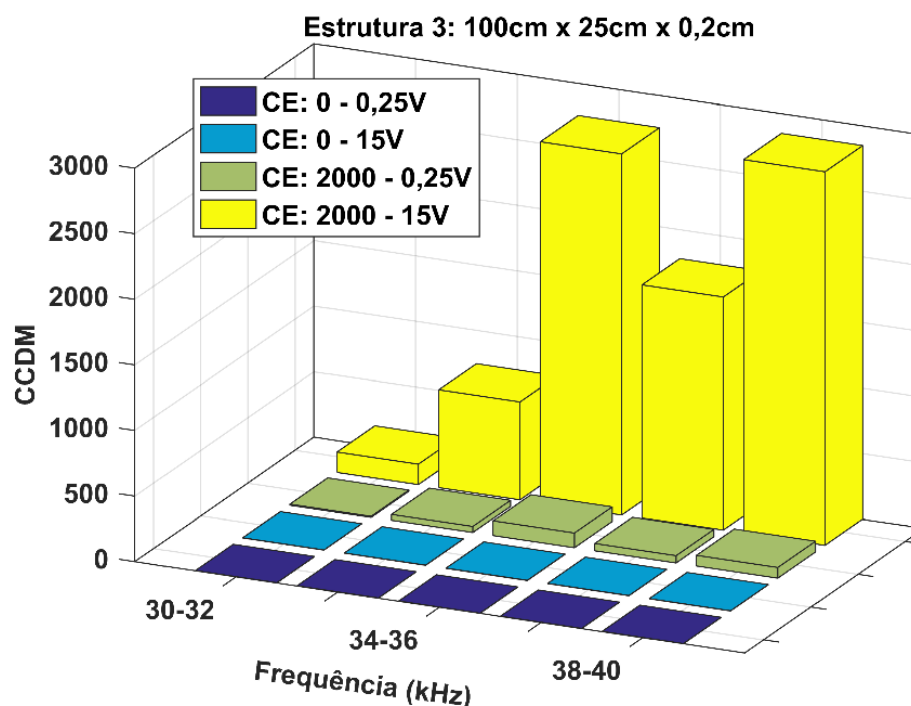


Figura 40 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 3, na banda frequência de 30 kHz a 40 kHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização

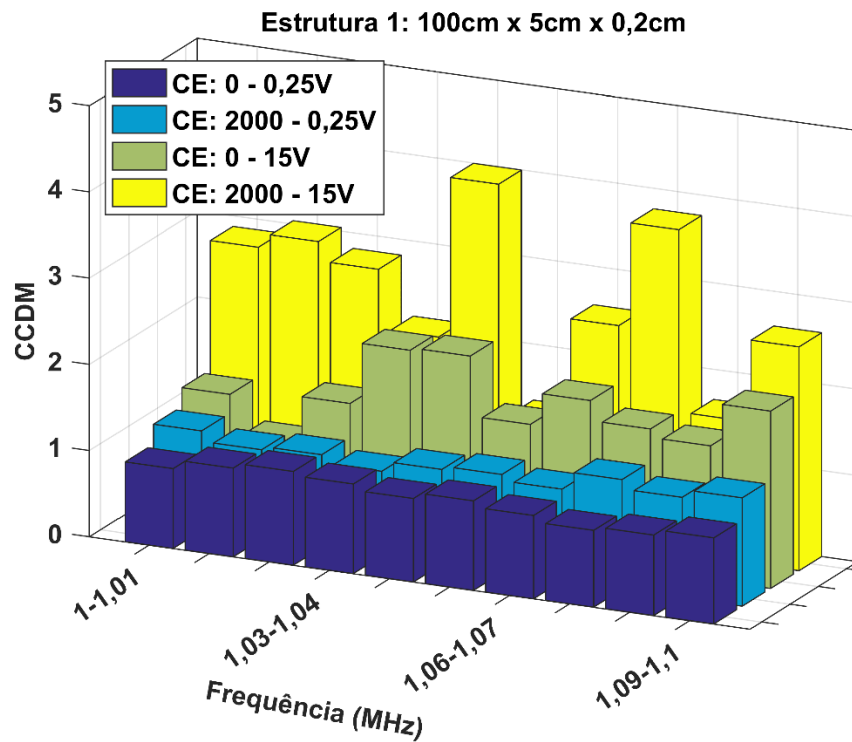


Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 41, 42 e 43, são apresentados, respectivamente, os índices CCDM para as Estruturas 1, 2 e 3, na alta frequência, para as combinações entre 0,25 V e 15 V e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização. Vale ressaltar que, para estes próximos gráficos, as combinações representadas pelas barras azuis claras (CE:0 – 15 V) e verdes (CE:2000 – 0,25 V), apresentadas nas Figuras 38, 39 e 40, foram invertidas, visando uma melhor apresentação dos resultados obtidos.

