



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

CLÁUDIO JOSÉ RIBEIRO DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA
ELÉTRICA PARA MONITORAMENTO DE
INTEGRIDADE ESTRUTURAL PELA
CONFIGURAÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS DO
SINAL DE EXCITAÇÃO**

**BAURU - SP
2024**

CLÁUDIO JOSÉ RIBEIRO DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA
ELÉTRICA PARA MONITORAMENTO DE
INTEGRIDADE ESTRUTURAL PELA
CONFIGURAÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS DO
SINAL DE EXCITAÇÃO**

Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista

Coorientador: Prof. Dr. Danilo Ecidir Budoya

**BAURU - SP
2024**

S586o

Silva, Cláudio José Ribeiro da

Otimização da medição de impedância elétrica para monitoramento de integridade estrutural pela configuração do número de ciclos do sinal de excitação / Cláudio José Ribeiro da Silva. -- , 2024

56 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru,

Orientador: Fabricio Guimarães Baptista

Coorientador: Danilo Ecidir Budoya

1. Medição de impedância. 2. Detecção de dano. 3. SHM. 4.
Impedância eletromecânica. 5. Ciclos de excitação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O desenvolvimento de sistemas de monitoramento de integridade estrutural representa não apenas uma inovação tecnológica, mas também um avanço significativo com amplo impacto social. A detecção precoce de danos estruturais desempenha um papel crucial na garantia da segurança em diversas áreas, desde infraestruturas críticas, como pontes e edifícios, até equipamentos industriais e veículos.

Além de proporcionar um planejamento operacional mais seguro e eficiente, a identificação precoce de danos estruturais pode evitar paradas repentinas que acarretem em prejuízos econômicos e sociais consideráveis. Setores-chave da economia, como produção de bens e serviços, são diretamente beneficiados pela continuidade das operações sem interrupções não planejadas, contribuindo para a estabilidade e o crescimento econômico do país.

Além disso, a redução de paradas não programadas não apenas impulsiona a eficiência operacional, mas também está diretamente ligada à melhoria dos índices de qualidade. Ao evitar falhas catastróficas em estruturas e equipamentos, a pesquisa em monitoramento de integridade estrutural promove a segurança do público em geral, prevenindo vidas humanas e minimizando danos ambientais.

Nesse contexto, a pesquisa proposta busca não apenas aprimorar as metodologias existentes de diagnóstico de falhas em sistemas estruturais, mas também desenvolver novas abordagens que permitam a implementação de medidas preventivas eficazes. Nesse sentido, os resultados apresentados neste trabalho, inegavelmente, trazem melhorias aos métodos tradicionais de análise de sistemas de monitoramento baseados na técnica da impedância eletromecânica, pois viabilizam ao sistema a capacidade ideal de análise e identificação de danos estruturais incipientes ao determinar a quantidade mínima de ciclos utilizados nos sinais de excitação do sistema.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The development of structural health monitoring systems represents not only a technological innovation, but also a significant advance with broad social impact. Early detection of structural damage plays a crucial role in ensuring safety in diverse areas, from critical infrastructure such as bridges and buildings to industrial equipment and vehicles.

In addition to providing safer and more efficient operational planning, early identification of structural damage can avoid sudden stops that result in considerable economic and social losses. Key sectors of the economy, such as the production of goods and services, directly benefit from the continuity of operations without unplanned interruptions, contributing to the country's stability and economic growth.

Furthermore, reducing unscheduled downtime not only boosts operational efficiency, but is also directly linked to improving quality indices. By preventing catastrophic failures in structures and equipment, research into structural integrity monitoring promotes the safety of the general public, preventing human lives and minimizing environmental damage.

In this context, the proposed research seeks not only to improve existing methodologies for diagnosing failures in structural systems, but also to develop new approaches that allow the implementation of effective preventive measures. In this sense, the results presented in this work undeniably bring improvements to traditional methods of analyzing monitoring systems based on the electromechanical impedance technique, as they provide the system with the ideal capacity for analysis and identification of incipient structural damage by determining the minimum amount of cycles used in the system's excitation signals.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE CLAUDIO JOSÉ RIBEIRO DA SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 22 dias do mês de abril do ano de 2024, às 14:00 horas, no(a) Via sistemas de videoconferência e outras ferramentas para comunicação a distância, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de CLAUDIO JOSÉ RIBEIRO DA SILVA, intitulada **Otimização da Medição de Impedância Elétrica para Monitoramento de Integridade Estrutural pela Configuração do Número de Ciclos do Sinal de Excitação**. 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. BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO (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, Prof. Dr. EVERALDO SILVA DE FREITAS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário de Lins - UNILINS, Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário de Lins - UNILINS. 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



Dedico este trabalho à minha esposa Iracema, aos meus filhos Pedro e Paulo e amigos, que sempre me apoiaram desde o início até o término do Doutorado.

Dedico também este trabalho a todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pelo incentivo, dedicação e profissionalismo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem a ajuda do ETERNO DEUS, por ser a base de minhas realizações.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista pela oportunidade em me aceitar como seu orientado, confiança, paciência, atenção para que este trabalho se concretizasse, pelas orientações prestadas, pelos conhecimentos transmitidos, me incentivando e colaborando no desenvolvimento desta tese.

Ao meu Coorientador Prof. Dr. Danilo Ecidir Budoya pela revisão e comentários.

Aos amigos que me acompanharam até a conclusão do Doutorado.

Aos Professores e Funcionários, que em todo tempo me apoiaram e motivaram para a minha formação.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP, em especial à Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB e ao Instituto de Ciência e Tecnologia – ICTS de Sorocaba, que proporcionaram os meios necessários para a realização e término do Doutorado.

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para a elaboração, execução e conclusão deste Doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo 2022/15759-1, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo 305067/2022-2.

“Que o favor do Eterno Deus, nosso Deus, esteja sobre nós e faça prosperar todo o trabalho que fazemos – sim, faça prosperar a obra de nossas mãos.” (Tehillim 90.17)

RESUMO

Pesquisadores têm utilizado amplamente sistemas de medição comerciais e alternativos no monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância, onde um transdutor piezoelétrico conectado à estrutura monitorada é excitado enquanto sua impedância elétrica é medida. No entanto, a literatura carece de atenção ao número necessário de ciclos do sinal de excitação, uma questão frequentemente ignorada pelos pesquisadores. Portanto, esta tese teve como objetivo analisar o impacto do número de ciclos de excitação nas medições de impedância, utilizando tanto uma abordagem teórica baseada na resposta dinâmica da estrutura monitorada quanto uma abordagem experimental que emprega um sistema de medição baseado em dispositivo de aquisição de dados com número de ciclos de excitação variável. Foram analisadas quatro estruturas de diferentes tamanhos e materiais, e os resultados mostram que o número adequado de ciclos para que a medição de impedância seja otimizada depende do fator de amortecimento da estrutura monitorada. Configurar o sistema de medição com o número ideal de ciclos pode melhorar notavelmente a medição dos picos de ressonância relacionados às frequências naturais da estrutura, aumentando assim o desempenho na detecção de danos estruturais, bem como a reprodutibilidade das medições de impedância. Portanto, os resultados reportados nesta tese podem ser úteis aos pesquisadores na configuração de diferentes sistemas de medição de impedância para obter melhor desempenho em aplicações de monitoramento de integridade estrutural.

Palavras-chave: medição de impedância, detecção de dano, SHM, impedância eletromecânica, ciclos de excitação, transdutores piezoelétricos.

ABSTRACT

Researchers have widely used commercial and alternative measurement systems in electrical impedance – based structural health monitoring (SHM), where a piezoelectric transducer attached to the monitored structure is excited while its electrical impedance is measured. However, the literature lacks attention to the required number of cycles of the excitation signal, an issue frequently overlooked by researchers. Therefore, this thesis aims to investigate the impact of the number of excitation cycles on electrical impedance measurements by utilizing both a theoretical approach based on the dynamic response of the monitored structure and an experimental approach which employs a measurement system based on a data acquisition (DAQ) device with varied excitation cycles. Four structures of different sizes and materials were analyzed, and the results show that the appropriate number of cycles for the electrical impedance measurement to be optimized depends on the damping ratio of the monitored structure. Configuring the measurement system with the optimal number of cycles can notably enhance the measurement of resonance peaks related to the natural frequencies of the structure, thereby increasing the performance in detecting structural damage as well as the reproducibility of electrical impedance measurements. Therefore, the results reported in this thesis can be useful to researchers in configuring different electrical impedance measurement systems to achieve improved performance in SHM applications.

Keywords: impedance measurement, structural damage detection, SHM, electromechanical impedance, excitation cycles, piezoelectric transducers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Sistema de medição baseado no método da impedância eletromecânica.	25
Figura 2 –	Intensidade relativa de vibração $R(t)$ e a envoltória $E(t)$ com amplitudes normalizadas para um valor máximo de 1.	31
Figura 3 –	Método da largura de banda de meia potência utilizando a parte real da assinatura de impedância elétrica para calcular o fator de amortecimento da estrutura.	32
Figura 4 –	Conjunto experimental.	34
Figura 5 –	Parte real da assinatura de impedância elétrica em torno do pico de ressonância utilizado para obter o fator de amortecimento para a estrutura (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4.	39
Figura 6 –	Amplitudes normalizadas das envoltórias teóricas.	40
Figura 7 –	Amplitudes normalizadas das envoltórias experimentais.	41
Figura 8 –	Efeitos dos números de ciclos do sinal de excitação sobre os picos de ressonância da parte real da impedância elétrica obtida para a Estrutura 1.	44
Figura 9 –	Parte real das assinaturas de impedância elétrica obtidas para a estrutura 1 utilizando 500 e 8000 ciclos do sinal de excitação.	45
Figura 10 –	Índices RMSD com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 1.	46
Figura 11 –	Índices RMSD com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 2.	46
Figura 12 –	Índices RMSD com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 3.	47
Figura 13 –	Índices RMSD com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 4.	47

Figura 14 – Índices CCD obtidos com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 1.....	47
Figura 15 – Índices CCD obtidos com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 2.....	48
Figura 16 – Índices CCD obtidos com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 3.....	48
Figura 17 – Índices CCD obtidos com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 4.....	48
Figura 18 – Envoltórias experimentais da Estrutura 1 com diferentes amplitudes do sinal de excitação.....	49
Figura 19 – Histograma dos coeficientes de correlação obtidos entre 101 assinaturas de impedância elétrica, considerando a primeira como medição de referência, e o sinal de excitação com 1000 ciclos.....	51
Figura 20 – Histograma dos coeficientes de correlação obtidos entre 101 assinaturas de impedância elétrica, considerando a primeira como medição de referência, e o sinal de excitação com 5000 ciclos.....	51
Figura 21 – Histograma dos coeficientes de correlação obtidos entre 101 assinaturas de impedância elétrica, considerando a primeira como medição de referência, e o sinal de excitação com 10000 ciclos.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Estruturas utilizadas nos testes experimentais.....	34
Tabela II - Estruturas e picos de ressonância escolhidos.....	35
Tabela III - Número de ciclos finais para cálculo da FRF e intervalos de ciclos das medições.	36
Tabela IV - Índices para quantificar o dano estrutural.....	36
Tabela V - Estruturas e fatores de amortecimento.....	40
Tabela VI - Estruturas e o requerido número de ciclos.....	41
Tabela VII - Estruturas e o encontrado número de ciclos.	42
Tabela VIII - Número de ciclos do sinal de excitação requerido para cada estrutura.	43
Tabela IX - Estruturas e tempos requeridos.	43
Tabela X - Estruturas e bandas de frequências analisadas.....	45
Tabela XI - Valores dos números de ciclos e valores médios dos coeficientes de correlação obtidos.....	50
Tabela XII - Desvios padrões conforme ciclos.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Uma dimensão
ADC	Conversor Analógico Digital
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação
CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
DAC	Conversor Digital Analógico
DAQ	Dispositivo de Aquisição de Dados
E/M	Impedância Eletromecânica
FRF	Função de Resposta em Frequência
NDT	Testes não destrutivos (<i>Non-destructive testing</i>)
PVDF	Polivinilideno Difluorido
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
RMSD	Desvio da Raiz Média Quadrática
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural
USB	Barramento Serial Universal

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância estática do transdutor piezoelétrico
C_c	Coefficiente de correlação calculado entre duas assinaturas de impedância elétrica ($-1 \leq C_c \leq 1$)
d_{31}	Constante piezoelétrica da cerâmica no sistema natural de eixos de coordenadas sob hipótese unidirecional
E	Módulo de Young do material
$E(t)$	Envoltória
f	Frequência
f_1	Frequência correspondendo a $Z_R/(\sqrt{2})$ ($f_2 > f_1$)
f_2	Frequência correspondendo a $Z_R/(\sqrt{2})$ ($f_2 > f_1$)
f_R	Frequência correspondendo ao pico de ressonância Z_R da parte real da impedância elétrica
$H(f)$	Função de resposta em frequência
I	Momento de inércia da área da estrutura monitorada
j	Unidade imaginária
K	Número de pontos de frequência na banda analisada
l	Comprimento da estrutura monitorada
lg	Largura da estrutura monitorada
m	Massa da estrutura monitorada
N	Número de ciclos do sinal de excitação senoidal
$R(t)$	Intensidade de vibração relativa à frequência de excitação f igual à frequência natural da estrutura monitorada
$Re[Z_{E,D}(f)]$	Parte real da impedância elétrica obtida da estrutura monitorada na condição danificada
$Re[Z_{E,H}(f)]$	Parte real da impedância elétrica obtida da estrutura monitorada na condição íntegra (medição de referência)

