

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

ROTHSCHILD ALENCASTRO ANTUNES

**ESTUDO E MODELAGEM DE SISTEMAS DE DETECÇÃO DE
DANOS EM ESTRUTURAS MECÂNICAS BASEADOS NA
IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA**

Ilha Solteira
2019

ROTHSCHILD ALENCASTRO ANTUNES

**ESTUDO E MODELAGEM DE SISTEMAS DE DETECÇÃO DE DANOS
EM ESTRUTURAS MECÂNICAS BASEADOS NA IMPEDÂNCIA
ELETROMECAÂNICA**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus
de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Especialidade: Automação.

Prof. Dr. JOZUÉ VIEIRA FILHO
Orientador

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A636e Antunes, Rothschild Alencastro.
Estudo e modelagem de sistemas de detecção de danos em estruturas mecânicas baseados na impedância eletromecânica / Rothschild Alencastro Antunes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
90 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Automação, 2019

Orientador: Jozué Vieira Filho

Inclui bibliografia

1. Shm. 2. Emi. 3. Pzt. 4. Detecção de danos. 5. Elementos finitos. 6. Compensação Temperatura.



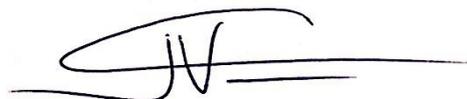
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ESTUDO E MODELAGEM DE SISTEMAS DE DETECÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS MECÂNICAS BASEADOS NA IMPEDÂNCIA ELETROME CÂNICA

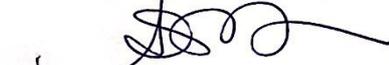
AUTOR: ROTHSCHILD ALENCASTRO ANTUNES

ORIENTADOR: JOZUE VIEIRA FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO
Coordenadoria Executiva / UNESP - Câmpus de São João da Boa Vista



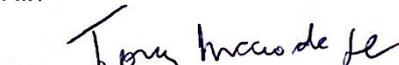
Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Profa. Dra. SUELY CUNHA AMARO MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MÁRIO ANDERSON DE OLIVEIRA
Departamento de Eletro-eletrônica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - IFMT



Prof. Dr. TONY INACIO DA SILVA
Departamento de Eletro-eletrônica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - IFMT

Ilha Solteira, 13 de junho de 2019

DEDICO

A minha esposa **Juliana Antunes**, aos meus três filhos maravilhosos que Deus me deu, a minha mãe, aos meus irmãos em especial ao **Stephesson Alencastro Antunes** (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me mantido no meu caminho, demonstrando minha fé e perseverança em trilhar esse caminho, que me fez forte em momentos difíceis.

A minha esposa Juliana, que não poupou esforços para que eu conseguisse entrar e continuar no doutorado, não foi tarefa fácil, muitos finais de semana sem estar por perto, mas enfim nós conseguimos superar todos os obstáculos. A indiscutível força que sempre me passa, fez com que alcançasse mais essa conquista.

Ao Professor Dr. Nicolás Eusebio Cortez Ledesma pela paciência como co-orientador e pela grande oportunidade de aprendizado. Meu amigo Nicolás, obrigado pelo seu tempo que foi fundamental para eu conseguir chegar até aqui no doutorado, um amigo de todas as horas literalmente noites, sábados e domingos, seria impossível concluir o doutorado sem a sua companhia e dedicação que disponibilizou para mim.

Ao meu Orientador Professor Dr. Jozué Vieira Filho que sempre me recebeu muito bem com um sorriso no rosto todas as vezes que cheguei com muitas dúvidas em São João da Boa Vista – SP, e por me orientar em caminhos desconhecidos, onde aprendi muito.

A minha mãe Cacilda, que batalhou muito para dar, a mim e aos meus irmãos, um futuro promissor, pois perdemos nosso pai muito cedo. Minha mãe sempre fala: “Na vida é importante três coisa: ser honesto, ser humilde e ter estudo”, esse último ela deu a mim e aos meus irmãos com muita dificuldade, mas conseguiu e aqui estou terminando o doutorado.