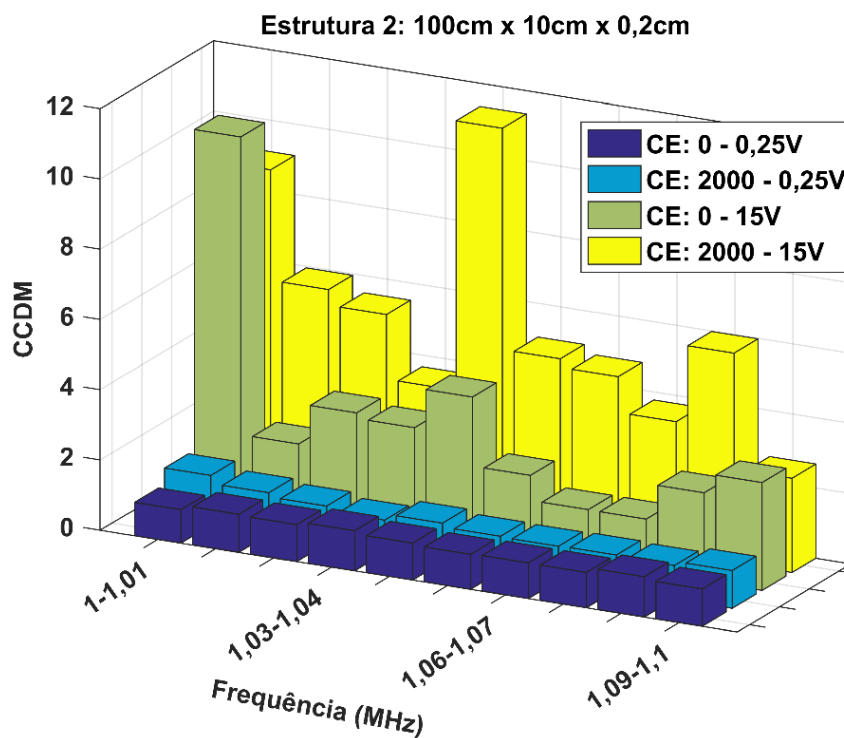
De acordo com o apresentado nas Figuras 41, 42 e 43, pode-se afirmar que foi possível detectar danos também em frequências acima de 1 MHz, para as três estruturas analisadas. Deve-se citar, ainda, que os melhores resultados foram para as configurações que utilizaram tensão de excitação de 15 V, demonstrando de forma definitiva a importância deste parâmetro para análises em alta frequência. Vale ressaltar também que os maiores índices foram obtidos para a maior estrutura, como era o esperado, devido às diferenças observadas nas curvas de impedância elétrica sem e com danos, apresentadas na Figura 37 deste trabalho.

Figura 41 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 1, na banda frequência de 1 MHz a 1,1 MHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização



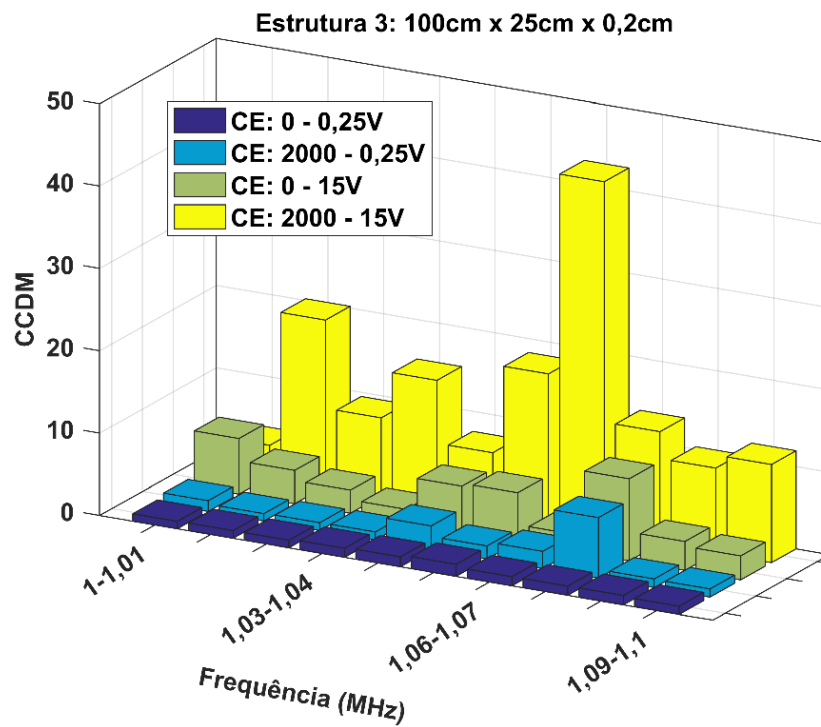
Fonte: Autoria própria.