R_S	Resistor conectado em série com o transdutor piezoelétrico
S_{11}^E	Constante de tendência elástica em campo elétrico constante da cerâmica piezoelétrica no sistema natural de eixos de coordenadas sob hipótese unidirecional
$S_{xx}(f)$	Autoespectro de potência do sinal de excitação senoidal
$S_{xy}(f)$	Espectro de potência cruzada entre os sinais de excitação e resposta
t	Variável tempo
th	Espessura da estrutura monitorada
T	Período do sinal de excitação senoidal
$x[n]$	Excitação amostrada e processada na forma de tempo discreto
$x(t)$	Amplitude do sinal de excitação senoidal
$y[n]$	Resposta amostrada e processada na forma de tempo discreto
$y(t)$	Amplitude do sinal de resposta do transdutor piezoelétrico
$Z_E(f)$	Impedância elétrica do transdutor na frequência f
$Z_M(f)$	Impedância mecânica da estrutura monitorada na frequência f
Z_R	Pico de ressonância
$Z_T(f)$	Impedância mecânica do transdutor na frequência f
ϵ_{33}^T	Constante dielétrica da cerâmica piezoelétrica em tensão mecânica constante no sistema natural de eixos de coordenadas sob hipótese unidirecional
ξ	Fator de amortecimento da estrutura monitorada
σ	Desvio padrão
ω	Frequência angular natural da estrutura monitorada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Motivações e Justificativas	19
1.2. Organização do trabalho	21
2. ABORDAGEM DOS CICLOS DE EXCITAÇÃO NA LITERATURA.....	22
3. O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA E O SISTEMA DE MEDIDAÇÃO.....	25
4. EFEITOS DOS CICLOS DE EXCITAÇÃO SOBRE MEDIÇÕES DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA.....	29
5. METODOLOGIA	34
5.1. Primeiro Teste.....	35
5.2. Segundo Teste.....	35
5.3. Terceiro Teste	36
5.4. Quarto Teste.....	37
5.5. Quinto Teste.....	37
6. RESULTADOS.....	39
6.1. Estimando teoricamente o número de ciclos	39
6.2. Números de ciclos de excitação encontrados experimentalmente.....	41
6.3. Efeitos dos ciclos do sinal de excitação sobre a detecção do dano estrutural.....	45
6.4. Influência da Amplitude de Excitação.....	49
6.5. Reprodutibilidade das Medições.....	50
CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

Nesta etapa, são apresentadas as motivações para a realização desta tese e, ao final, a organização da mesma.

1.1. Motivações e Justificativas

Sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM, do termo em inglês *Structural Health Monitoring*) têm sido extensivamente estudados em décadas recentes devido à importância deste campo para a academia e para a indústria. Tais sistemas podem monitorar tipos diferentes de estruturas de engenharia, permitindo que um dano estrutural seja detectado antes que um colapso ocorra, e, com isso, reduzir os custos de manutenção (KATAM; PASUPULETI; KALAPATAPU, 2023) e aumentar a segurança de pessoas envolvidas.

Transdutores piezoelétricos têm sido utilizados no desenvolvimento de métodos de testes não destrutivos (NDT, do termo em inglês *Non-destructive testing*) para detectar o dano estrutural em sistemas de SHM devido ao efeito piezoelétrico que permite estabelecer uma relação entre as propriedades mecânicas da estrutura monitorada e as propriedades elétricas do transdutor piezoelétrico. Existe uma variedade de métodos NDT que utilizam transdutores piezoelétricos como sensores, atuadores ou ambos, tais como em emissão acústica e ondas de Lamb (JU *et al.*, 2023; XU; GAO; DENG, 2023).

Como uma consequência, estes métodos de detecção de dano estrutural com transdutores piezoelétricos têm motivado a pesquisa e o desenvolvimento de plataformas dedicadas de medição (LAMBINET; KHODAEI, 2022), que é o assunto de interesse desta tese, principalmente em grandes estruturas onde um grande número de transdutores são requeridos, e a utilização de instrumentos comerciais é inviável. Esta tese particularmente utiliza o método da impedância eletromecânica (E/M), que tem como etapa fundamental a medição da impedância elétrica do transdutor utilizado.

O princípio do método E/M baseia-se em um transdutor piezoelétrico, tipicamente uma cerâmica fina piezoelétrica, fixado à estrutura a ser monitorada utilizando um adesivo de alta rigidez. Devido ao efeito piezoelétrico, uma conexão é estabelecida entre a impedância elétrica do transdutor e a impedância mecânica da estrutura monitorada. Uma vez que a impedância mecânica da estrutura seja alterada com um dano estrutural, tal dano pode ser detectado

medindo-se e analisando a impedância elétrica do transdutor piezoelétrico (PARIDA; MOHARANA, 2023).

A impedância elétrica do transdutor é obtida em um intervalo de frequências que contêm picos relacionados às frequências naturais da estrutura monitorada. O dano estrutural causa alterações na impedância elétrica que são principalmente observadas nos picos de ressonância. Dessa forma, um sistema de medição deve ser capaz de medir pequenas variações em picos de ressonância tal que um dano estrutural em estágio inicial possa ser efetivamente detectado.

Pesquisadores têm utilizado analisadores comerciais de impedância elétrica tanto quanto desenvolvido sistemas alternativos de medição focando em custo, faixas de frequências, taxa de amostragem, resolução de frequência, amplitude do sinal de excitação e medições com múltiplos transdutores. Entretanto, o número de ciclos do sinal de excitação não tem sido suficientemente tratado na literatura. Ou seja, até os trabalhos apresentados na atualidade, não houve preocupação entre os pesquisadores a respeito do tempo apropriado que o transdutor e a estrutura monitorada devam ser excitados para obter as assinaturas de impedância elétrica.

Em contraste à impedância elétrica de componentes comuns, a impedância elétrica de um transdutor piezoelétrico em aplicações de sistemas de SHM depende da resposta dinâmica da estrutura monitorada. De acordo com essa resposta dinâmica, a estrutura leva um certo tempo, que está relacionado aos ciclos de excitação, para alcançar o pico máximo de ressonância. Portanto, analisar o impacto do número de ciclos de excitação sobre medições de impedância elétrica é crucial para obter um desempenho otimizado em aplicações de sistemas de SHM.

A presente tese apresenta uma análise teórica e experimental dos efeitos do número de ciclos do sinal de excitação sobre a medição da impedância elétrica. De acordo com a revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, esta tese é a primeira a relatar a análise detalhada do efeito do número de ciclos de excitação sobre sistemas de medição para aplicações de SHM baseadas na impedância eletromecânica.

Os resultados relatados aqui estão baseados em métodos bem conhecidos e facilmente aplicáveis que podem ser úteis para os pesquisadores em configurar diferentes sistemas de medição de impedância elétrica que utilizam sinais senoidais para a excitação de transdutores piezoelétricos, particularmente aqueles baseados em dispositivos de aquisição de dados (DAQ – *Data Acquisition*) (BUDOYA; BAPTISTA, 2023; DA SILVA; YANO; GONZALES-BUENO, 2021; MAIO, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2023; ZHANG; XU; YAN, 2020).

Os resultados mostraram que o número de ciclos depende do fator de amortecimento da estrutura monitorada. Com isso, ao excitar o transdutor com o correto número de ciclos, há a viabilidade dos picos de ressonância serem apropriadamente detectados nas assinaturas de

impedância elétrica e, conseqüentemente, a detecção de dano estrutural tanto quanto a reprodutibilidade das medições são melhoradas.

1.2. Organização da tese

A tese está organizada como segue:

- Capítulo 1: Introdução sobre sistemas de SHM, assim como de sistemas baseados na técnica da impedância E/M, apresentação da motivação e objetivos para a realização da tese e prévia sobre os resultados alcançados;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre a abordagem dos ciclos de excitação na literatura;
- Capítulo 3: Apresentação do princípio do método E/M e o sistema de medição.
- Capítulo 4: Análise teórica da conexão entre o requerido número de ciclos do sinal de excitação e o fator de amortecimento da estrutura monitorada;
- Capítulo 5: Apresentação da metodologia para quatro estruturas de diferentes tamanhos e materiais;
- Capítulo 6: Resultados e discussões;
- Prossegue-se, então, para a Conclusão e as Referências bibliográficas.

2. ABORDAGEM DOS CICLOS DE EXCITAÇÃO NA LITERATURA

Os pesquisadores Li, Luo e Ai (2023) utilizaram o analisador de impedância elétrica *Agilent 4294A* para obter as assinaturas de impedância elétrica de um encapsulamento cerâmico de titanato zirconato de chumbo (PZT) fixado a um cubo de concreto. O transdutor foi excitado com uma tensão senoidal de 1 V e a impedância elétrica foi medida em uma banda de frequências de 40 Hz até 400 kHz com 801 pontos de resolução.

O mesmo modelo de instrumento configurado com um sinal de excitação senoidal de 1 V e uma banda de frequências de 10 kHz até 1 MHz com 800 pontos de varredura foi utilizado por Liu e Feng (2021) para obter a impedância elétrica de transdutores PZT para monitorar a corrosão em chapas de aço inoxidável.

No estudo efetuado por Duddi, Kocherla e Subramaniam (2023), um analisador de impedância elétrica *Wayne Kerr 6500B* foi utilizado para medir a impedância elétrica de um encapsulamento de PZT embutido em concreto. Os autores configuraram o instrumento para aplicar uma tensão de 1 V aos terminais do transdutor e a impedância elétrica foi obtida em uma banda de frequências de 10 kHz até 500 kHz com 1200 pontos de resolução.

Uma solução que tem sido recentemente utilizada por muitos pesquisadores é o chip AD5933 da *Analog Devices*, um conversor de impedância de alta precisão (ANALOG DEVICES, 2023). O AD5933 permite ao usuário programar o número de ciclos do sinal de excitação senoidal até um máximo de 2044 ciclos. Entretanto, esta configuração não é normalmente considerada pelos pesquisadores.

Alexander *et al.* (2023) utilizaram o painel de circuitos de avaliação do chip AD5933 para monitorar a cura de argamassa de cimento baseada no método E/M. O mesmo painel de circuitos de avaliação foi utilizado por Tan *et al.* (2023) junto com um sistema de calibração para detectar afrouxamento de parafuso sobre uma chapa de aço, e por Placidi *et al.* (2023) para medir o conteúdo de água no solo em agricultura. Em nenhum desses estudos os autores mencionaram o ajuste do número de ciclos do sinal de excitação.

A impedância elétrica do transdutor pode ser também medida utilizando instrumentos comuns de laboratório. Por exemplo, Maio *et al.* (2023) utilizaram um computador pessoal consistindo de um gerador de função para excitar o transdutor e um osciloscópio para adquirir o sinal de resposta. Transdutores de PZT fixados com epóxi a uma chapa composta foram excitados com um sinal senoidal de 100 V_{pp} em um intervalo de frequências de 100 até 400

kHz para medir a impedância elétrica e monitorar acréscimos lentos de camadas de gelo. Os autores não relatam o número de ciclos do sinal de excitação.

Dispositivos de aquisição de dados (DAQ) multifuncionais têm sido largamente utilizados para o desenvolvimento de plataformas de medição de SHM baseados em vários métodos de detecção de dano estrutural (LAMBINET; KHODAEI, 2022). Esses dispositivos podem ter várias entradas e saídas analógicas, que permitem a excitação e a aquisição de sinais de múltiplos transdutores. Sistemas de medição baseados sobre dispositivos DAQ permitem a escolha de tipos diferentes de sinal de excitação além do sinal de excitação senoidal convencional, com o sinal *chirp* sendo um dos mais utilizados em aplicações SHM, já que realiza uma varredura em frequência em um tempo curto (XU; GAO; DENG, 2023).

Dispositivos DAQ têm também sido utilizados para o desenvolvimento de sistemas de medição para o método E/M, que é o foco principal desta tese. Da Silva, Yano e Gonzales-Bueno (2021) utilizaram o modelo DAQ NI USB-6211 para medir a impedância de um transdutor PZT fixado a uma viga de alumínio para analisar a eficiência de um método de compensar os efeitos da variação de temperatura. O transdutor foi excitado com um sinal *chirp* com uma amplitude de 1 V no intervalo de frequências de 0 até 125 kHz.

Zhang, Xu e Yan (2020) aplicaram o método E/M para dois encapsulamentos de polivinilideno difluorido (PVDF) colados a uma viga em balanço, um dos quais foi utilizado como um atuador e o outro como um sensor. A medição de impedância elétrica foi realizada utilizando o DAQ NI USB-6351 e os transdutores foram excitados com ambos os sinais senoidal e *chirp* com uma amplitude de 2 V.

Maio (2019) recomendou o método E/M para aplicações de remoção de gelo, onde a medição de impedância elétrica foi realizada utilizando um DAQ NI USB-6366. O transdutor piezoelétrico foi excitado com uma varredura do sinal senoidal com amplitude de 5 V.