Aos meus filhos Natália, Anderson e a Júlia, minha linda Natália, que tem dedicado seu tempo nos últimos ano a cuidar da família tias, tios, sobrinhos, responsável, compreensiva e inteligente, que orgulho tenho de você minha filha, meu filho, Anderson, que mesmo longe se torna um grande homem a cada dia, e demonstrou ser um homem forte e prestativo com a perda do tio, ao meu bebê, Júlia, que sempre me ajuda a recomeçar o dia com seu carinho, que está se transformando em uma moça, observo quando levo para a escola todos os dias e conversamos muito.

A minha colega de pesquisa Barbara Giancesini, que em todo momento trabalhou junto por todo período do doutorado, foi uma pessoa importante nas buscas de soluções e validações da pesquisa e trabalhos que publicamos juntos em vários congressos e revista, sem deixar de falar da tradutora oficial dos nossos trabalhos para o inglês, a minha amiga Valdirene Cavachioli, que me ajudou em muitas correções de texto e foi muito parceira e auxiliou em muitas atividades junto a universidade aberta do Brasil em momentos difíceis; aos meus colegas de trabalho Dirlene, Eloisa, Adauto, Cesar, Dalete e Paulo que sempre estive disposto a todo momento, a ajudar nas atividades do IFMT.

E para finalizar gostaria de agradecer uma pessoa muito importante, o amigo Clodoaldo Nunes, pela persistência em ajudar a todos que está a sua volta. Foi ele que me convidou, e me convenceu a entrar no mestrado e prosseguir no doutorado. Em momentos difíceis no doutorado ele dizia repetitivamente “no final tudo vai dar certo” e deu certo mesmo, aqui estou terminando. Que Deus sempre ilumine você e a toda sua família com muita saúde e paz.

RESUMO

As técnicas de detecção de danos baseadas na Impedância Eletromecânica (EMI) baseiam-se na capacidade dos materiais piezoelétricos em atuar como sensores e atuadores e contribuem para o desenvolvimento de sistemas de *Structural Health Monitoring* (SHM). As técnicas clássicas baseadas na EMI utilizam um transdutor *Pb-Lead Zirconate Titanite* (PZT) ligado à estrutura monitorada e medem a assinatura de impedância do PZT. No entanto, as técnicas baseadas na EMI dependem de diferentes fatores, como faixa de frequência, número de PZT, temperatura ambiente, tipo de estrutura, entre outros. Assim, para demonstrar a eficácia dos métodos baseados na EMI, faz-se necessário realizar experimentos práticos, o que não é uma tarefa trivial, considerando tais fatores. Portanto, neste trabalho são estudados e propostos procedimentos para criar modelos numéricos, usando elementos finitos (FE), de técnicas baseadas na EMI usando o software PZFlex®. Além disso, os modelos desenvolvidos são usados para propor uma técnica inovadora de compensação de temperatura em sistemas baseados na EMI. Foram modeladas, simuladas e analisadas algumas estruturas clássicas como placa-de-alumínio/PZT e tubo-de-aço/PZT. Os resultados das simulações foram comparados com os equivalentes obtidos com modelos experimentais reais e mostraram-se fortemente correlacionados, indicando que o modelo proposto pode ser uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de técnicas de SHM baseadas na EMI. Foram realizadas simulações para analisar o comportamento das assinaturas sob o efeito da temperatura, mudando os valores dos parâmetros em função da temperatura, da cerâmica piezoelétrica de PZT, da estrutura e do conjunto estrutura/PZT como um todo, para uma faixa de temperatura de -40°C a 80°C e uma faixa de frequência de 5 kHz a 125 kHz. Finalmente, é aplicado um mecanismo efetivo de compensação do efeito da variação da temperatura em toda faixa de frequência analisada.

Palavras chaves- SHM. EMI. PZT. Detecção de danos. Elementos finitos. Compensação temperatura.

ABSTRACT

The damage detection techniques based on the Electromechanical Impedance (EMI) rely on the ability of piezoelectric materials in acting as sensors and actuators and contribute to the development of Structural Health Monitoring (SHM) systems. The classical EMI-based techniques use a Pb-Lead Zirconate Titanate (PZT) transducer bonded to the monitored structure and measure the impedance signature of the PZT. However, the techniques based on EMI depend on different factors, such as frequency range, number of PZTs, environmental temperature, type of structure, among others. Thus, to demonstrate the effectiveness of EMI-based methods, it is necessary to carry out practical experiments, which is not a trivial task considering such factors. Therefore, in this work, it is studied and proposed procedures to create numerical models of techniques based on the EMI, using finite elements (FE) and the PZFlex® software. In addition, the developed models are used to propose an innovative temperature compensation technique for EMI-based systems. Some classical structures were modelled, simulated and analyzed, such as aluminum plate/PZT and steel pipe/PZT. The results of the simulations were compared with the equivalents obtained by experimental models and showed to be strongly correlated, indicating that the proposed model can be a powerful tool for the development of EMI-based SHM techniques. Simulations were performed to analyze the behavior of the signatures under the effect of temperature, by changing the parameters values of the PZT piezoelectric ceramic and the structure, separately and together, as a function of temperature, for the temperature range from -40 °C to 80 °C and the frequency range from 5kHz to 125kHz. Finally, an effective temperature compensation mechanism is applied in the analyzed frequency range.