Figura 42 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 2, na banda frequência de 1 MHz a 1,1 MHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização



Fonte: Autoria própria.

Figura 43 – Índices CCDM obtidos para a Estrutura 3, na banda frequência de 1 MHz a 1,1 MHz, com amplitude de excitação de 0,25 V e 15 V, e 0 e 2000 Ciclos de Estabilização



Fonte: Autoria própria.

Ao final deste trabalho, no Apêndice A, são apresentados resultados de simulações realizadas no software *ABAQUS Student Edition* que contemplam somente parte dos comportamentos visualizados nesta última etapa devido às limitações impostas por ser uma licença gratuita do programa.

Conclusão

Esta tese de doutorado apresenta duas soluções para sistemas de SHM baseados na técnica da impedância E/M em que se utilizam sinais de alta frequência, ou seja, acima de 1 MHz. Apesar do foco das análises ser para sinais de alta frequência, testes em baixas frequências também foram realizados. As soluções propostas foram a utilização de uma interface de capacitância negativa em paralelo com o transdutor piezelétrico acoplado à estrutura sob análise, visando a melhoria do acoplamento eletromecânico; e utilização de sinais de excitação com maior amplitude e duração. Os resultados para as duas soluções sugeridas indicam efetiva melhora na capacidade de análise e detecção de danos estruturais para todas as faixas de frequência e condições analisadas.

Para a etapa em que se utilizou a interface de capacitância negativa, os testes experimentais foram realizados em uma estrutura fina e estreita para garantir a condição unidimensional aplicada na análise teórica. Foi realizado o teste da quebra do grafite (PLB) e, com o cálculo da densidade espectral de potência (PSD), foi confirmado o comportamento observado na análise teórica. Além disso, os testes foram realizados medindo-se a impedância elétrica de um transdutor em baixas e altas frequências para estruturas com condições sem danos e danificadas. Os resultados experimentais confirmaram de forma conclusiva um aumento significativo na sensibilidade a danos estruturais, especialmente em altas frequências, validando a análise teórica. Portanto, a análise teórica e os resultados experimentais demonstram a eficácia do uso de capacitância negativa com transdutores piezelétricos para detecção de danos por impedância, trazendo vantagens como maior sensibilidade às variações estruturais e menor corrente de excitação exigida pelo transdutor.

Para a etapa dos testes em que se variou a amplitude e a duração dos sinais de excitação, foram testadas vinte combinações desses parâmetros, com as seguintes configurações: amplitude do sinal de excitação: 0,25 V, 1 V, 5 V e 15 V; e o tempo de duração, denominado, neste trabalho, como Ciclos de Estabilização: 0, 100, 400, 1000 e 2000. Essas vinte combinações foram testadas em frequências baixas e altas, para três estruturas de dimensões distintas, todas com 100 cm de comprimento e 0,2 cm de espessura, com larguras de 5 cm, 10 cm e 25 cm. Foram realizados testes de repetição e de monitoramento de ocorrência de dano. Os testes de repetição consistiram em realizar 100 medições para determinado pico de ressonância de cada estrutura e, então, calcular o coeficiente de variação de cada grupo de medições. Para esta etapa, foram, portanto, obtidas 12 mil medições, considerando as duas

faixas de frequência analisadas para cada uma das três estruturas. Já os testes para detecção de ocorrência de variações estruturais consistiram em realizar medições para as condições sem e com a presença de danos às estruturas, e aplicar o índice CCDM para as curvas de impedância obtidas. Foram realizados testes também utilizando as vinte combinações entre os parâmetros analisados, para as três estruturas e duas bandas de frequência, mas somente os principais resultados foram apresentados, visando uma melhor fluidez neste trabalho.