Uma plataforma de medição contendo E/M e métodos de ondas guiadas foi proposto por Rodrigues *et al.* (2023) para detectar o dano estrutural em estruturas compostas. A impedância elétrica dos transdutores piezoelétricos foi medida utilizando um dispositivo DAQ modular NI PXI-8802 com um sinal de excitação *chirp* variando de 10 kHz até 600 kHz.

Portanto, de acordo com os estudos relacionados anteriormente, existem muitos modos de medir a impedância elétrica de transdutores piezoelétricos no método E/M. Entretanto, não existe usualmente preocupações entre os pesquisadores em relação ao tempo requerido para o sinal de excitação ser aplicado ao transdutor piezoelétrico. Por outro lado, de acordo com os resultados relatados por Budoya e Baptista (2018), quando o transdutor é excitado com um sinal senoidal, o número de ciclos de excitação significativamente afeta a impedância elétrica medida

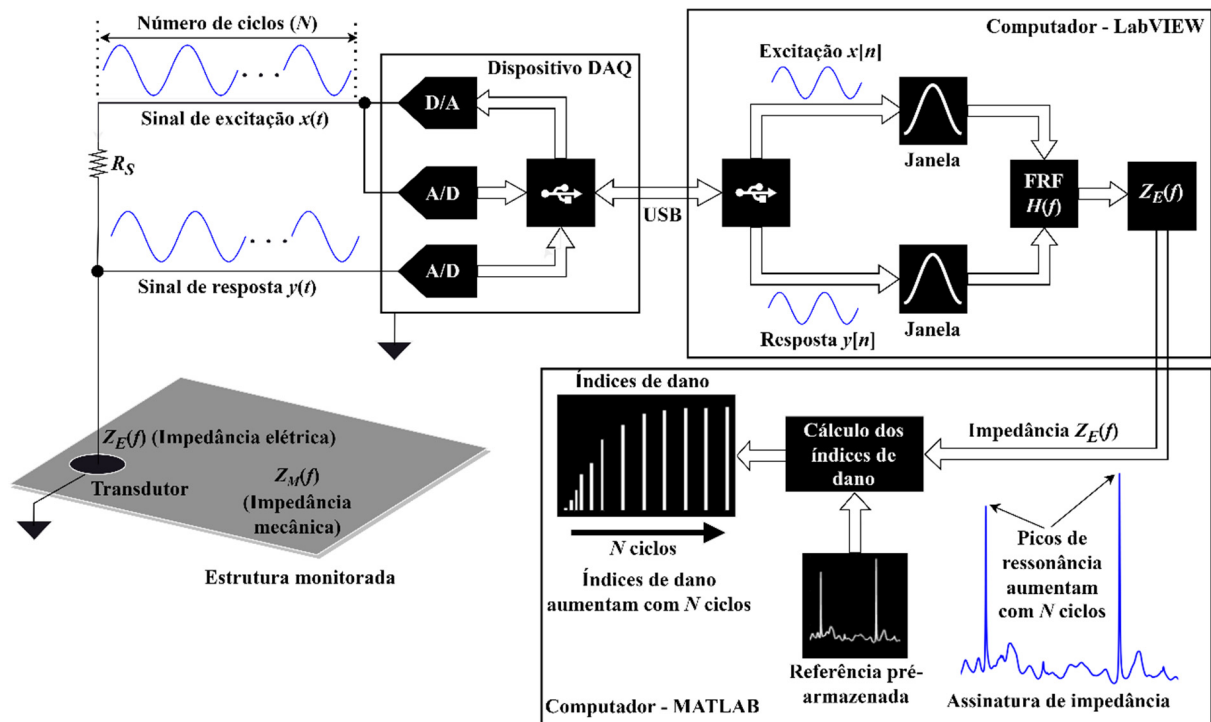
em frequências em torno dos picos de ressonância. No próximo capítulo, a técnica da impedância eletromecânica e os sistemas de medição são apresentados com mais detalhes.

3. O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA E O SISTEMA DE MEDIÇÃO

O método da impedância eletromecânica (E/M) para detectar dano estrutural tem sido largamente relatado na literatura em décadas recentes. Nesta tese, um breve resumo é apresentado, uma vez que o foco está em analisar os efeitos do número de ciclos do sinal de excitação sobre a medição da impedância elétrica.

Na Figura 1, é apresentado um sistema de SHM em que um transdutor piezoelétrico com impedância elétrica $Z_E(f)$ está fixado à estrutura a ser monitorada com impedância mecânica $Z_M(f)$. Devido ao efeito piezoelétrico, uma relação é estabelecida entre a impedância mecânica da estrutura $Z_M(f)$ e a impedância elétrica do transdutor $Z_E(f)$.

Figura 1 - Sistema de medição baseado no método da impedância eletromecânica.



Fonte: Autoria própria.

O sistema de medição excita o transdutor piezoelétrico e a estrutura monitorada com uma frequência f que varia dentro de uma determinada banda de frequências enquanto fornece a impedância elétrica do transdutor. Este sistema é similar a outros sistemas de medição baseados em dispositivos DAQ (BUDOYA; BAPTISTA, 2023; DA SILVA; YANO; GONZALES-BUENO, 2021; MAIO, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2023; ZHANG; XU; YAN, 2020). No

entanto, o número de ciclos de excitação é levado em conta no momento da configuração do sistema.

Os pesquisadores têm proposto modelos avançados para a relação entre a impedância elétrica do transdutor piezoelétrico e a impedância mecânica da estrutura sob análise, tais como modelos tridimensionais. Entretanto, um modelo unidimensional simples, apresentado na Equação (1), para exemplificar a conexão entre as duas impedâncias é fornecido por Liang, Sun e Rogers (1997) como:

$$Z_E(f) = \frac{1}{j2\pi fC} \left[1 - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T} \frac{Z_M(f)}{Z_M(f) + Z_T(f)} \right]^{-1}, \quad (1)$$

em que $Z_E(f)$ é a impedância elétrica do transdutor na frequência f ; j é a unidade imaginária; C é a capacitância estática do transdutor piezoelétrico; d_{31} é a constante piezoelétrica da cerâmica no sistema natural de eixos de coordenadas sob hipótese unidirecional; s_{11}^E é a constante de tendência elástica em campo elétrico constante da cerâmica piezoelétrica no sistema natural de eixos de coordenadas sob hipótese unidirecional; ε_{33}^T é a constante dielétrica da cerâmica piezoelétrica em tensão mecânica constante no sistema natural de eixos de coordenadas sob hipótese unidirecional; $Z_M(f)$ é a impedância mecânica da estrutura monitorada na frequência f ; e $Z_T(f)$ é a impedância mecânica do transdutor na frequência f .

Portanto, de acordo com a Equação (1), a impedância elétrica do transdutor $Z_E(f)$ está relacionada à impedância mecânica da estrutura monitorada $Z_M(f)$. Logo, se o sistema de medição excita o transdutor variando a frequência f em determinada banda de frequências, a assinatura de impedância elétrica medida apresenta picos de ressonância relacionados às frequências naturais da estrutura monitorada, conforme apresentado na Figura 1.

O sistema de medição utilizado nesta tese é baseado em um dispositivo DAQ multifuncional com conversor digital-analógico (DAC) e conversor analógico-digital (ADC). O transdutor piezoelétrico em série com o resistor R_S é excitado por um sinal $x(t)$ senoidal. Tanto a amplitude do sinal de excitação senoidal, $x(t)$, quanto a amplitude do sinal de resposta do transdutor piezoelétrico, $y(t)$, são amostrados e processados na forma de tempo discreto, respectivamente, $x[n]$ e $y[n]$, em um computador com software LabVIEW conectado ao dispositivo DAQ via barramento serial universal (USB).

A excitação em tempo discreto e os sinais de resposta são janelados utilizando a janela de Hanning, que tem se demonstrado conveniente para sinais de excitação senoidais, e a função de resposta em frequência (FRF) pode, então, ser facilmente obtida por estimativa espectral

(BUDOYA; BAPTISTA, 2023; MAIO, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2023). *Softwares* como o LabVIEW têm rotinas já prontas para a obtenção da FRF, permitindo a configuração de vários outros parâmetros como o tipo de janela utilizado.

Na presente tese, a FRF foi calculada similarmente ao trabalho de Budoya e Baptista (2018) utilizando a estimativa espectral, e é apresentada na Equação (2) como:

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}, \quad (2)$$

em que $S_{xy}(f)$ é o espectro de potência cruzada entre os sinais de excitação e resposta; e $S_{xx}(f)$ é o autoespectro de potência do sinal de excitação. Com a obtenção da FRF, e dado que a impedância de entrada do dispositivo DAQ é elevada, a impedância elétrica do transdutor piezoelétrico é apresentada na Equação (3) e pode ser obtida como (BUDOYA; BAPTISTA, 2023; MAIO, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2023):

$$Z_E(f) = R_S \frac{H(f)}{1-H(f)}, \quad (3)$$

em que $Z_E(f)$ é a impedância elétrica; R_S é o valor do resistor conectado em série com o transdutor piezoelétrico; e $H(f)$ é a Função de Resposta em Frequência.

O tempo de excitação do transdutor piezoelétrico e da estrutura monitorada varia de acordo com o número de ciclos (N) do sinal de excitação senoidal, como já enunciado e também apresentado na Figura 1, causando variações nos picos de ressonância natural da impedância mecânica da estrutura, e refletida para a impedância elétrica do transdutor.

Portanto, conforme já mencionado, esta tese visou analisar os efeitos do número de ciclos sobre a medição de impedância elétrica. De acordo com os resultados, o número de ciclos significativamente afeta a amplitude dos picos de ressonância das assinaturas de impedância elétrica e, portanto, ele é um importante parâmetro para melhorar a detecção de um dano estrutural em sistemas de SHM, mas que não tem sido suficientemente testado na literatura.

Para averiguação, os efeitos dos ciclos de excitação sobre a detecção do dano estrutural foram quantitativamente avaliados calculando-se índices de danos utilizando o software MATLAB. Tipicamente, os índices de danos são calculados comparando-se duas assinaturas de impedância elétrica, onde uma delas é coletada e pré-armazenada quando a estrutura está em um estado considerado íntegro para que seja utilizada como uma referência (linha de base ou

baseline) para medições posteriores. Os índices de danos utilizados nesta tese estão detalhados no Capítulo 5.

4. EFEITOS DOS CICLOS DE EXCITAÇÃO SOBRE MEDIÇÕES DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

Uma vibração é, em seu sentido geral, um movimento periódico; isto é, um movimento que se repete em todos os sentidos após certo intervalo de tempo, chamado período da vibração. O movimento vibratório fica definido pelas seguintes grandezas: deslocamento, velocidade, aceleração, amplitude e frequência. Cada elemento dentro de uma estrutura possui uma frequência angular natural. Se uma excitação qualquer tiver uma frequência igual ou múltiplo inteiro àquela de ressonância de um dado elemento, um pico de ressonância aparecerá.

O registro das vibrações é efetuado por meio de transdutores ou captadores colocados em pontos estratégicos das estruturas. Esses transdutores transformam a energia mecânica de vibração em sinais elétricos. As estruturas são sempre projetadas para que as frequências de ressonância não ocorram em regime normal de funcionamento. A resposta forçada para um carregamento harmônico descreve o comportamento de um oscilador sujeito a uma força externa totalmente harmônica. Um caso extremo de uma vibração forçada é o causado por um terremoto.

Uma das técnicas para monitoramento de integridade estrutural é baseada na impedância eletromecânica, que é simples e utiliza componentes de baixo custo como os transdutores piezoelétricos. Nessa técnica, os danos estruturais, que são quaisquer alterações na estrutura que comprometem sua integridade atual ou futura, podem ser detectados em tempo real ou não. Basicamente, a técnica consiste na instalação de transdutores piezoelétricos na estrutura a ser monitorada. Devido ao efeito piezoelétrico, uma conexão é estabelecida entre a impedância elétrica do transdutor e a impedância mecânica da estrutura monitorada. Portanto, o dano estrutural pode ser detectado pela medição e análise da impedância elétrica do transdutor.

Tipicamente, a detecção do dano implica em comparar o estado atual da estrutura com um estado anterior considerado íntegro, que é utilizado como uma referência. Essa comparação é feita por meio de índices de danos e em faixas de frequências apropriadas. Sistemas que monitoram e detectam danos estruturais permitem um alto grau de segurança e a redução dos custos de manutenção, sendo, portanto, de interesse científico e econômico. As aplicações mais comuns desses sistemas estão em aviões, edifícios, estações espaciais, estradas, helicópteros, oleodutos de indústrias petroquímicas, oleodutos de indústrias químicas, navios, plataformas petrolíferas, pontes, satélites, submarinos, entre outras.

Portanto, esta tese tem como foco a investigação de sistemas de monitoramento de integridade estrutural com transdutores piezoelétricos, principalmente os baseados na impedância eletromecânica, e em como tais sistemas reagem a variações na quantidade de ciclos utilizados no sinal de excitação. Entre os objetivos estão o desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados e medição de sinais dos transdutores e técnicas avançadas de processamento de sinais. As frequências angulares naturais das estruturas monitoradas foram calculadas de acordo com a Equação (4):

$$\omega = \left(\frac{96.E.I}{m.l^3} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

em que E é o módulo de Young do material da estrutura monitorada; I é o momento de inércia de área da estrutura monitorada; m é a massa da estrutura monitorada; e l é o comprimento da estrutura monitorada.