Keywords- SHM. EMI. PZT. Damage detection. Finite elements. Temperature compensation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Influência da temperatura sobre (a) constante dielétrica relativa e (b) constante de acoplamento piezoeletrico, propriedades das cerâmicas piezoeletricas PSI-5A e PSI-5H.	20
Figura 2 – PZT (Titanato Zirconato de Chumbo).	21
Figura 3 – Transdutor de PZT e a estrutura monitorada (modelo eletromecânico do tipo massa-mola).	23
Figura 4 – Nós e elementos presentes em uma malha.	32
Figura 5 – Estrutura de uma Mesa.	33
Figura 6 – Localização de Nós nas Modelagens 2D e 3D.	33
Figura 7 – Modelo de Carga de Pressão.	34
Figura 8 – Placa Alumínio e PZT.	35
Figura 9 – Material Piezoeletrico.	38
Figura 10 – (a) Sinal de excitação e o (b) Espectro de energia.	40
Figura 11 – Janela de Campo Elétrico.	41
Figura 12 – Modelos de placas de alumínio – (a) Placa 1 (b) Placa 2.	46
Figura 13 – Modelos de Tubo de aço – (a) Tubo 1 (b) Tubo 2 (c) Tubo 3.	47
Figura 14 – Sistema Real: (a) Placa de alumínio sem dano; (b) Placa de alumínio dano não destrutivo.	48
Figura 15 – Sistema Real: (a) Tubo de aço - 1; (b) Tubo de aço - 2; (b) Tubo de aço – 3.	49
Figura 16 – Simulação: Placa (a) Magnitude da Impedância do PZT-1 (b) Parte Real da Impedância do PZT-1	49
Figura 17 – Simulação Tubo (a) Magnitude da Impedância do PZT-1 (b) Parte Real da Impedância do PZT-1	50
Figura 18 – Experimental Placa (a) Magnitude da Impedância do PZT-1 (b) Parte Real da Impedância do PZT-1.	51
Figura 19 – Experimental: Tubo (a) Magnitude da Impedância do PZT-1 (b) Parte Real da Impedância do PZT-1.	51
Figura 20 – Magnitude da Impedância elétrica do PZT-1 (Placa -1 Experimental vs Simulação).	52
Figura 21 – Parte Real da Impedância elétrica do PZT1 (Placa -1 Experimental vs Simulação).	52
Figura 22 – Magnitude da Impedância elétrica do PZT-1 (Tubo -1 Experimental vs Simulação).	52
Figura 23 – Parte Real da Impedância elétrica do PZT1 (Tubo -1 Experimental vs Simulação).	53
Figura 24 – Placa de alumínio: (a) Dano não destrutivo (b) Dano destrutivo.	55
Figura 25 – Níveis de danos simulados em placa de alumínio.	55
Figura 26 – Parte real da impedância faixa de frequências de 5-20 kHz.	56
Figura 27 – Parte real da impedância faixa de frequências de 60-100 kHz.	56
Figura 28 – Parte real da impedância faixa de frequências de 10-25 kHz.	57
Figura 29 – Parte real da impedância faixa de frequências de 65-100 kHz.	57
Figura 30 – Índices RMSD e CCDM Dano NDE. (a) Faixa de freq. de 5-20 kHz. (b) Faixa de freq. 60-100 kHz.	58
Figura 31 – Índices RMSD e CCDM: Dano Destrutivo. (a) Faixa de freq. de 10 - 25 kHz. (b) Faixa de freq. 65-100 kHz.	59
Figura 32 – Tubo de aço com dano não destrutivo.	60
Figura 33 – Tubo: Parte real da impedância faixa de frequências de 5-20 kHz.	60
Figura 34 – Tubo: Parte real da impedância faixa de frequências de 60-80 kHz.	61