Os resultados indicam que, tanto para baixa quanto para alta frequência, uma maior tensão de excitação, além de um maior número de ciclos de estabilização, leva o sistema de medição e monitoramento a atingir resultados mais detalhados da condição estrutural, e, por consequência, torna-se mais sensível a variações estruturais causadas por possíveis danos. É importante ressaltar ainda, que para as frequências testadas abaixo de 1 MHz, os Ciclos de Estabilização representaram um papel mais importante do que a tensão de excitação e, em frequências acima de 1 MHz, foi observado o comportamento contrário, tanto em termos de repetição das medições quanto em detecção a variações estruturais. Por fim, no Apêndice A deste trabalho, são apresentadas simulações em baixa frequência para que se compare com os resultados apresentados nesta etapa. Mais detalhes são fornecidos no próprio apêndice.

Portanto, de acordo com os resultados das duas propostas apresentadas, esse trabalho fornece referências para análises em altas frequências (acima de 1 MHz) utilizando-se sistemas de SHM baseados na técnica da impedância E/M. Com os ajustes necessários às diferentes aplicações, as soluções aqui apresentadas podem ser utilizadas em sistemas de medição mais complexos e até mesmo embarcados.

Sugestão para trabalhos futuros

Neste trabalho, em relação à utilização da interface de capacitância negativa, foi utilizado apenas um tipo e tamanho de transdutor piezelétrico. No entanto, diferentes tipos e tamanhos de transdutores possuem capacidade de acoplamento eletromecânico e capacitâncias distintas e, portanto, um estudo comparando-se a utilização da capacitância negativa com diferentes transdutores pode ser realizado. Sugere-se também a elaboração de uma modelagem em três dimensões do modelo eletromecânico do diafragma piezelétrico com a estrutura a ser monitorada, almejando melhor visualização, principalmente, nas comparações teóricas realizadas em alta frequência. Também pode-se propor um estudo das limitações da técnica tradicional em conjunto com a interface de capacitância negativa em relação à sensibilidade de diferentes tamanhos e distâncias do dano ao diafragma piezelétrico.

Além disso, para a etapa em que se utilizou parâmetros distintos nos sinais de excitação, outros parâmetros podem ser testados, como o passo de frequência, e também outros tipos de sinais de excitação que não sejam os senoidais, como o sinal do tipo *chirp*.

Para as duas propostas abordadas neste trabalho, também se sugere a realização de testes em estruturas de outros materiais, como os compósitos.

Referências Bibliográficas

- ABBAS, S.; LI, F.; QIU, J.; ZHU, Y.; TU, X. Optimization of ultrasonic guided wave inspection in structural health monitoring based on thermal sensitivity evaluation. **Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control**, v. 40, n. 1, p. 601–622, mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.1177/1461348419886189>
- AKGUL, M.; WU, L.; REN, Z.; NGUYEN, C. T. C. A negative-capacitance equivalent circuit model for parallel-plate capacitive-gap-transduced micromechanical resonators. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 61, n. 5, p. 849–869, maio 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2014.2976>
- ALMEIDA, V. A. D. DE; BAPTISTA, F. G.; AGUIAR, P. R. DE. Piezoelectric Transducers Assessed by the Pencil Lead Break for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 2, p. 693–702, fev. 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2014.2352171>
- ANNAMDAS, V. G.; RADHIKA, M. A. Electromechanical impedance of piezoelectric transducers for monitoring metallic and non-metallic structures: A review of wired, wireless and energy-harvesting methods. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 24, n. 9, p. 1021–1042, jun. 2013. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X13481254>
- ANTUNES, R. A.; CORTEZ, N. E.; GIANESINI, B. M.; FILHO, J. V. Modeling, Simulation, Experimentation, and Compensation of Temperature Effect in Impedance-Based SHM Systems Applied to Steel Pipes. **Sensors**, v. 19, n. 12, p. 2802, jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/s19122802>
- BAO, B.; WANG, Q. Elastic wave manipulation in piezoelectric beam meta-structure using electronic negative capacitance dual-adjacent/staggered connections. **Composite Structures**, v. 210, p. 567–580, fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.053>
- BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D. E.; DE ALMEIDAS, V. A.; ULSON, J. A. C. An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Sensors**, v. 14, n. 1, p. 1208–1227, 10 jan. 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/s140101208>
- 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, p. 3602–3608, out. 2009. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2009.2018693>
- BECK, B. S.; CUNEFARE, K. A.; COLLET, M. The power output and efficiency of a negative capacitance shunt for vibration control of a flexural system. **Smart Materials and Structures**, v. 22, n. 6, p. 065009, 1 jun. 2013. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/22/6/065009>
- BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G. A Comparative Study of Impedance Measurement Techniques for Structural Health Monitoring Applications. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. PP, n. 99, p. 912–924, 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2018.2792854>
- CAMPEIRO, L. M.; DA SILVEIRA, R. Z.; BAPTISTA, F. G. Impedance-based damage detection under noise and vibration effects. **Structural Health Monitoring**, v. 17, n. 3, p. 654–667, maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921717715240>
- CHEN, G.; ZHANG, W.; ZHANG, Z.; JIN, X.; PANG, W. A new rosette-like eddy current array sensor with high sensitivity for fatigue defect around bolt hole in SHM. **NDT & E International**, v. 94, p. 70–78, 1 mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.12.001>