Como discutido nos capítulos anteriores, os números de ciclos do sinal de excitação tipicamente não são de interesse para os pesquisadores quando medindo impedância elétrica no método E/M para detecção de dano estrutural. Entretanto, os picos de ressonância observados nas assinaturas de impedância elétricas estão relacionados à vibração da estrutura monitorada em suas frequências naturais.

A intensidade de vibração da estrutura em suas frequências naturais quando excitada por uma carga externa variando harmonicamente depende do fator de amortecimento da estrutura. Portanto, a vibração máxima não é alcançada imediatamente quando a carga externa é aplicada, mas cresce progressivamente. Em uma análise simplificada, a intensidade relativa de vibração de uma estrutura sob excitação harmônica é fornecida aproximadamente pela Equação (5) (CLOUGH; PENZIEN, 2003):

$$R(t) \cong \frac{1 - e^{-\xi 2\pi f t}}{2\xi} \cos(2\pi f t), \quad (5)$$

em que $R(t)$ é a intensidade relativa de vibração à frequência de excitação f igual à frequência natural da estrutura monitorada; ξ é o fator de amortecimento da estrutura monitorada; e t é a variável tempo.

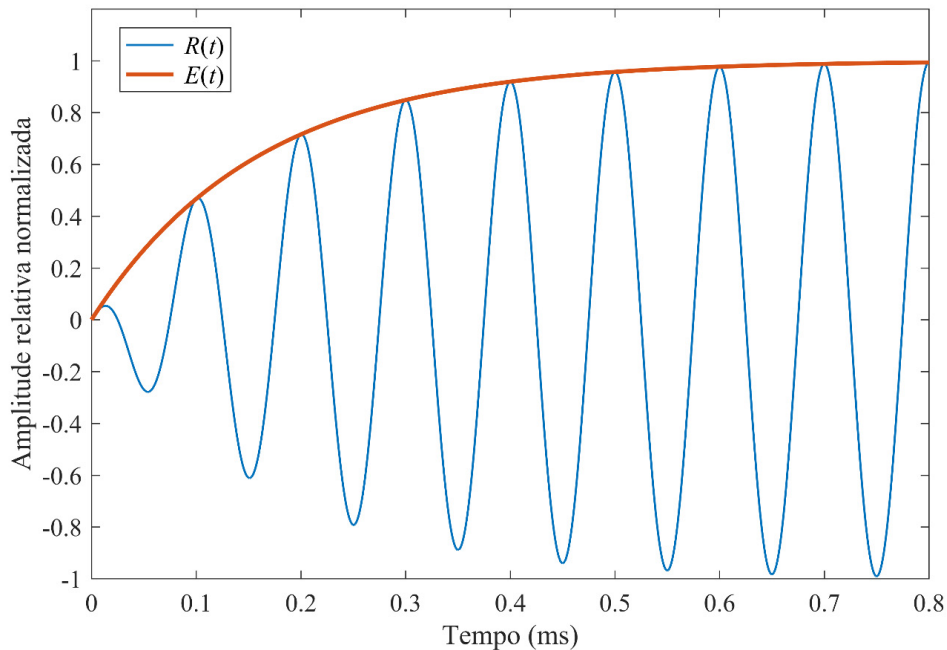
É importante notar que a intensidade relativa de vibração $R(t)$ fornecida na Equação (5) é válida para sistemas estruturais subamortecidos, onde $\xi < 1$, que é uma condição comumente encontrada em estruturas práticas (CLOUGH; PENZIEN, 2003). Todas as estruturas testadas nesta tese, conforme descritas no Capítulo 5, são consideradas subamortecidas.

De acordo com a Equação (5), pode ser claramente observado que a intensidade relativa da vibração varia com a envoltória $E(t)$ fornecida na Equação (6) como:

$$E(t) = \frac{1 - e^{-\xi 2\pi f t}}{2\xi}. \quad (6)$$

Na Figura 2, como exemplo, estão apresentadas a intensidade relativa de vibração $R(t)$ e a envoltória $E(t)$ em uma estrutura com fator de amortecimento $\xi = 0,1$ à frequência de 10 kHz.

Figura 2 - Intensidade relativa de vibração $R(t)$ e a envoltória $E(t)$ com amplitudes normalizadas para um valor máximo de 1.



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser visto na Figura 2, a intensidade relativa de vibração máxima não é alcançada imediatamente, mas ela tende assintoticamente em direção a um valor máximo depois de um determinado número de ciclos. Quanto menor o fator de amortecimento da estrutura, mais ciclos são requeridos para a estrutura alcançar a máxima vibração.

Portanto, o sistema de medição será capaz de fornecer assinaturas de impedância elétrica com máximos picos de ressonância quando a estrutura monitorada tiver alcançado a máxima

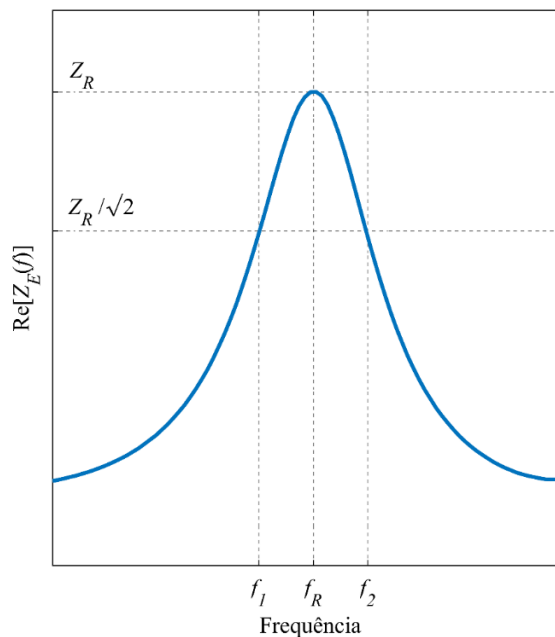
intensidade relativa de vibração. Dessa forma, conhecer o número de ciclos necessários para a envoltória alcançar o valor máximo, conforme mostrado na Figura 2, é essencial para a medição apropriada da impedância elétrica do transdutor piezoelétrico.

De acordo com as Equações (5) e (6), o número de ciclos requeridos em uma determinada frequência depende do fator de amortecimento ξ da estrutura. Há vários métodos para calcular o fator de amortecimento, sendo um dos mais utilizados o método de largura de banda de meia potência (PAPAGIANNOPOULOS; HATZIGEORGIU, 2011). Este método tem como seu princípio a resposta da frequência em torno da frequência natural.

Na presente tese, este método é aplicado à parte real da assinatura de impedância elétrica para calcular o fator de amortecimento e não requer procedimentos complexos ou medições adicionais além daquelas já comumente fornecidas no método E/M.

Como apresentado na Figura 1, desde que a amplitude do sinal de excitação $x(t)$ e o resistor R_S sejam constantes, a impedância elétrica do transdutor é aproximadamente proporcional ao sinal de resposta $y(t)$, que depende da vibração da estrutura. Na Figura 3, é mostrada a aplicação do método, apresentando a parte real da assinatura de impedância elétrica em torno do pico de ressonância obtido experimentalmente para uma das estruturas analisadas neste trabalho.

Figura 3 – Método da largura de banda de meia potência utilizando a parte real da assinatura de impedância elétrica para calcular o fator de amortecimento da estrutura.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 3, o fator de amortecimento é aproximadamente fornecido pela Equação (7) como (PAPAGIANNOPOULOS; HATZIGEORGIOU, 2011):

$$\xi \cong \frac{f_2 - f_1}{2f_R}, \quad (7)$$

em que ξ é o fator de amortecimento; f_R é a frequência correspondente ao pico de ressonância Z_R da parte real da impedância elétrica; f_1 é uma frequência correspondente a $Z_R/(\sqrt{2})$; e f_2 é a outra frequência correspondendo a $Z_R/(\sqrt{2})$, sendo $f_2 > f_1$.

É importante notar que, embora este método seja fácil de aplicar, ele tem a desvantagem de requerer um número suficientemente alto de ciclos de excitação em um teste inicial, tal que o máximo pico de ressonância seja alcançado, que na prática é obtido quando um aumento no pico de ressonância Z_R não seja mais perceptível. Por outro lado, isso não é um problema crítico, desde que em um teste inicial seja analisada uma banda estreita em volta do pico de ressonância, conforme mostrado na Figura 3.

Vários testes práticos foram executados para verificar os efeitos do número de ciclos de excitação sobre a medição de impedância elétrica e a metodologia aplicada nesta tese é apresentada no próximo capítulo.

5. METODOLOGIA

Testes experimentais foram executados sobre quatro estruturas de diferentes dimensões, três feitas de alumínio e uma feita de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP, do termo em inglês *carbon fiber-reinforced plastic*).

São apresentadas, na Tabela I, todas as dimensões e massas das estruturas que foram utilizadas nos testes práticos, e classificadas de 1 até 4.

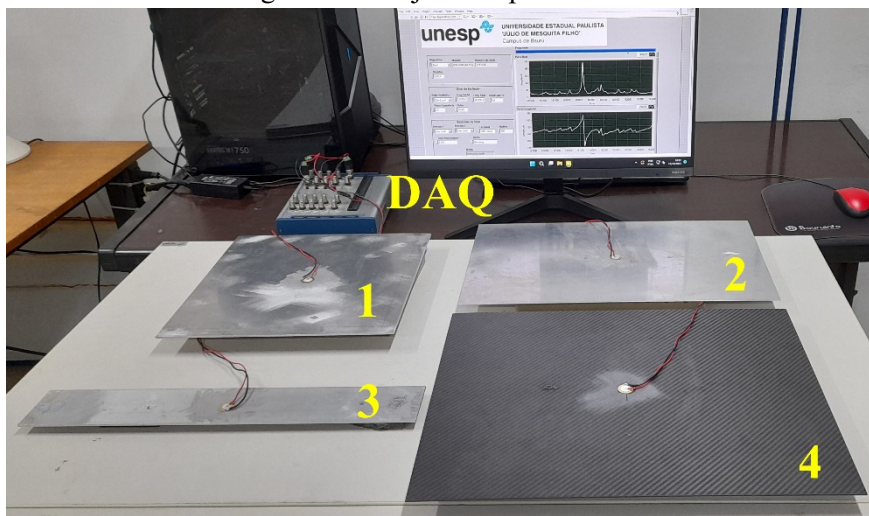
Tabela I - Estruturas utilizadas nos testes experimentais.

Estrutura	Material	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)
1	Alumínio	340	340	3	928
2	Alumínio	495	305	1	410
3	Alumínio	500	75	3	314
4	CFRP	500	400	2	628

Um diafragma piezoelétrico, modelo 7BB-20-6, com as seguintes especificações: 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, da *Murata Electronics* (Smyrna, GA, USA) foi colado no centro de cada estrutura utilizando adesivo à base de cianoacrilato.

A impedância elétrica dos transdutores foi medida utilizando o sistema apresentado na Figura 4, onde um dispositivo DAQ, USB-6366-BNC, da *National Instruments*, foi conectado a um computador com *software* LabVIEW.

Figura 4 – Conjunto experimental.



Fonte: Autoria própria.

Para o resistor R_S , conectado em série com o transdutor piezoelétrico, foi escolhido um valor de 3,3 k Ω de acordo com o acionamento da corrente de saída do DAQ. Os transdutores piezoelétricos foram excitados com um sinal senoidal com um pico de tensão de 5 V em uma banda de frequências de 2 até 200 kHz, com um passo de 2 Hz. A excitação do transdutor e os sinais de resposta foram lidos a uma taxa de amostragem de 2 MHz, que é 10 vezes maior do que a frequência máxima de excitação.

5.1. Primeiro Teste

No primeiro teste, para cada estrutura, foi escolhido um alto pico de ressonância isolado de outros picos na assinatura de impedância elétrica para calcular o fator de amortecimento utilizando a Equação (7). Os picos de ressonância escolhidos estão apresentados na Tabela II.

Tabela II - Estruturas e picos de ressonância escolhidos.

Estrutura	Pico de ressonância (kHz)
1	181
2	45
3	116
4	155

Conforme citado no Capítulo 4, calcular o fator de amortecimento utilizando o método de largura de banda de meia potência (PAPAGIANNOPOULOS; HATZIGEORGIU, 2011) requer um alto número de ciclos de excitação em um teste inicial, que nesta tese foi realizado com 15000 ciclos em torno de cada pico de ressonância.

Depois de calcular os fatores de amortecimento, as envoltórias teóricas, $E(t)$, foram obtidas utilizando a Equação (6), bem como foram estimados o número de ciclos de excitação requeridos para o sistema de medição fornecer uma assinatura de impedância elétrica com picos de ressonância de amplitude máxima.

5.2. Segundo Teste

No segundo teste, as assinaturas de impedância elétrica foram obtidas em torno dos picos de ressonância escolhidos no primeiro teste, variando o número de ciclos do sinal de excitação entre 10 e 15000 ciclos. Como apresentado na Figura 1, a FRF, $H(f)$, para calcular a

impedância elétrica, foi obtida com um pequeno número de ciclos finais em cada iteração, tal que a impedância elétrica fornecida pelo sistema de medição corresponde aproximadamente à vibração alcançada pela estrutura no fim de cada iteração. As FRFs para diferentes quantidades de ciclos utilizados nas medições foram calculadas com base em quantidades distintas de ciclos no final dos sinais, mas todas com janela Hanning. Os valores estão resumidos na Tabela III.