Figura 35 – Índices RMSD e CCDM Dano não Destrutivo. (a) Faixa de freq. de 5 - 20 kHz. (b) Faixa de freq. 60 - 80 kHz.	62
Figura 36 – Assinaturas de impedância elétrica do PZT-1 sob efeito da temperatura; (a) Tubo-1 (b) Placa-1.	65
Figura 37 – Deslocamento horizontal da parte real de impedância: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.	66
Figura 38 – Deslocamento vertical da parte real de impedância: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.	67
Figura 39 – Deslocamentos horizontal e vertical da parte real de impedância: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.	68
Figura 40 – Linhas de tendência do deslocamento horizontal da magnitude de Z Sistema: (a) baixa frequência e (b) alta frequência	69
Figura 41 – Linhas de tendência do deslocamento vertical da parte real de Z: (a) baixa frequência e (b) alta frequência.	69
Figura 42 – Métricas de dano e o efeito da temperatura: (a) RMSD e (b) CCDM.	70
Figura 43 – Representação geométrica dos deslocamentos de frequência.	72
Figura 44 – Representação geométrica dos deslocamentos de amplitude.	74
Figura 45 – Interface gráfica para compensar o efeito da temperatura.	75
Figura 46 – Compensação horizontal – Caso-1: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.	76
Figura 47 - Compensação horizontal – Caso-3: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.	76
Figura 48 – Compensação horizontal para tubo-1.	77
Figura 49 – Compensação completa de +80°C para 40°C – Caso-3: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.	78
Figura 50 – Compensação completa – Caso-3: (a) de 20°C para -40°C e (b) de 20°C para 60°C.	78
Figura 51 – Compensação completa para tubo-1: (a) de -40°C para -20°C e (b) de +80°C para 40°C.	79
Figura 52 – Compensação completa para tubo-2: (a) de -40°C para -20°C e (b) de +80°C para 40°C.	79
Figura 53 – Compensação completa para placa-1: (a) de -20°C para 0°C e (b) de +70°C para 40°C.	79
Figura 54 – Índices de dano para avaliar a condição estrutural de tubo-1: (a) sem dano e (b) com dano.	80
Figura 55 – Índices de dano para avaliar a condição estrutural de tubo-2: (a) sem dano e (b) com dano.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BL_{ref}	Assinatura baseline obtida à temperatura de referencia
BL_{comp}	Assinatura baseline compensada
BL_{T1}	Assinatura baseline obtida à temperatura T_1
BL_{T2}	Assinatura baseline obtida à temperatura T_2
C_C	Coefficiente de correlação
CCDM	Correlation Coefficient Deviation Metric
DAQ	Data Acquisition
EMI	Electromechanical Impedance
FE	Elementos Finitos
MFC	Macro Fiber Composite
NDE	Non-Destructive Evaluation
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno
PZT	Pb-Lead Zirconate Titanate
RMSD	Root Mean Square Deviation
SHM	Structural Health Monitoring
T_1	Temperatura 1, utilizada no método de compensação
T_2	Temperatura 2, utilizada no método de compensação
T_{op}	Temperatura de operação
T_{ref}	Temperatura de referência
UNESP	Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO	15
2	MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL	17
2.1	SISTEMA DE SHM	17
2.2	MATERIAIS E ESTRUTURAS INTELIGENTES	18
2.2.1	Materiais piezelétricos	18
2.2.2	Tipos de transdutores piezelétricos	20
2.3	MONITORAMENTOS DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA	21
2.3.1	Técnicas da impedância eletromecânica (EMI)	22
2.4	MÉTRICAS PARA DETECÇÃO DE DANO	24
2.5	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO	25
2.6	REVISÃO DA LITERATURA	27
3	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS/PZT	31
3.1	SOFTWARE PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO BASEADO EM ELEMENTOS FINITOS	31
3.1.1	Elementos finitos	31
3.2	ALGORITMO PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS ACOPLADOS	34
3.2.1	Dimensões físicas do modelo	35
3.2.2	Coordenadas cartesianas (sistema X-Y-Z)	35
3.2.3	Tamanhos dos elementos nos materiais	36
3.2.4	Definir distâncias físicas (coordenadas I-J-K)	36
3.2.5	A geometria do modelo	37
3.2.6	Atribuição de propriedades dos materiais	37
3.2.7	Condições de contorno	38
3.2.8	Colagem nas juntas entre materiais (PZT/estrutura)	39
3.2.9	Zonas computacionais	39
3.2.10	Função de excitação	40
3.2.11	Análise de campo elétrico	41
3.2.12	Registro de dados	42
3.2.13	Simulação do Modelo	42
3.2.14	Algoritmo para cálculos da impedância elétrica do transdutor PZT	43
3.2.15	Aplicação de filtro digital	43
4	MODELOS DESENVOLVIDOS USANDO O SIMULADOR	45
4.1	SETUP MODELOS	45
4.2	ASSINATURAS DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	47
4.2.1	Resultados da simulação	49