CHINH, L. M. Proposed SHM System with Acoustic Emission (AE) Technology for Tran Hoang Na Steel Arch Bridge. **International Journal of GEOMATE**, v. 21, n. 84, 1 ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.21660/2021.84.j2190>

DE 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, jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.034>

E07 COMMITTEE. **Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response**. ASTM International. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E976-10>>. Acesso em: 19 set. 2021.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. **Structural health monitoring: a machine learning perspective**. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, N.J: Wiley, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118443118>

FREITAS, E. S. DE.; BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D. E.; CASTRO, B. A. DE. Equivalent Circuit of Piezoelectric Diaphragms for Impedance-Based Structural Health Monitoring Applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 17, p. 5537–5546, set. 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2725946>

GIURGIUTIU, V. **Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring: State of the Art and Future Directions**. In: ASME 2010 PRESSURE VESSELS AND PIPING DIVISION/K-PVP CONFERENCE. American Society of Mechanical Engineers, 1 jan. 2010. Disponível em: <<https://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1618985>>. Acesso em: 19 set. 2021

GUO, Z.; HUANG, T.; SCHRÖDER, K.-U. Development of a Piezoelectric Transducer-Based Integrated Structural Health Monitoring System for Impact Monitoring and Impedance Measurement. **Applied Sciences**, v. 10, n. 6, p. 2062, jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/app10062062>

HOSHYARMANESH, H.; ABBASI, A.; MOEIN, P.; GHODSI, M.; ZAREINIA, K. Design and Implementation of an Accurate, Portable, and Time-Efficient Impedance-Based Transceiver for Structural Health Monitoring. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 22, n. 6, p. 2809–2814, dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2017.2761902>

JASIM, I.; SHEN, Z.; MLAJI, Z.; YUKSEK, N. S.; ABDULLAH, A.; LIU, J.; DASTIDER, S. G.; DWEIK, M. E.; ZHANG, S. ALMASRI, M. An impedance biosensor for simultaneous detection of low concentration of Salmonella serogroups in poultry and fresh produce samples. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 126, p. 292–300, fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2018.10.065>

JINACHANDRAN, S.; BASU, A.; LI, H.; XI, J.; PRUSTY, B. G.; RAJAN, G. The Study of the Directional Sensitivity of Fiber Bragg Gratings for Acoustic Emission Measurements. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 16, p. 6771–6777, ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2019.2913415>

KAMAS, T.; TEKKALMAZ, M. Coupled field modeling of E/M impedance of piezoelectric wafer active sensor for cataphoretic coating thickness measurement. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 4, p. 045035, mar. 2017. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/aa63e2>

LI, H.-N.; REN, L.; JIA, Z.-G.; YI, T.-H.; LI, D.-S. State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 6, n. 1, p. 3–16, 1 fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-015-0108-9>

LI, X.; QU, W.; XIAO, L.; LU, Y. Removal of temperature effect in impedance-based damage detection using the cointegration method. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 30, n. 15, p. 2189–2197, set. 2019. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X19862364>

LI, X.; DING, S.; TAN, B. Accurate Defect Detection in Thin-Wall Structures With Transducer Networks via Outlier Elimination. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, n. 23, p. 9619–9628, dez. 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2018.2871459>

MÄLZER, M.; KEXEL, C.; MAETZ, T.; MOLL, J. Combined Inspection and Data Communication Network for Lamb-wave Structural Health Monitoring. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, p. 1625–1633, 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2925864>

MEITZLER, A. H. *et al.* IEEE standard on piezoelectricity: An American national standard. New York: **IEEE-ANSI**, 66 p., Std., 176, 1988. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.1988.79638>

MURATA MANUFACTURING. **Piezoelectric Ceramics ('PIEZOTITE') Sensors** document Catalog No. P19E-9, 2008.