Tabela III - Número de ciclos finais para cálculo da FRF e intervalos de ciclos das medições.

Ciclos finais para FRF	Intervalos de ciclos
5	10 até 100
20	100 até 15000

Medindo-se a amplitude do pico de ressonância em cada iteração, as envoltórias experimentais foram obtidas para cada estrutura, tornando possível experimentalmente determinar o número requerido de ciclos de excitação.

5.3. Terceiro Teste

Em um terceiro teste, a influência do número de ciclos do sinal de excitação sobre a detecção de dano estrutural foi analisada. O dano estrutural foi simulado colando um pino de aço inoxidável de 1g (massa de calibração) para cada estrutura, a 100 mm de distância do transdutor, na sua direção longitudinal.

As assinaturas de impedância elétrica, em uma banda de frequências em torno dos picos de ressonância escolhidos no primeiro teste, foram medidas para as estruturas nas condições íntegra e danificada e utilizando diferentes números de ciclos do sinal de excitação.

Têm sido propostos muitos índices de detecção de dano com abordagem sem utilização de uma medição de referência (ou *baseline*) para o método E/M e outros sistemas de SHM (HE *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2023; LU *et al.*, 2023). No entanto, nesta tese, o dano estrutural foi quantificado utilizando os índices tradicionais, apresentados na Tabela IV.

Tabela IV - Índices para quantificar o dano estrutural.

Sigla	Significado
RMSD (<i>Root Mean Square Deviation</i>)	Desvio da raiz média quadrática
CCD (<i>Correlation Coefficient Deviation</i>)	Desvio do coeficiente de correlação

Estes índices são calculados utilizando uma medição de referência, sem danos, e são largamente relatados na literatura (MAIO *et al.*, 2023; LI *et al.*, 2023; LIU; FENG, 2021; TAN *et al.*, 2023). O índice RMSD, apresentado na Equação (8), é obtido como:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{f=1}^K \{Re[Z_{E,D}(f)] - Re[Z_{E,H}(f)]\}^2}, \quad (8)$$

em que K é o número de pontos de frequências na banda analisada; $Re[Z_{E,H}(f)]$ é a parte real da impedância elétrica obtida da estrutura monitorada na condição íntegra (medição de referência ou *baseline*); $Re[Z_{E,D}(f)]$ é a parte real da impedância elétrica obtida da estrutura monitorada na condição danificada.

O índice CCD, apresentado na Equação (9), é dado como:

$$CCD = 1 - C_C, \quad (9)$$

em que C_C é o coeficiente de correlação calculado entre duas assinaturas de impedância elétrica, com $-1 \leq C_C \leq 1$.

5.4. Quarto Teste

No quarto teste, foi avaliada a influência da amplitude do sinal de excitação sobre o requerido número de ciclos para o pico de ressonância máxima. A Estrutura 1 foi escolhida para este teste, e as envoltórias foram obtidas para um sinal de excitação com picos de tensão de 1 V, 5 V e 10 V.

5.5. Quinto Teste

No quinto teste, foi analisada a influência do número de ciclos do sinal de excitação sobre a reprodutibilidade dos resultados. Com uma das estruturas na condição íntegra, 101 medições de impedância elétrica foram coletadas em uma banda de frequências em torno do pico de ressonância utilizando diferentes números de ciclos do sinal de excitação. A primeira assinatura

de impedância elétrica foi utilizada como uma referência para calcular o coeficiente de correlação com as outras medições e obter os correspondentes histogramas.

Vale ressaltar que para todos os testes, todas as medições foram executadas no laboratório com uma temperatura de 23°C controlada por um ar condicionado, e com as estruturas repousando sobre blocos de espuma. Os resultados foram obtidos por uma média de três medições. No Capítulo 6, os resultados são apresentados e discutidos.

6. RESULTADOS

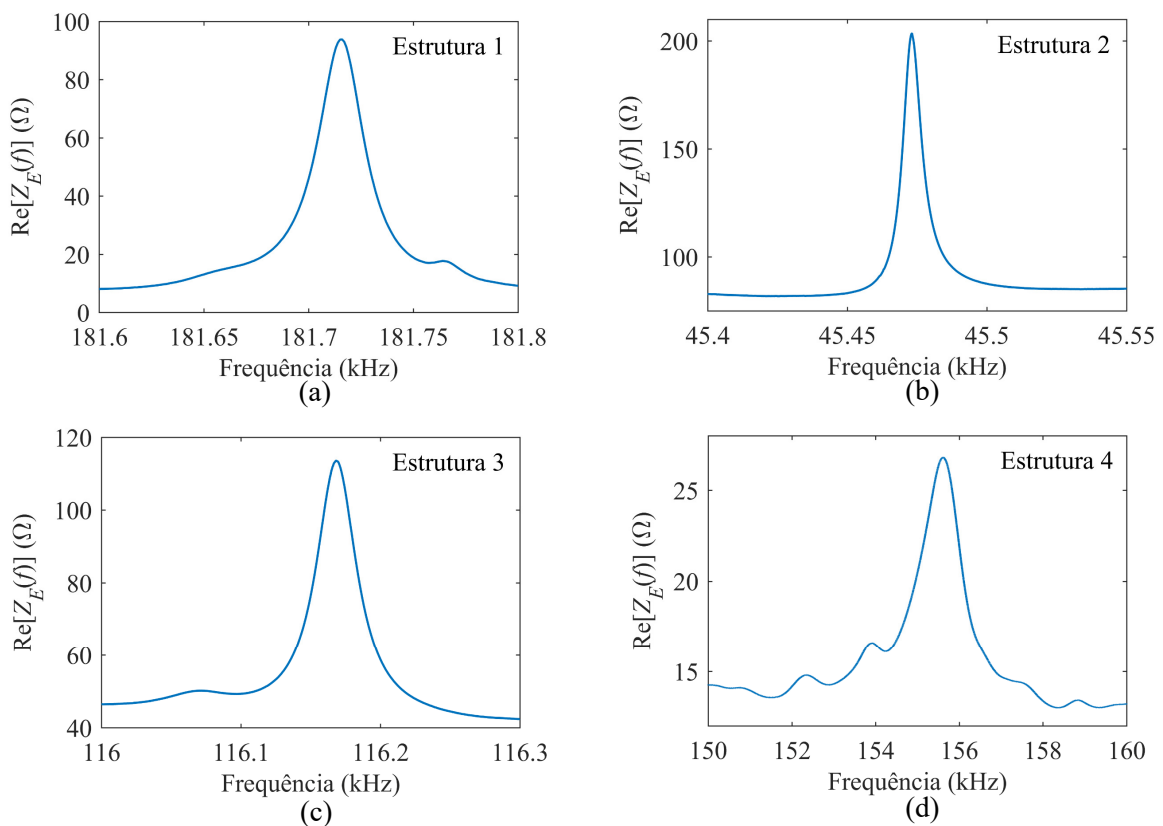
São apresentados e discutidos, neste capítulo, os resultados obtidos nos cinco testes descritos no Capítulo 5.

6.1. Estimando teoricamente o número de ciclos

Em uma análise inicial, as envoltórias $E(t)$ das estruturas foram calculadas utilizando a Equação (6), baseadas no fator de amortecimento obtido experimentalmente utilizando o método de largura de banda de meia potência, apresentado na Figura 3.

Na Figura 5, são apresentadas as partes reais das assinaturas de impedância elétrica em torno dos picos de ressonância escolhidos para as quatro estruturas para o procedimento apresentado no Capítulo 5.

Figura 5 - Parte real da assinatura de impedância elétrica em torno do pico de ressonância utilizada para obter o fator de amortecimento para a estrutura (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4.



Fonte: Autoria própria.

Das curvas dos gráficos da Figura 5, o fator de amortecimento pôde ser calculado utilizando a Equação (7), e os seguintes valores foram obtidos conforme Tabela V.

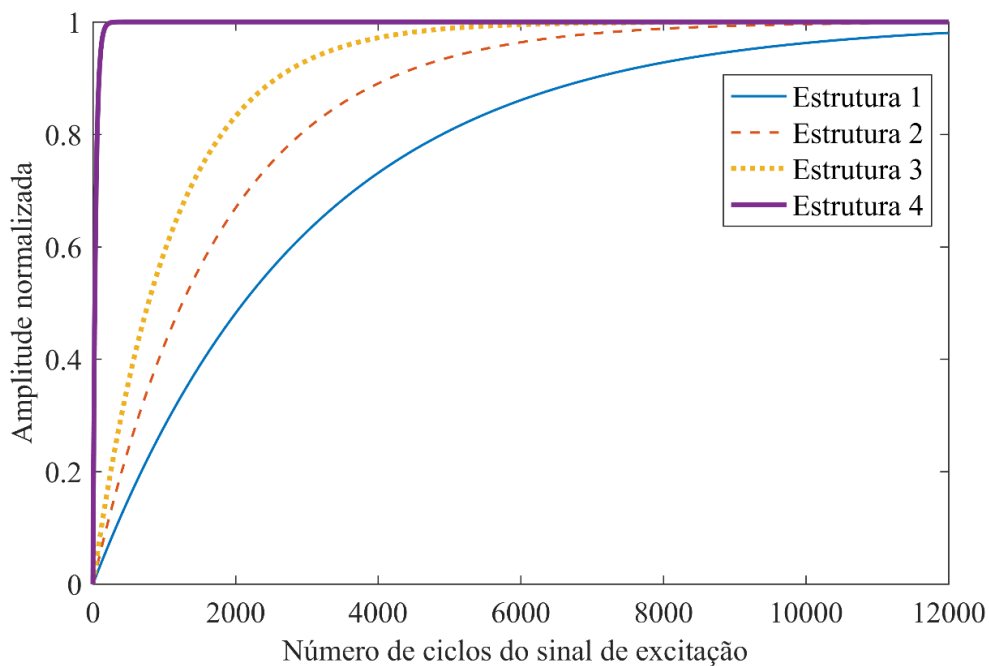
Tabela V - Estruturas e fatores de amortecimento.

Estrutura	Fator de amortecimento
1	$5,23 \times 10^{-5}$
2	$8,80 \times 10^{-5}$
3	$1,42 \times 10^{-4}$
4	$4,31 \times 10^{-3}$

Portanto, a estrutura 4, que é de CFRP, tem um fator de amortecimento significativamente maior do que as estruturas de alumínio, enquanto a estrutura 1 tem o menor fator de amortecimento. É esperado que estruturas com diferentes fatores de amortecimento também requeiram diferentes números de ciclos do sinal de excitação para alcançar a máxima amplitude do pico de ressonância.

Utilizando a Equação (6) o número de ciclos requeridos pode ser teoricamente estimado a partir das envoltórias. Na Figura 6, são apresentadas as amplitudes normalizadas das envoltórias teóricas.

Figura 6 - Amplitudes normalizadas das envoltórias teóricas.



Da Figura 6, o apropriado número de ciclos do sinal de excitação pode ser estimado para cada estrutura. Conforme as envoltórias convergem assintoticamente para o máximo valor, uma amplitude normalizada com um valor de 0,98 está considerada para determinar o número de ciclos, que corresponde a 98% do máximo valor. Utilizando este critério, o requerido número de ciclos para cada estrutura consta na Tabela VI.

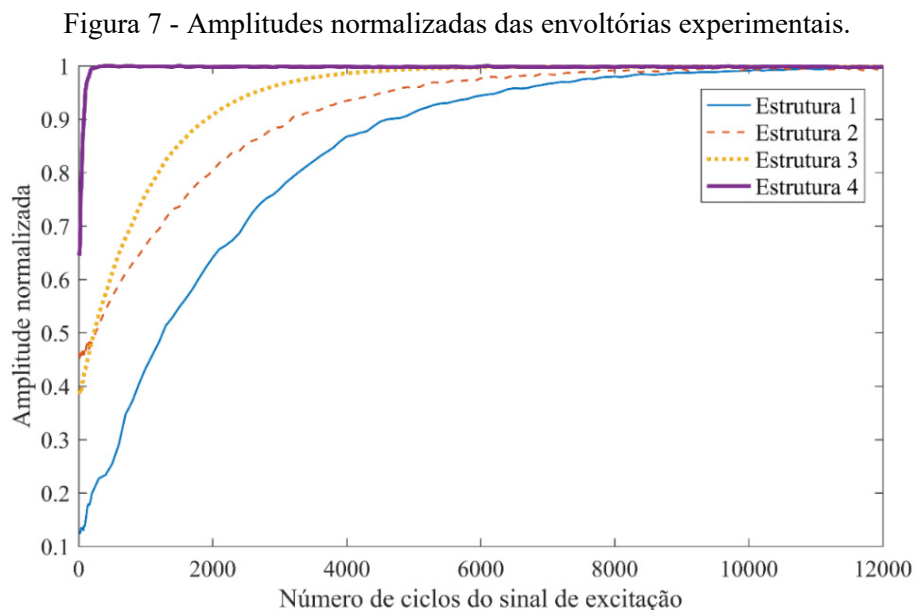
Tabela VI - Estruturas e o requerido número de ciclos.

Estrutura	Requerido número de ciclos
1	11300
2	6700
3	4100
4	140

De acordo com este resultado, diferentes estruturas monitoradas podem requerer significativamente diferentes números de ciclos de excitação do sistema de medição para conseguir a máxima amplitude dos picos de ressonância. Esta hipótese está confirmada pelos resultados experimentais apresentados na seção 6.2.