4.2.2	Resultados no sistema real (experimental)	50
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA – EXPERIMENTAL x SIMULAÇÃO	51
4.3.1	Análise qualitativa	53
4.3.2	Análise quantitativa	53
4.4	DETECÇÃO DE DANOS USANDO SIMULADOR	54
4.4.1	Detecção de dano nas estruturas planas	54
4.4.2	Estrutura com dano não destrutivo (aumento de massa)	56
4.4.3	Dano destrutivo (buraco)	56
4.4.4	Análise qualitativa	57
4.4.5	Análise quantitativa	57
4.5	DETECÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS CILINDRICAS	60
4.5.1	Estrutura com dano não destrutivo (Aumento de Massa)	60
4.5.2	Análise índice RMSD e CCDM	61
5	EFEITO DA TEMPERATURA	63
5.1	CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS PZT/ ESTRUTURA NO SIMULADOR	63
5.1.1	Efeito da temperatura nos parâmetros do PZT	64
5.1.2	Efeito da temperatura nos parâmetros da estrutura.	65
5.2	ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA APLICADA A TUBO DE AÇO E PLACA DE ALUMÍNIO	65
5.2.1	Caso 1: Deslocamento horizontal da impedância - propriedades do tubo de aço dependentes da temperatura	66
5.2.2	Caso 2: Deslocamento vertical da impedância - propriedades do PZT dependentes da temperatura	67
5.2.3	Caso 3: Deslocamentos horizontal e vertical da impedância	67
5.3	EFEITO DA TEMPERATURA NA DETECÇÃO DE DANO BASEADO NA EMI	70
5.4	COMPENSAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA EM SISTEMAS SHM BASEADO EMI.	71
5.4.1	Algoritmo para compensar o deslocamento de frequência: compensação horizontal	72
5.4.2	Algoritmo para compensar o deslocamento de amplitude: compensação vertical	73
5.5	INTERFACE GRÁFICA PARA COMPENSAR O DESLOCAMENTO DE AMPLITUDE: COMPENSAÇÃO VERTICAL	74
5.6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
5.6.1	Compensação horizontal	76
5.6.2	Compensação completa: horizontal e vertical	77
5.6.3	Compensação horizontal e vertical para diferentes estruturas	78
5.6.4	Detecção de dano sob o efeito da variação de temperatura	80
6	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

Há duas grandes preocupações em termos estruturais nos dias de hoje. Por um lado, construções modernas com padrões e arranjos arquitetônicos inovadores crescem globalmente, de forma acelerada, para atender às mais diversas necessidades da população, seja em grandes centros urbanos ou industriais, exigindo cada vez mais uma atuação rigorosa das áreas de engenharia. Outra preocupação é a redução de custos e os prazos para conclusão de obras, podendo diminuir o rigor na execução de projetos e a vida útil da construção. Como consequência, a corrosão e a fadiga do material podem acelerar a ocorrência de danos estruturais (YI; HUANG; LI, 2017).

O dano pode ser definido como sendo a modificação intencional ou não intencional das propriedades físicas ou geométricas de um sistema, incluindo modificações nas condições de contorno e na conectividade, as quais podem comprometer o funcionamento atual ou futuro do sistema (FARRAR; WORDEN, 2012). Os danos podem apresentar-se de várias formas, sendo as mais frequentes as rachaduras, rupturas, deformações, afrouxamento de juntas de ligações, corrosão, devidos ao desgaste natural ou qualquer outro fator que afete uma estrutura.