RAHBARI, A.; RÉBILLAT, M.; MECHBAL, N.; CANU, S. Unsupervised damage clustering in complex aeronautical composite structures monitored by Lamb waves: An inductive approach. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 97, p. 104099, jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2020.104099>

RIZZO, P. A review on the latest advancements in the non-invasive evaluation/monitoring of dental and trans-femoral implants. **Biomedical Engineering Letters**, 8 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s13534-019-00126-8>

SABETI, S.; LECKEY, C. A. C.; DE MARCHI, L.; HARLEY, J. B. Sparse Wavenumber Recovery and Prediction of Anisotropic Guided Waves in Composites: A Comparative Study. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 66, n. 8, p. 1352–1363, ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2918746>

SAFAEI, M.; NOLAN, E. C.; ANTON, S. R. **Finite element evaluation of EMI-based structural health monitoring in high frequencies**. Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIII. **Anais**. In: HEALTH MONITORING OF STRUCTURAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS XIII. International Society for Optics and Photonics, 1 abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2514336>

SEVILLANO, E.; SUN, R.; PERERA, R. Damage Detection Based on Power Dissipation Measured with PZT Sensors through the Combination of Electro-Mechanical Impedances and Guided Waves. **Sensors**, v. 16, n. 5, p. 639, 5 maio 2016. <http://dx.doi.org/10.3390/s16050639>

SINGH, S. K.; SIKDAR, S.; MALINOWSKI, P. H. An optimized data fusion strategy for structural damage assessment using electromechanical impedance. **Smart Materials and Structures**, v. 30, n. 3, p. 035012, 1 mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/abdc07>

SRIVASTAVA, S.; BHALLA, S. Numerical evaluation of nonbonded piezo sensor for biomedical diagnostics using electromechanical impedance technique. **International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering**, v. 35, n. 2, p. e3160, fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.1002/cnm.3160>

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, p. 13–20, fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2018.06.008>

ZHOU, Z.; RUI, Y.; ZHOU, J.; DONG, L.; CAI, X. Locating an Acoustic Emission Source in Multilayered Media Based on the Refraction Path Method. **IEEE Access**, v. 6, p. 25090–25099, 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2805384>

APÊNDICE A – Simulações no software ABAQUS Student Edition

Este apêndice apresenta simulações baseadas no método dos elementos finitos (FEM) no software ABAQUS (*Student Edition License*, 2020) a fim de verificação de comportamentos de parte dos resultados práticos obtidos no Capítulo 4. No entanto, a versão gratuita do software ABAQUS (*Student Edition*) possui limitações quanto ao número de nós possíveis (no máximo 1000) para os modelos estruturais criados. Essa limitação faz com que as estruturas devam ser muito pequenas para que um valor mínimo de tamanho de malha (*mesh*) seja obtido e, com isso, habilite simulações até certa frequência. Com os valores utilizados nos parâmetros das simulações aqui apresentadas, a máxima frequência de análise dá-se em torno de 30,9 kHz e, portanto, a etapa de análise em alta frequência não pôde ser obtida para comparação com os resultados apresentados no Capítulo 4.

Para as simulações, foram utilizados diafragmas piezelétricos de mesmas dimensões aos utilizados nos testes experimentais, ou seja, base de latão com 20 mm de diâmetro e 0,20 mm de espessura, e elemento ativo com 14 mm de diâmetro e 0,22 mm de espessura. As estruturas, por limitações da versão de estudante do software, foram menores que as reais, sendo as dimensões de 15 cm × 4 cm × 0,2 cm e de 15 cm × 8 cm × 0,2 cm.