6.2. Números de ciclos de excitação encontrados experimentalmente

Na Figura 7, são exibidas as amplitudes normalizadas das envoltórias experimentais para as quatro estruturas, obtidas seguindo o procedimento descrito no Capítulo 5.



Fonte: Autoria própria.

Embora os testes tenham sido executados com 15000 ciclos, as curvas na Figura 7 apresentam informações somente até 12000 ciclos pois não existe variação significativa a partir deste valor.

Como as amplitudes normalizadas das envoltórias teóricas, as amplitudes normalizadas das envoltórias experimentais foram normalizadas tomando-se o máximo valor como 1, permitindo a comparação entre elas. Como pode ser visto, as amplitudes normalizadas das envoltórias experimentais seguem a mesma tendência das amplitudes normalizadas das envoltórias teóricas. Além disso, como teoricamente prognosticado, a Estrutura 1 requer o maior número de ciclos e a Estrutura 4, de CFRP, um significativo menor número de ciclos.

Seguindo o mesmo critério adotado para as amplitudes normalizadas das envoltórias teóricas de considerar o número de ciclos correspondendo a 98% da máxima amplitude normalizada, os valores dos números de ciclos encontrados constam na Tabela VII.

Tabela VII - Estruturas e o encontrado número de ciclos.

Estrutura	Número de ciclos encontrado
1	8200
2	6500
3	3700
4	150

Como uma referência, o chip AD5933 (ANALOG DEVICES, 2023) utilizado em muitos sistemas alternativos de medição de impedância elétrica para aplicações de SHM (ALEXANDER *et al.*, 2023; PLACIDI *et al.*, 2023; TAN *et al.*, 2023) permite aos usuários programar o número de ciclos de excitação até um máximo de 2044 ciclos. De acordo com os resultados, este valor é insuficiente para o sistema de medição conseguir máximo desempenho com as Estruturas 1, 2 e 3 analisadas nesta tese. Somente a Estrutura 4, que requer apenas 150 ciclos, teria seus picos de ressonância medidos com o valor máximo do pico de ressonância.

Conforme mencionado antes, os pesquisadores tipicamente não relatam o número de ciclos de excitação em outros sistemas de medição alternativos. Estes sistemas de medição, especialmente aqueles baseados em dispositivos DAQ's, facilmente permitem alterar o número de ciclos de excitação. Dessa forma, os pesquisadores podem seguir o procedimento descrito nesta tese para configurar seus sistemas de medição de acordo com o fator de amortecimento da estrutura monitorada e, com isso, obter um desempenho otimizado em aplicações de SHM.

Na Tabela VIII, é realizada uma comparação do número de ciclos do sinal de excitação com os valores teóricos e práticos.

Tabela VIII - Número de ciclos do sinal de excitação requerido para cada estrutura.

Estrutura	Ciclos teóricos	Ciclos experimentais	Erro (%)
1	11300	8200	-27,4
2	6700	6500	-3,0
3	4100	3700	-9,8
4	140	150	+7,1

Embora o número de ciclos encontrado experimentalmente para a Estrutura 1 divergiu por 27,4% do valor predito teoricamente, os erros das outras estruturas foram abaixo de 10%, com os resultados obtidos para a Estrutura 2 divergindo somente por 3%. Estes resultados são satisfatórios tomando em conta que o cálculo do fator de amortecimento utilizando a Equação (7) é aproximado e que pequenas variações na função exponencial na Equação (6) causam mudanças significativas nas envoltórias.

Para se obter o tempo correspondente a cada quantidade de ciclos, o número de ciclos, N , deve ser multiplicado pelo período do sinal de excitação, $T = 1/(Taxa\ de\ amostragem)$, da seguinte maneira: $t = N.T$. Com isso, considerando as frequências dos picos de ressonância apresentadas na Figura 5, os tempos requeridos constam na Tabela IX.

Tabela IX - Estruturas e tempos requeridos.

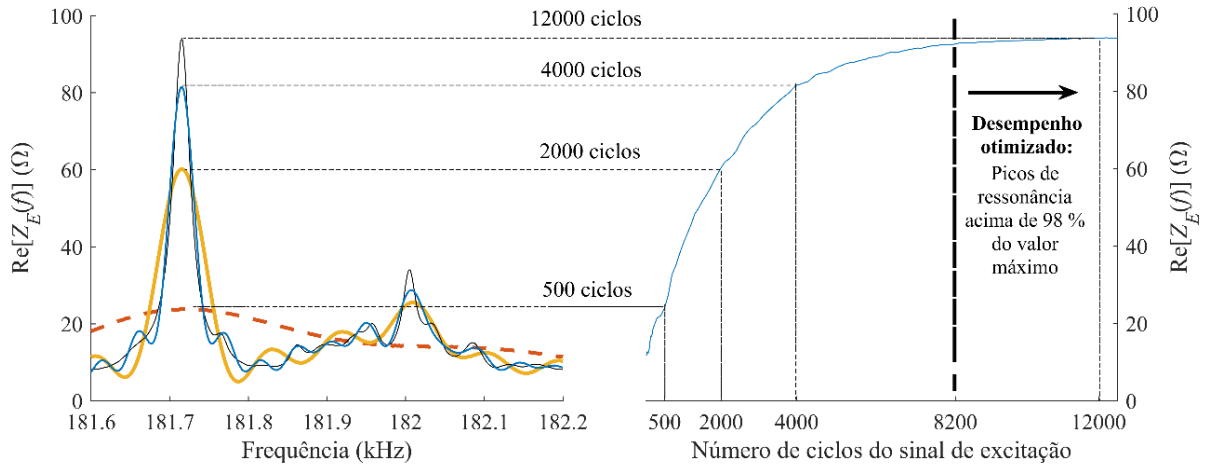
Estrutura	Tempo requerido (ms)
1	45
2	140
3	30
4	1

Estes tempos podem ser pequenos para medições de impedância elétrica em uma única frequência, mas se tornam significativos quando as assinaturas de impedância elétrica são medidas em vários pontos de frequências. Portanto, excitar os transdutores com um número de ciclos além do valor ótimo para alcançar o máximo pico de ressonância não melhora as medições de impedância elétrica e nem a detecção de dano estrutural, conforme apresentado nas próximas seções, e é tempo dissipado.

Os resultados indicam, também, que o número de ciclos do sinal de excitação significativamente afeta a amplitude dos picos de ressonância nas assinaturas de impedância elétrica. Exemplificando, na Figura 8, são apresentadas as partes reais das assinaturas de

impedância elétrica obtidas para a Estrutura 1, que requer o maior número de ciclos, com diferentes ciclos de excitação.

Figura 8 - Efeitos dos números de ciclos do sinal de excitação sobre os picos de ressonância da parte real da impedância elétrica obtida para a Estrutura 1.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 8, com 500 ciclos do sinal de excitação, praticamente nenhum pico de ressonância pôde ser detectado nas assinaturas de impedância elétrica. Em 2000 ciclos, o principal pico de ressonância alcançou aproximadamente 60% da amplitude máxima obtida com 12000 ciclos e, em 4000 ciclos, o principal pico de ressonância atingiu cerca de 85% da amplitude máxima obtida a 12000 ciclos. Desde 8200 ciclos, os picos de ressonância alcançam 98% do máximo valor, que tem sido considerado o desempenho otimizado nesta tese, conforme apresentado na Figura 8 e Tabela VIII.

Portanto, sistemas de medição de impedância elétrica que utilizam um sinal senoidal para excitar transdutores piezoelétricos podem ter o desempenho otimizado ajustando o apropriado número de ciclos de excitação de acordo com o fator de amortecimento da estrutura monitorada, calculado utilizando a Equação (7). É importante notar que as frequências e amplitudes dos picos de ressonância dependem da estrutura monitorada, transdutores piezoelétricos e condições ambientais tais como temperatura.

Uma vez que a detecção do dano estrutural no método E/M é baseada em detectar variações nas curvas de impedância, principalmente nos picos de ressonância, o número de ciclos de excitação deveria afetar a sensibilidade ao dano estrutural. Portanto, na próxima seção são apresentados os efeitos do número de ciclos do sinal de excitação sobre a detecção de dano estrutural.

6.3. Efeitos dos ciclos do sinal de excitação sobre a detecção do dano estrutural

De acordo com o procedimento descrito no Capítulo 5, o dano estrutural foi simulado sobre as estruturas fixando-se um pino de 1 g sobre cada estrutura. As assinaturas de impedância elétrica foram obtidas para as estruturas nas condições íntegra e danificada variando o número de ciclos do sinal de excitação. Foi utilizada uma banda de frequências de 2 kHz em torno dos picos de ressonância mostrados na Figura 5, conforme consta na Tabela X.

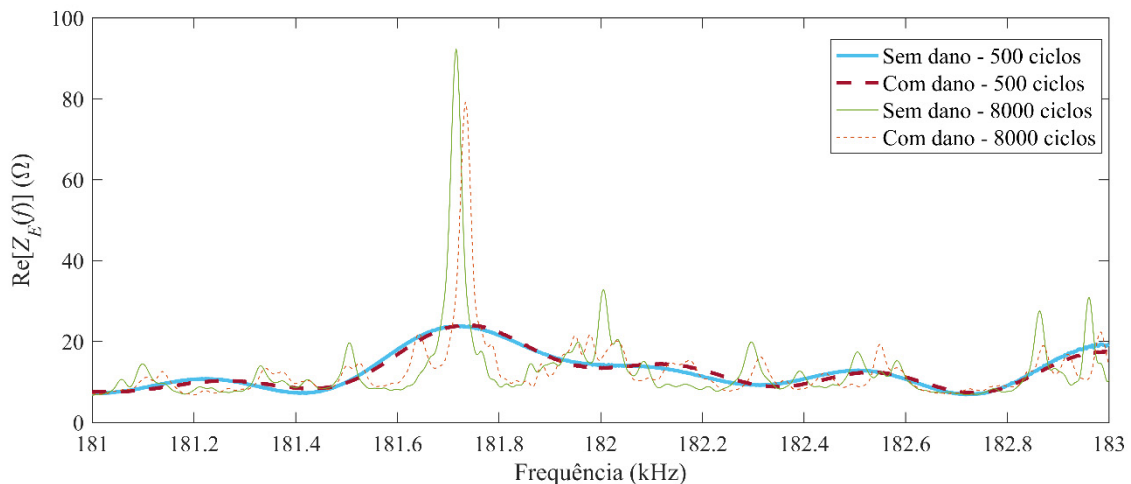
Tabela X - Estruturas e bandas de frequências analisadas.

Estrutura	Bandas de frequências (kHz)
1	181 – 183
2	44 – 46
3	115 – 117
4	150 – 160

Como apresentado na Figura 5 – (d), uma banda de frequência de 150-160 kHz foi escolhida para a Estrutura 4, já que o pico de ressonância tem uma largura de banda maior.

Na Figura 9, a fim de qualitativamente demonstrar a influência do número de ciclos do sinal de excitação sobre o dano estrutural, são apresentadas as partes reais das assinaturas de impedância elétrica obtidas para a Estrutura 1, sob as condições íntegra e danificada, utilizando 500 e 8000 ciclos de excitação.

Figura 9 - Parte real das assinaturas de impedância elétrica obtidas para a estrutura 1 utilizando 500 e 8000 ciclos do sinal de excitação.

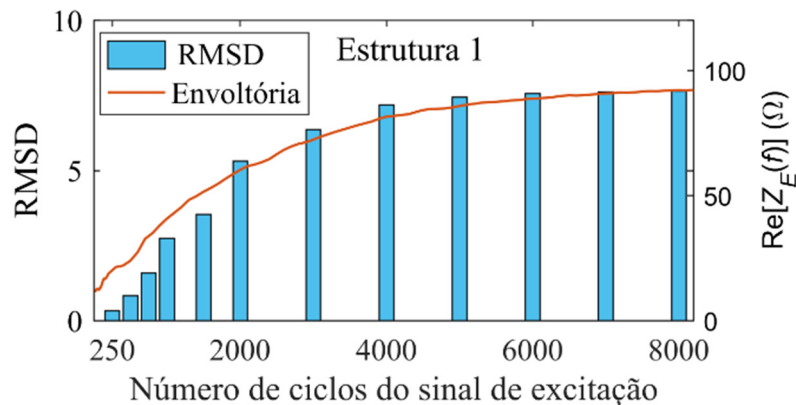


Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser visto na Figura 9, o número de ciclos do sinal de excitação significativamente afeta a detecção do dano estrutural. Com 500 ciclos, as assinaturas de impedância elétrica nas condições íntegra e danificada estão praticamente superpostas, com apenas leves variações observadas. Em contraste, a 8000 ciclos, a assinatura da condição danificada mostra significativas variações comparada à assinatura íntegra, o que torna a detecção de dano estrutural mais eficiente.