Assim, alguns tipos de danos podem comprometer a eficiência e o bom funcionamento de uma estrutura, podendo levar a situações catastróficas com prejuízos econômicos e ambientais, ou a situações graves irreversíveis, como traumas e morte de pessoas inocentes.

Portanto, engenheiros, acadêmicos e pesquisadores preocupados com a integridade dessas novas estruturas têm procurado mecanismos para garantir maior segurança aos usuários através do monitoramento estrutural. Dessa forma, o monitoramento da integridade estrutural, tem atraído um grande número de pesquisadores da área acadêmica e setores da indústria (SONG; GU; MO, 2008). Assim, o SHM passou a se desenvolver muito nos últimos anos, em busca de soluções do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança à vida humana (MITRA; GOPALAKRISHNAN, 2016).

O objetivo principal de um sistema de SHM é monitorar a integridade de uma estrutura, se possível em condições normais de operação, usando técnicas de avaliação *Non-Destructive Evaluation* (NDE), para minimizar custos de reparo e manutenção, proporcionando um maior nível de segurança aos usuários (CORTEZ, 2012).

Pesquisas na área de SHM têm explorado o princípio da EMI que permite o desenvolvimento de sistemas eficientes de fácil implementação. De uma maneira geral, não se busca apenas detectar o dano, mas monitorar a estrutura ao longo do tempo para aumentar a segurança e reduzir custos de manutenção. Muitos estudos para detecção de falhas são realizados utilizando-se placas metálicas em conjunto com cerâmicas do tipo PZT (*Pb-Lead*

Zirconate Titanite), de modo que danos não destrutivos possam ser simulados através de variação de carga (normalmente pequenas cargas coladas na estrutura).

As técnicas de SHM baseadas na EMI dependem de diferentes fatores, como faixa de frequência de excitação da estrutura, número de transdutores de PZT, temperatura ambiente, tipo de estrutura, entre outros.

Na maioria das pesquisas é necessário implementar um grande número de testes experimentais, que nem sempre podem mostrar as influências de vários fatores, como a forma de acoplar o PZT à estrutura, geometria da estrutura, tipo de estrutura, temperatura. No entanto, os métodos baseados na EMI são muito sensíveis às mudanças ambientais, que afetam as propriedades dos transdutores e dificultam sua aplicação em estruturas reais. Nesse sentido, a temperatura ambiente é citada na literatura como um problema crítico para aplicativos baseados na EMI.

No caso específico da temperatura, muitas técnicas têm sido propostas para melhorar o desempenho de sistemas SHM baseados na EMI (KOO *et al.*, 2009; RABELO, 2014). Em geral, a variação de temperatura altera a resposta dinâmica do conjunto PZT/Estrutura e, como consequência, modifica o valor da impedância elétrica medida no sensor/atuador PZT.

Os sistemas de SHM baseados na técnica da EMI normalmente utilizam analisadores de impedância comerciais de custo elevado, que precisam altas capacidades de armazenamento e poder computacional para processamento de dados, instrumentos esses com características proibitivas para muitos experimentos. Assim, em alguns casos, os testes experimentais utilizando sistemas acoplados Estrutura/PZT tornam-se dispendiosos ou mesmo impossíveis de serem realizados.

Com a finalidade de simplificar o estudo do desenvolvimento de técnicas SHM baseadas na EMI, o uso de métodos numéricos tornou-se importante. Nesse sentido, o software PZFlex, baseado na análise de Elementos Finitos (FE), tem sido utilizado como ferramenta computacional dedicada à simulação de sistemas que exploram materiais piezelétricos, permitindo sua aplicação no estudo de técnicas SHM baseadas na EMI.

Nesse trabalho são apresentados e discutidos procedimentos para criar modelos de sistemas acoplados (Estrutura-metálica/transdutor-de-PZT) usando análise de elementos finitos que possam ser aplicados nos estudos de sistemas SHM baseados na EMI. A vantagem desses modelos é a facilidade de investigar a influência de diferentes fatores que afetam a resposta dinâmica do sistema, como por exemplo a temperatura, sendo possível avaliar diferentes geometrias de estrutura. A ferramenta utilizada para a modelagem é o software PZFlex, que permite obter as grandezas elétricas de resposta dos dispositivos piezelétricos. Assim, foram