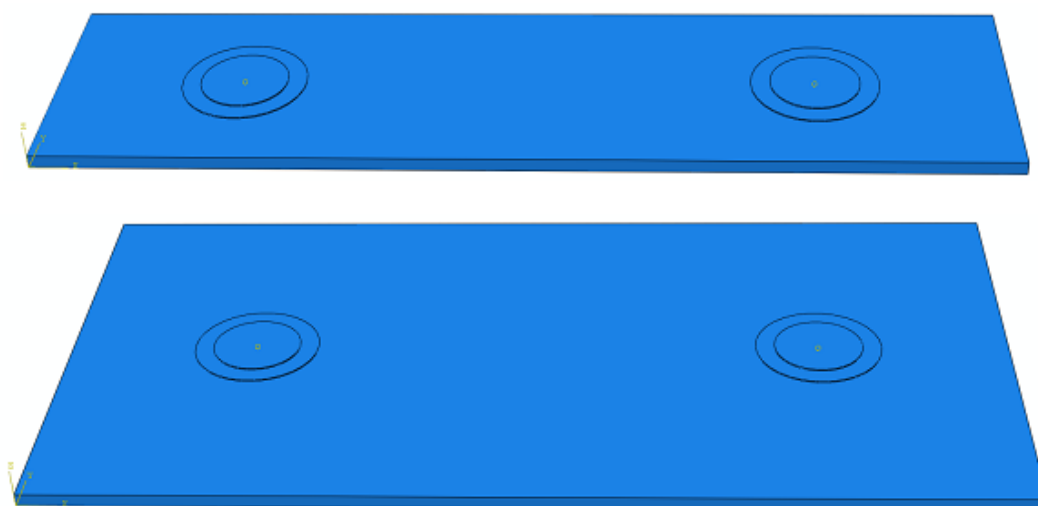
Diferentemente da técnica da impedância E/M, para essas simulações foi utilizado o método da FRF (*Frequency Response Function*) (DA SILVEIRA; CAMPEIRO; BAPTISTA, 2017), que ao invés de utilizar um único transdutor piezelétrico para excitação e leitura dos sinais, utiliza um transdutor para a excitação da estrutura e outro para a obtenção do sinal de resposta. Com base nesses sinais, realiza-se o cálculo da função de resposta em frequência (FRF) e utiliza-se o módulo da grandeza obtida para análises. Vale ressaltar que o método da impedância E/M utiliza do mesmo mecanismo de cálculo, adicionando-se somente o efeito do resistor para o divisor de tensão com o transdutor piezelétrico (BAPTISTA; FILHO, 2009). Portanto, uma comparação entre os comportamentos das técnicas, ainda que não sejam idênticas, pode servir para uma visualização básica dos efeitos observados também nos resultados dos testes práticos do Capítulo 4.

Sendo assim, para as simulações, foram utilizados dois transdutores em cada estrutura, cada um com o centro distando 3 cm de cada extremidade da estrutura, restando então 9 cm entre os transdutores. Todas as propriedades foram idênticas entre os componentes comparados nas simulações, variando-se apenas a largura das estruturas sob análise, conforme dimensões já descritas. Devido ao tamanho das estruturas e as limitações da versão de estudante do software,

os componentes foram modelados com malhas (*mesh*) de 1 cm para as estruturas, 0,4 cm para o disco de latão e 0,4 cm para o elemento ativo. Com isso, a máxima frequência indicada para análise seria de aproximadamente 30,9 kHz para que se tenha um mínimo de 10 nós por comprimento de onda, que se mostrou adequado para simulações (ALLEYNE; CAWLEY, 1991). Portanto, mesmo que os resultados das simulações não contemplem o comportamento em altas frequências, ainda é possível visualizar os efeitos da variação dos Ciclos de Estabilização em baixa frequência.

Para essas simulações, foram utilizados sinais com 35 V pico a pico, variando de 23800 Hz a 25200 Hz, com passos de 50 Hz. Os sinais foram gerados separadamente para cada variação de 50 Hz e foi realizada uma simulação para cada estrutura e cada sinal dentro da banda de frequência. Além disso, foram gerados diferentes sinais com amostras referentes a 20 e 500 Ciclos de Estabilização, somadas a mais 2000 amostras ao final de cada sinal. Assim como o sistema de medição de impedância elétrica utilizado nos testes experimentais do Capítulo 4, os cálculos das DFTs foram com base nessas últimas 2000 amostras e não em todo o pacote de amostras. Vale ressaltar que nos testes experimentais foram utilizadas 20000 amostras e, nas simulações, apenas 2000, devido ao longo tempo de simulação exigido. Na Figura A.1 são apresentados os modelos utilizados para as simulações.

Figura A.1 – Estruturas utilizadas nas simulações



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, nas Figuras A.2 e A.3, são apresentados os resultados das simulações.