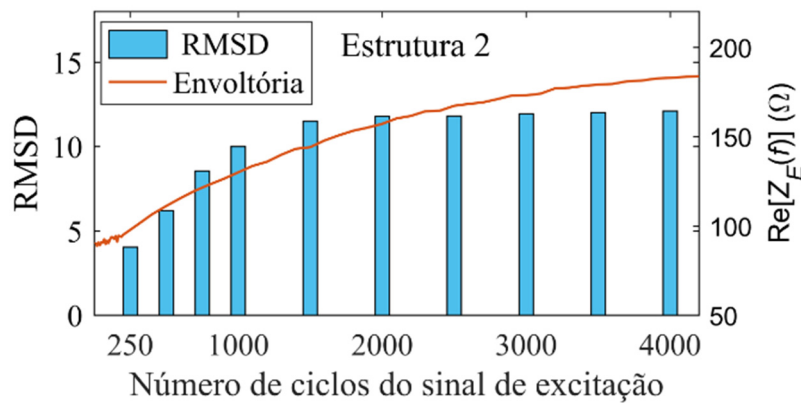
Uma análise quantitativa dos efeitos dos ciclos de excitação sobre a detecção de dano estrutural pode ser executada calculando os índices RMSD e CCD, calculados de acordo com as Equações (8) e (9), respectivamente. Nas Figuras 10, 11, 12 e 13 são apresentados os índices RMSD obtidos para as quatro estruturas, e nas Figuras 14, 15, 16 e 17, os índices CCD.

Figura 10 - Índices RMSD com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 1.



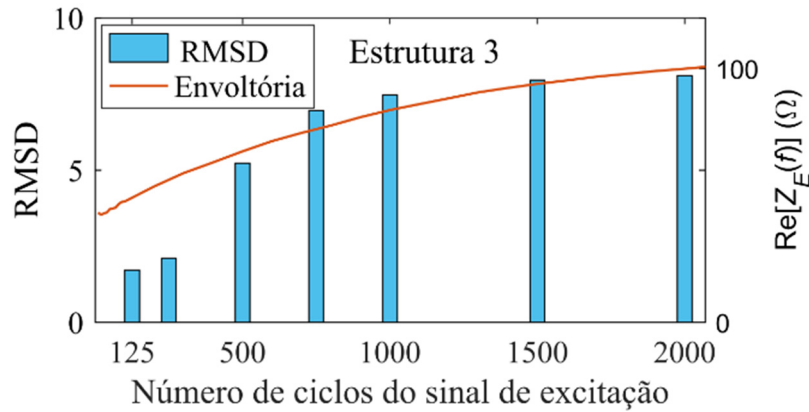
Fonte: Autoria própria.

Figura 11 - Índices RMSD com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 2.



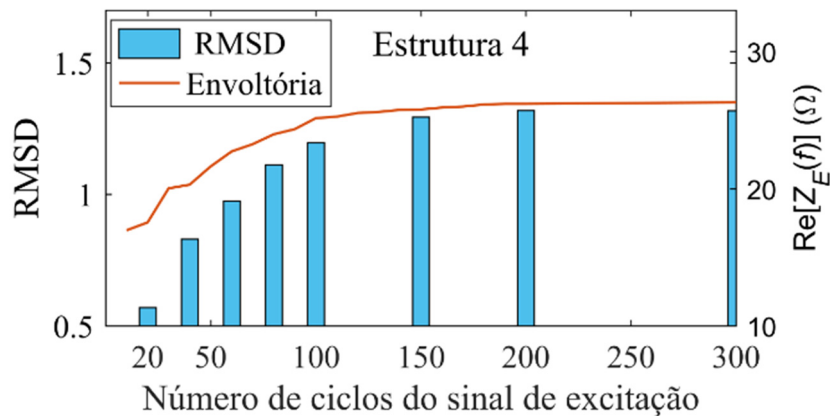
Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - Índices RMSD com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 3.



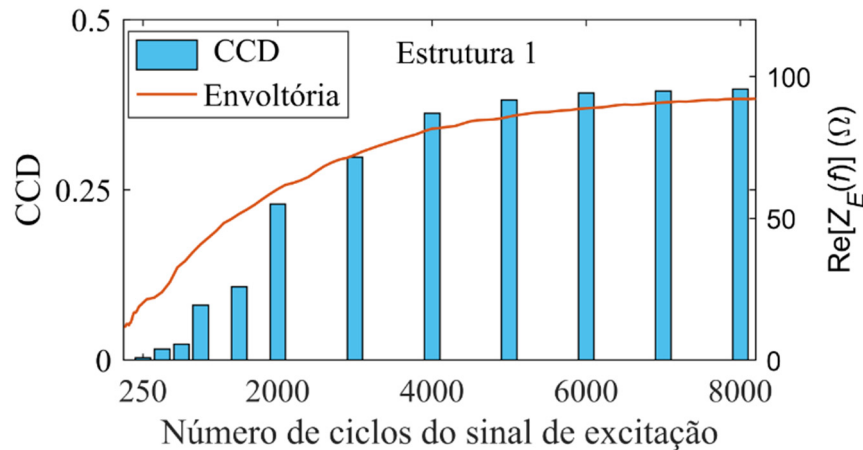
Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Índices RMSD com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 4.



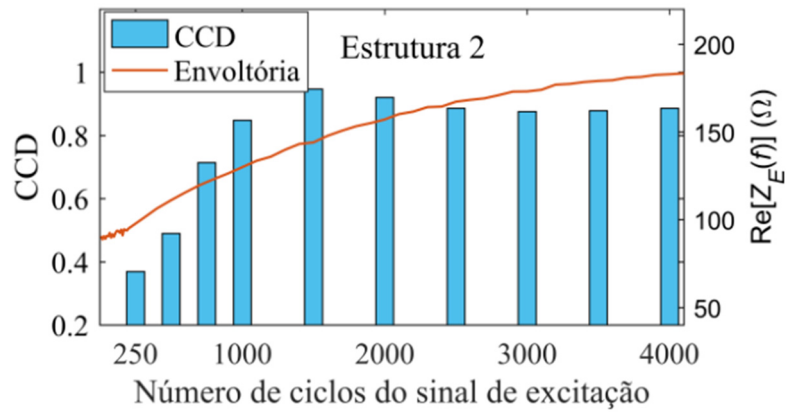
Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Índices CCD obtidos com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 1.



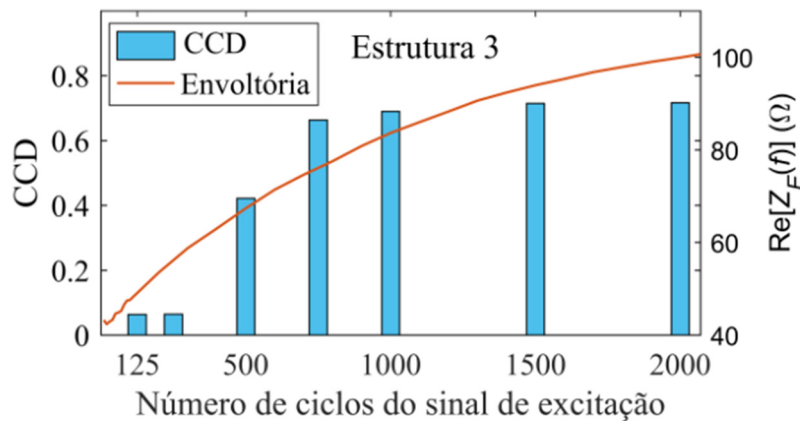
Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Índices CCD obtidos com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 2.



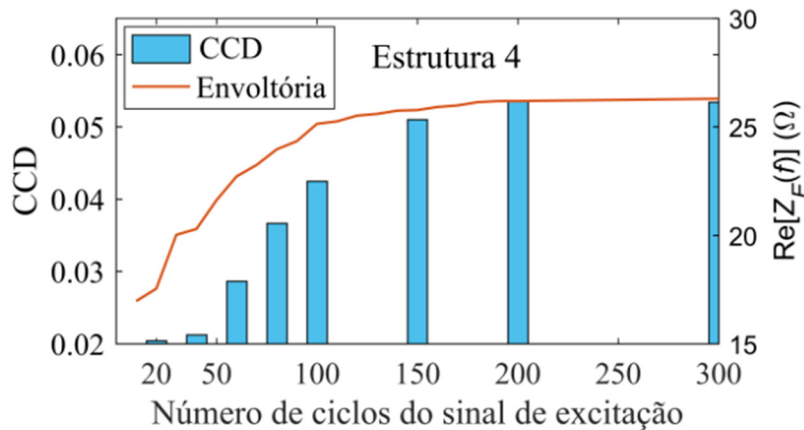
Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Índices CCD obtidos com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Índices CCD obtidos com diferentes números de ciclos do sinal de excitação comparados com a amplitude normalizada da envoltória experimental da Estrutura 4.



Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 10 a 17, as amplitudes normalizadas das envoltórias experimentais estão mostradas para comparar a tendência de variação nos índices de dano. Os resultados mostram que o número de ciclos do sinal de excitação significativamente afeta os índices de dano estrutural. Para todas as estruturas analisadas, ambos os índices, RMSD e CCD, apresentam baixos valores quando o sinal de excitação tem poucos ciclos comparados à excitação com um alto número de ciclos.

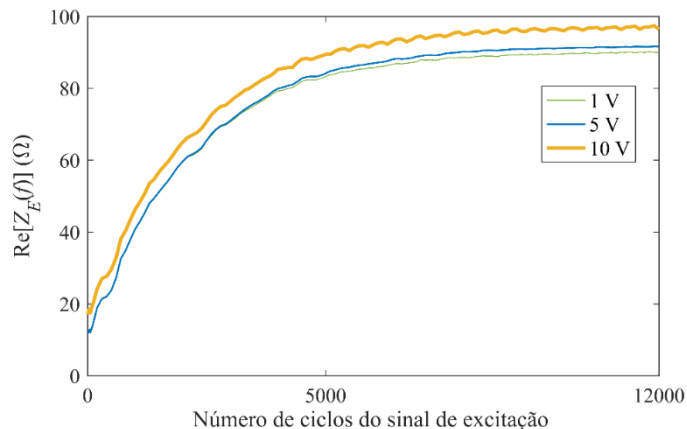
A variação dos índices é similar às amplitudes normalizadas das envoltórias experimentais, especialmente dos índices obtidos para as Estruturas 1 e 4. Apesar de algumas discrepâncias observadas nas Estruturas 2 e 3, em geral a variação nos índices está consistente com as amplitudes normalizadas das envoltórias experimentais. Portanto, fica claro que a detecção de dano estrutural não pode ser efetivamente realizada se o sistema de medição está configurado com poucos ciclos do sinal de excitação.

Na próxima seção estão discutidos os efeitos da amplitude do sinal de excitação.

6.4. Influência da Amplitude de Excitação

De acordo com a Equação (6) e Figura 2, a convergência da amplitude de vibração relativa normalizada para seu máximo valor não depende da intensidade da carga aplicada, mas somente do número de ciclos da excitação harmônica. Portanto, é esperado que a amplitude do sinal de excitação não altere o requerido número de ciclos para uma dada estrutura alcançar seu máximo pico de ressonância. Na Figura 18, para verificar a hipótese acima, são apresentadas as envoltórias experimentais obtidas para a Estrutura 1, com pico de tensão do sinal de excitação de 1 V, 5 V e 10 V.

Figura 18 - Envoltórias experimentais da Estrutura 1 com diferentes amplitudes do sinal de excitação.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 18, ao elevar o pico de tensão do sinal de excitação de 1 V até 10 V, ocasionou um aumento em torno de 8% no pico de ressonância. Conforme apresentado na Tabela VIII, entretanto, nenhuma mudança é observada no número de ciclos do sinal requeridos para o máximo pico ser alcançado, permanecendo em torno de 8200 ciclos. Dessa forma, os resultados experimentais estão alinhados com a hipótese teórica enunciada.

6.5. Reprodutibilidade das Medições

A reprodutibilidade das medições é essencial para a detecção de dano estrutural em sistemas de SHM. Embora alguns índices de detecção independentes quanto à medição referência (*baseline*) têm sido propostos (HE *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2023; PAPAGIANOPOULOS; HATZIGEORGIOU, 2011), de acordo com os axiomas de sistemas de SHM (WORDEN *et al.*, 2007), a detecção de dano estrutural sempre é baseada em alguma medição de referência.

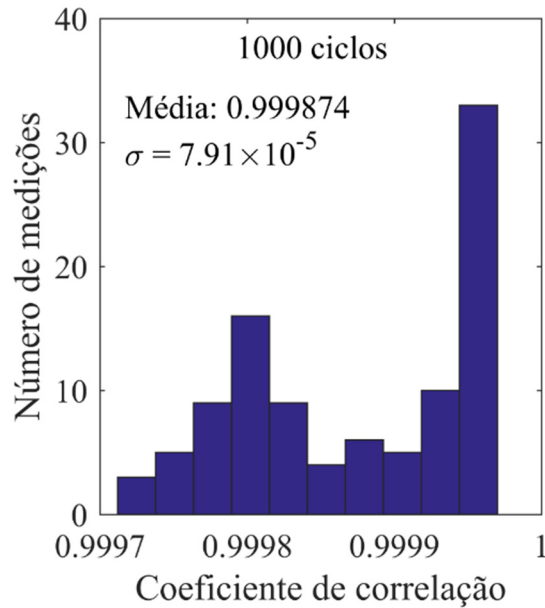
Como mostrado na Figura 5 – (a) , a fim de analisar a influência do número de ciclos do sinal de excitação sobre a reprodutibilidade das medições, foram sequencialmente obtidas 101 assinaturas de impedância elétrica da Estrutura 1, na banda de frequência de 181,6 a 181,8 kHz em torno do pico de ressonância. A primeira assinatura foi, então, utilizada como uma medição de referência, e os coeficientes de correlação com as outras 100 assinaturas foram calculados utilizando a parte real da impedância elétrica. O coeficiente de correlação foi escolhido pois ele permite que as assinaturas sejam comparadas através de uma banda de frequências inteira, onde um valor idealmente igual a 1 indica medições idênticas. Este procedimento foi repetido ajustando o sinal de excitação para 1000, 5000 e 10000 ciclos. Nas Figuras 19, 20 e 21 são apresentados os histogramas obtidos para as três quantidades de ciclos utilizados. Vale enfatizar que os histogramas estão em uma mesma escala para fácil comparação.