modeladas, simuladas e analisadas estruturas acopladas, como placa-de-alumínio/PZT e tubo-de-aço/PZT, incluindo cargas e/ou danos destrutivos. Os resultados das simulações, quando comparados com os equivalentes obtidos de modelos experimentais, são avaliados através de dois coeficientes estatísticos de correlação, para validar o modelo criado.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho visa contribuir com as pesquisas na área de SHM através de estudos analíticos e numéricos que permitam propor modelos de sistemas acoplados estrutura/PZT, tendo como ferramenta básica o software PZFlex, com os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os sistemas de SHM, baseados nas técnicas da EMI;
- Apresentar e validar procedimentos e algoritmos para criar modelos de sistemas acoplados (Estrutura-metálica/transdutor-de-PZT) utilizando PZFlex;
- Analisar e discutir as assinaturas de impedância elétrica de sensores e atuadores de PZT, para diferentes sistemas acoplados Estrutura/PZT simulados, em resposta à presença de danos gerados em diferentes localizações da estrutura;
- Analisar o efeito da variação da temperatura, em diferentes sistemas acoplados, para uma ampla faixa de frequência e temperatura;
- Propor um método para compensar o efeito da temperatura nas medições da impedância elétrica, para uma ampla faixa de frequência e temperatura, a fim de evitar falsa detecção de dano.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

O conteúdo da tese está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir.

Nesse Capítulo foi apresentado uma contextualização do tema estudado, por meio da motivação, problemática e dos objetivos da pesquisa.

No Segundo Capítulo são mostrados os sistemas SHM, os materiais inteligentes, os tipos de transdutores piezelétricos, a técnica da EMI, métricas de detecções de danos, os coeficientes de correlação de *Pearson* e *Sperman* para validar os resultados simulados com experimentos reais e a revisão da literatura mostrando algumas aplicações do sistema SHM baseado na técnica de EMI.

No Terceiro Capítulo são abordados os métodos para modelagem de estruturas metálicas e piezelétricos utilizando o software PZFlex, baseado no método dos elementos finitos, para modelar, simular, analisar e avaliar sistemas de SHM baseados na técnica da EMI.

No Quarto Capítulo são desenvolvidos os modelos de estruturas planas e tubular usando simulador, e apresentado setup experimental com materiais empregado na simulação e nos experimentos reais, resultados obtidos nos dois sistemas real e simulado, comparações e validações dos resultados obtidos. São analisados os resultados das simulações dos sistemas acoplados, incluindo danos.

No Quinto Capítulo é apresentado um estudo e caracterização do efeito da temperatura através do simulador e experimentos reais. Assim, será exposto um algoritmo computacional para descrever o processo de desenvolvimento de um modelo simulado e os resultados obtidos com dados experimentais. Os resultados obtidos mediante simulações e resultados experimentais serão analisados e discutidos, aplicando o método de compensação proposto.

Finalmente, no Sexto Capítulo, são apresentadas as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2 MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL

As pesquisas na área de SHM estão em avanço constante, na busca contínua de novas maneiras de aprimorar a confiabilidade e garantir segurança de estruturas básicas na área da engenharia civil e aeroespacial e setores na área de energia, que também passaram a ser objetos de estudo na área de SHM.

Os sistemas de SHM baseados na técnica da EMI é uma ferramenta promissora nos métodos de NDE, utilizando os benefícios dos piezelétricos, que são amplamente utilizados para identificação de danos estruturais.

Nesse capítulo são apresentados os fundamentos básicos dos sistemas de SHM, cerâmicas piezoelétricas de PZT e as principais características da técnica da EMI.

2.1 SISTEMA DE SHM

O SHM é definido na literatura como a aquisição, validação e análise de dados técnicos para facilitar as decisões de gestão durante o ciclo de vida de uma estrutura (FARRAR; WORDEN, 2012). Os procedimentos mais antigos de SHM eram baseados em inspeção visual, sendo que o interesse da engenharia em monitorar essas estruturas de maneira mais automática começou por volta da década de 1970, Lifshitz e Rotem (1969) demonstra a primeira detecção de dano através de medidas de vibração.

Dois fatos importantes podem justificar a utilização do monitoramento da integridade estrutural, a proteção da vida e o avanço da otimização de recursos na indústria. A primeira justificativa é a mais importante e envolve diferentes estruturas, como aeronaves, pontes, prédios, torres, tubulações de gás, etc. A segunda é a necessidade da própria indústria, que impulsiona as pesquisas nessa área buscando estruturas mais seguras e com menor custo de manutenção, aliando economia e segurança.