Conforme explicado, as curvas a seguir são os módulos das FRFs, obtidas dos sinais de excitação e resposta de um sistema de medição que advém de um princípio de funcionamento parecido ao da impedância E/M, mas que utiliza dois transdutores piezelétricos para fazer a excitação e leitura dos sinais.

Figura A.2 – Módulo da FRF para a simulação com uma estrutura de 15 cm × 4 cm × 0,2 cm, entre 23,8 kHz e 25,2 kHz, com 20 e 500 Ciclos de Estabilização

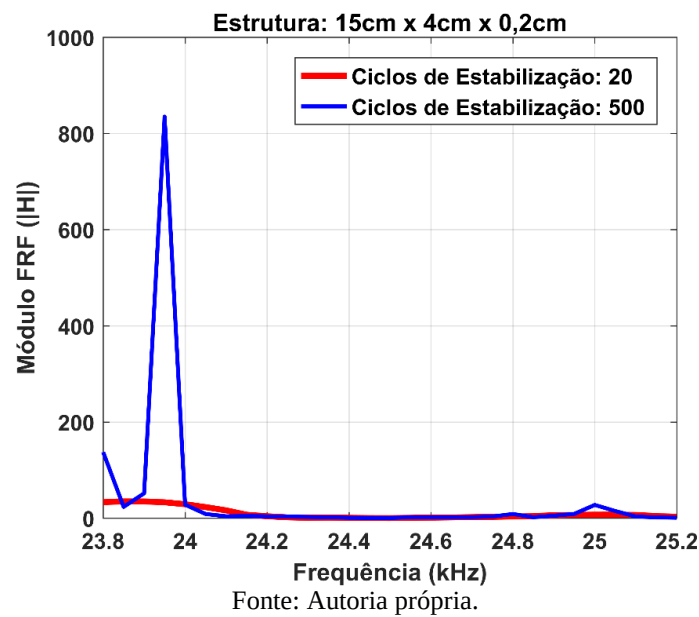
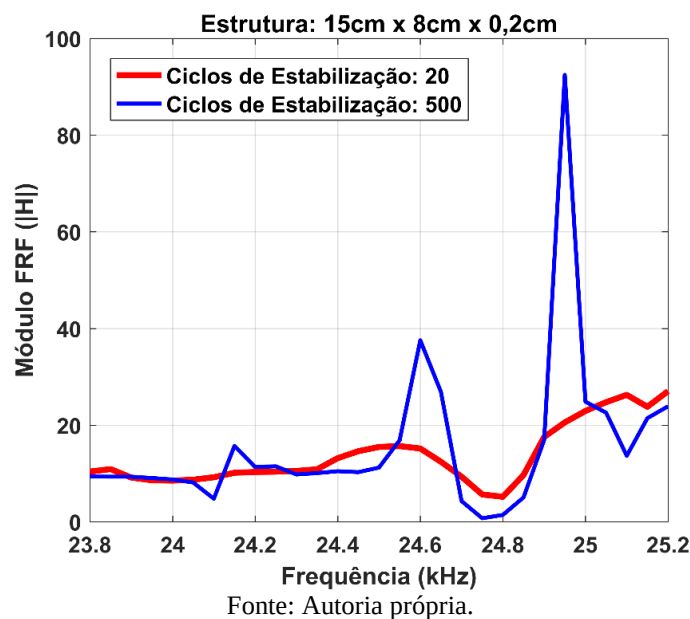


Figura A.3 – Módulo da FRF para a simulação com uma estrutura de 15 cm × 8 cm × 0,2 cm, entre 23,8 kHz e 25,2 kHz, com 20 e 500 Ciclos de Estabilização



Conforme pode ser observado nas Figuras A.2 e A.3, ainda que as simulações possuam parâmetros limitados e a técnica empregada não seja idêntica à impedância E/M, o comportamento assemelha-se aos apresentados pelos testes experimentais em baixa frequência vistos no Capítulo 4, em que um maior tempo de excitação da estrutura leva a picos de ressonância maiores, facilitando a análise da condição estrutural da mesma.

Referências Bibliográficas

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, n. 3, p. 1159–1168, mar. 1991. <http://dx.doi.org/10.1121/1.400530>

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, p. 3602–3608, out. 2009. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2009.2018693>

DA SILVEIRA, R. Z. M.; CAMPEIRO, L. M.; BAPTISTA, F. G. Performance of three transducer mounting methods in impedance-based structural health monitoring applications. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 17, p. 2349–2362, out. 2017. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X17689942>