De acordo com as imagens, é possível observar um melhoramento na reprodutibilidade das medições conforme é aumentado o número de ciclos do sinal de excitação. Os valores médios dos coeficientes de correlação obtidos com os números de ciclos constam na Tabela XI.

Tabela XI - Valores dos números de ciclos e valores médios dos coeficientes de correlação obtidos.

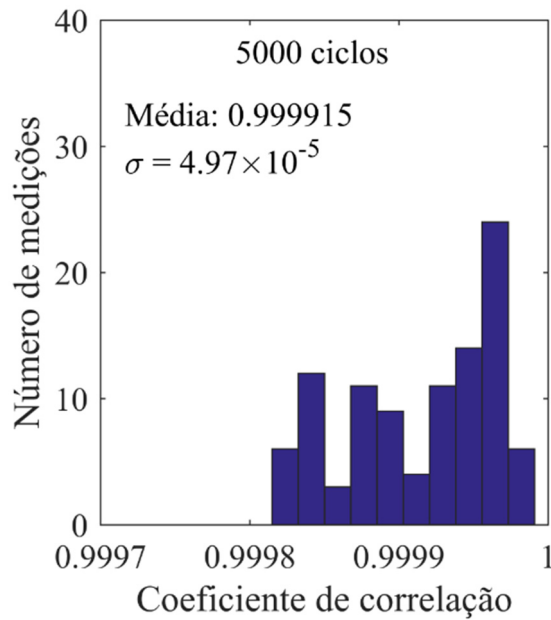
Ciclos	Coefficientes de correlação obtidos
1000	0,999874
5000	0,999915
10000	0,999963

Figura 19 - Histograma dos coeficientes de correlação obtidos entre 101 assinaturas de impedância elétrica, considerando a primeira como medição de referência, e o sinal de excitação com 1000 ciclos.



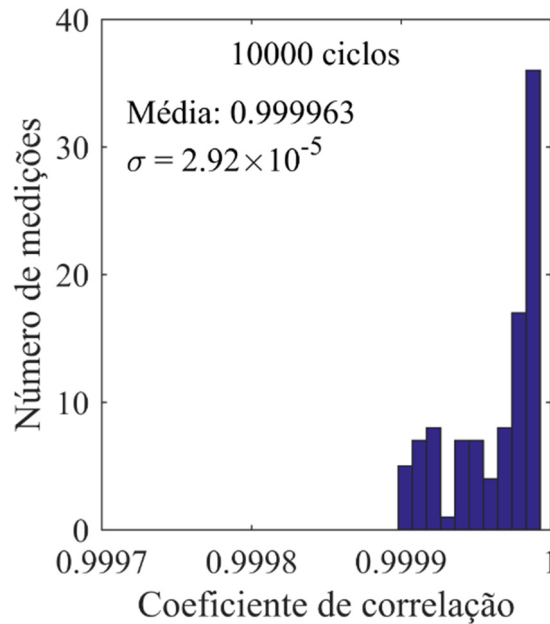
Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Histograma dos coeficientes de correlação obtidos entre 101 assinaturas de impedância elétrica, considerando a primeira como medição de referência, e o sinal de excitação com 5000 ciclos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21 - Histograma dos coeficientes de correlação obtidos entre 101 assinaturas de impedância elétrica, considerando a primeira como medição de referência, e o sinal de excitação com 10000 ciclos.



Logo, os coeficientes de correlação obtidos com 10000 ciclos estão mais próximos do valor ideal de 1. O melhoramento na reprodutibilidade pode também ser quantificado pelo decréscimo no desvio padrão (σ). Os valores obtidos para esse parâmetro conforme os ciclos variaram constam na Tabela XII.

Tabela XII - Desvios padrões conforme ciclos.

Desvio padrão	Ciclos
$7,91 \times 10^{-5}$	1000
$4,97 \times 10^{-5}$	5000
$2,92 \times 10^{-5}$	10000

Portanto, de acordo com todos os resultados apresentados e discutidos neste capítulo, é evidente a relevância da correta configuração do número de ciclos dos sinais de excitação para sistemas de SHM baseados na impedância eletromecânica com sinais senoidais. Todas as análises convergiram para melhores e mais fidedignos resultados quando um maior número de ciclos de excitação foi utilizado nas medições, independente da estrutura sob análise.

CONCLUSÃO

Esta tese analisou a influência dos ciclos dos sinais de excitação senoidais em transdutores piezoelétricos em sistemas de SHM baseados na técnica da impedância eletromecânica. Para tal, foram propostos métodos teóricos e práticos para avaliar as hipóteses levantadas, todos aplicados a quatro estruturas, sendo três de alumínio e uma de CFRP.

A análise teórica básica e testes experimentais sobre as estruturas mostraram conclusivamente que o requerido número de ciclos varia de acordo com a estrutura monitorada e está relacionado ao seu fator de amortecimento. De acordo com os resultados obtidos com as estruturas classificadas como subamortecidas analisadas nesta tese, que é a condição tipicamente encontrada em estruturas cotidianas, quanto menor o fator de amortecimento, maior é número de ciclos requerido e, conseqüentemente, o tempo de excitação do transdutor piezoelétrico, que depende da frequência e do período do sinal de excitação.

Para os testes experimentais, ao configurar o sistema de medição com o correto número de ciclos de excitação, que variou de 150 até 8200 ciclos para as estruturas testadas nesta tese, foi possível obter picos de ressonância de máximas amplitudes nas assinaturas de impedância elétrica dos transdutores piezoelétricos. Vale ressaltar, ainda, que para a Estrutura 1, a quantidade de ciclos de excitação obtida experimentalmente teve um erro de -27,4% em relação ao obtido teoricamente, sendo este o pior cenário desta tese. No entanto, para a Estrutura 2, o erro foi de somente -3%, e para as estruturas 3 e 4 foi de -9,8% e +7,1%, respectivamente. A grande variação para a Estrutura 1 se deve ao fato de que as curvas teóricas dependem de uma exponencial e qualquer variação pequena no expoente (amortecimento), causa alteração significativa na curva.

Como explicado e comprovado durante esta tese, a medição de assinaturas de impedância elétrica com picos de ressonância de alta amplitude é importante para a detecção eficiente de dano estrutural, já que o dano causa variações principalmente nos picos de ressonância. Os resultados experimentais mostraram que o correto número de ciclos de excitação significativamente melhora a detecção de dano estrutural, conforme quantificado pelos índices RMSD e CCD. No entanto, quando o número de ciclos é muito baixo em relação ao requerido para uma dada estrutura, o dano estrutural não pode ser detectado.

Além da detecção do dano estrutural, a reprodutibilidade das medições pôde também ser melhorada. Os testes experimentais com uma série de medições com três diferentes configurações de ciclos de excitação mostraram que o correto número de ciclos aumenta a

semelhança entre medições de impedância elétrica enquanto diminui o desvio padrão, que é fundamental para um sistema de medição de alta confiabilidade.

Conforme discutido nos primeiros capítulos desta tese, o número de ciclos do sinal de excitação não tem usualmente sido um interesse para os pesquisadores. No entanto, tendo como base os resultados apresentados nesta pesquisa, o procedimento descrito nesta tese pode servir de guia para futuras pesquisas, viabilizando que os sistemas de medições utilizados alcancem um desempenho refinado em aplicações de SHM.

Por fim, como sugestões a trabalhos futuros, utilizar novos métodos e ferramentas para obtenção dos coeficientes de amortecimento de forma mais precisa e exata são de grande interesse para a continuidade desta linha de pesquisa e, como um todo, para sistemas de SHM que visem utilizar os resultados apresentados nesta tese. Além disso, vale analisar como outros sinais usualmente aplicados a sistemas de SHM, como o *chirp*, podem ter seus parâmetros implementados para obtenção das máximas amplitudes dos picos de ressonância das estruturas monitoradas.

Os dados resultantes desta pesquisa estão disponibilizados no IEEE DataPort:

<https://dx.doi.org/10.21227/gcsb-hq76>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANALOG DEVICES D05324-0-4/17 (F). 1 MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2023.
- ALEXANDER, S. J.; SUMATHI, P.; PANIGRAHI, S. K.; PRYA, C. B.; GOPALAKRISHNAN, N. Evaluation of embedded dual-piezoelectric-based transducer with miniature impedance analyzer for monitoring the curing of cement mortar. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 6000910, 2023.
- 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. 64, n. 4, pp. 912-924, 2018.
- CLOUGH, R.W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures. **Computers & Structures**, Inc. 3 ed. 2003.
- DA SILVA, S.; YANO, M. O.; GONSALEZ-BUENO, C. G. Transfer component analysis for compensation of temperature effects on the impedance-based structural health monitoring. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 40, p. 64, 2021.
- DUDDI, M.; KOCHERLA, A.; SUBRAMANIAM, K. Evaluation of boundary and material influences on the dynamic electromechanical impedance response of the embedded PZT sensor in concrete. **Sensors & Actuators: A. Physical**, v. 361, p. 114575, 2023.
- HE, T.; XING, G.; LI, Y.; LI, Q.; ZHOU, S. A novel baseline-free defect detection and localization method of welded steel plate based on reciprocity loss. **Measurement Science and Technology**, v. 32, p. 025602, 2021.
- JU, M.; DOU, Z.; LI, J-W; QIU, X.; SHEN, B.; ZHANG, D.; YAO, F-Z.; GONG, W.; WANG, K. Piezoelectric materials and sensors for structural health monitoring: Fundamental aspects, current status, and future perspectives. **Sensors**, v. 23, n. 1, p. 543, 2023.
- KATAM, R.; PASUPULETI, V. D.; KALAPATAPU, P. A review on structural health monitoring: past to present. **Innovative Infrastructures Solutions**, v. 8, p. 248, 2023.
- LAMBINET, F.; KHODAEI, Z. S. Measurement platform for structural health monitoring application of large scale structures. **Measurement**, v. 190, p. 110675, 2022.
- LI, H.; LUO, Y.; AI, D. Restoration of electromechanical admittance signature via solving constrained optimization problems for concrete structure damage identification. **Measurement**, v. 214, p. 112803, 2023.
- LI, W.; FANG, X.; CHEN, X.; ZHANG, L. Damage detection method based on flexible macro-fiber composite. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 3504809, 2023.
- LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** v. 8, n. 4, pp.335-343, 1997.
- LIU, Y.; FENG, X. Monitoring corrosion-induced thickness loss of stainless steel plates using the electromechanical impedance technique. **Measurement Science and Technology**, v. 32, n. 2, p. 025104, 2021.

LU, R.; SHEN, Y.; ZHANG, B.; XU, W. Nonlinear electro-mechanical impedance spectroscopy for fatigue crack monitoring. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 184, p. 109749, 2023.

MAIO, L. **Electromechanical impedance measurement for deicing applications based on piezoelectric actuators**. IEEE 5th International Workshop on Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), pp. 562-566, Jun. 2019.

MAIO, L.; MEMMOLO, V.; CHRISTOPHEL, N.; KOHL, S.; MOLL, J. Electromechanical admittance method to monitor ice accretion on a composite plate. **Measurement**, v. 220, p. 113290, 2023.

PARIDA, L.; MOHARANA, S. A comprehensive review on piezo impedance based multi sensing technique. **Results in Engineering**, v. 18, p. 101093, 2023.

PLACIDI, P.; VERGINI, C.; PAPINI, N.; CECCONI, M.; MEZZANOTTE, P.; SCORZONI, A. Low-Cost and low-frequency impedance meter for soil water content measurement in the precision agriculture scenario. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 9511613, 2023.

PAPAGIANNPOULOS, G.A.; HATZIGEORGIOU, G.D. On the use of the half-power bandwidth method to estimate damping in building structures. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 31, pp. 1075-1079, 2011.

RODRIGUES, F.; SENO, A.H.; KHODAEI, Z.S.; ALIABADI, F. **Structural health monitoring platform for industrial scale composite structures**. Proc. AIP Conference, v. 2848, n. 1, p. 020041, Jun. 2023.

TAN, Z.; FENG, Q.; MA, T.; ZHANG, J.; LIANG, Y. Development of an AD5933-based impedance calibration and measurement technology using piezoceramic transducers. **Measurement**, v. 210, p.112527, 2023.

WORDEN, K.; FARRAR, C. R.; MANSON, G.; PARK, G. **The fundamental axioms of structural health monitoring**. Proceedings of the Royal Society A, v. 463, pp. 1639-1664, 2007.

XU, C.; GAO, G.; DENG, M. Lamb wave based damage imaging under nonlinear chirp excitation. **Ultrasonics**, v.135, p. 107108, 2023.

ZHANG, X.; XU, J.; YAN, R. A structural impedance measurement method by using polyvinylidene fluoride as actuator and sensor. **Review of Scientific Instruments**, v. 91, p. 085111, 2020.