Como mencionado anteriormente, os primeiros procedimentos usados para monitorar estruturas eram baseados em inspeções visuais de rotinas realizadas por operadores ou engenheiros. Nesse tipo de inspeção, o objetivo era visualizar problemas estruturais, tais como rachaduras, trincas, corrosões e outros possíveis danos em estado inicial. Na maioria das estruturas submetidas a inspeções visuais de rotina é possível obter uma melhor estabilidade estrutural. Além disso, a detecção de dano em um estágio inicial diminui o impacto econômico e garante uma estrutura mais saudável e segura. No entanto, esse tipo de monitoramento pode ter um custo muito elevado.

Muitas técnicas utilizadas em sistemas de SHM têm origem nos métodos de avaliação NDE, tais como emissão acústica, vácuo comparativo, ondas de *Lamb*, inspeção por partícula

magnética, correntes de *Eddy* e baseadas em fibra óptica. Detalhes e referências para essas e outras técnicas podem ser encontradas na revisão bibliográfica feita por Sohn *et al.* (2004).

Um dos métodos de SHM que tem recebido bastante atenção dos pesquisadores nos últimos anos, traz como base a análise comparativa da impedância eletromecânica, e tem sido estudado como uma ferramenta promissora para identificação de falhas estruturais em tempo real. O principal elemento do método é o transdutor piezelétrico, considerado um dos elementos mais importantes em diferentes sistemas de SHM (PARK; FARRAR, 2009; PARK *et al.*, 2003).

2.2 MATERIAIS E ESTRUTURAS INTELIGENTES

Materiais inteligentes são capazes de responder a estímulos ou mudanças no ambiente para se adaptarem e funcionar adequadamente. Porém, de uma maneira geral, esta inteligência também está associada a um conjunto de dispositivos, que inclui, além do próprio material, todo um aparato eletrônico para controle de operações, como excitação de um atuador e resposta de um sensor. Materiais inteligentes são utilizados comumente como sensores e atuadores em estruturas ou sistemas inteligentes. Entre muitas possibilidades de materiais inteligentes, as cerâmicas piezelétricas vêm sendo utilizadas por muitos pesquisadores em SHM.

2.2.1 Materiais piezelétricos

São materiais que respondem às variações mecânicas ou elétricas e por isso são considerados como materiais inteligentes, como as cerâmicas piezelétricas, que apresentam certos materiais cristalinos capaz de gerar uma carga elétrica proporcional ao estresse mecânico (JAFFE, 1971).

As propriedades piezelétricas são fenômenos naturais em alguns materiais cristalinos como cristais de quartzo, todavia, respostas piezelétricas em certos materiais policristalinos, como as cerâmicas piezelétricas de PZT, podem ser induzidos através da polarização elétrica (GIURGIUTIU; ROGERS, 1997).

Quando um campo elétrico é aplicado nesse tipo de material, o efeito piezelétrico produz uma deformação mecânica no material, neste caso, a cerâmica piezelétrica pode ser usada como atuador (HANSELKA; NUFFER, 2009). Quando uma carga mecânica atua sobre uma cerâmica piezelétrica, o seu efeito piezelétrico gera uma carga elétrica na superfície, neste caso, a cerâmica piezelétrica pode ser utilizada como sensor para medir parâmetros mecânicos, tais como força, tensão, aceleração, etc.

Deve-se destacar que esses efeitos não são os mesmos, ou seja, sensores transformam energia mecânica em grandezas elétricas mensuráveis e atuadores transformam outras formas de energia em energia mecânica. De maneira geral o material piezelétrico como sensor é

resultado do efeito direto (conversão de energia mecânica em elétrica) e como atuador é resultado de um efeito inverso (conversão de energia elétrica em mecânica).

Para compreender melhor esses efeitos, pode ser consultado a teoria linear de piezeletricidade (MEITZLER *et al.*, 1987), que é aplicável para pequenas mudanças nos parâmetros mecânicos e elétricos, dessa forma, a cerâmica piezelétrica é descrita pelas equações (1) e (2) em notação tensorial.

$$D_j = d_{jkl} T_{kl} + \varepsilon_{jk}^T E_k \quad (\text{efeito direto}) \quad (1)$$

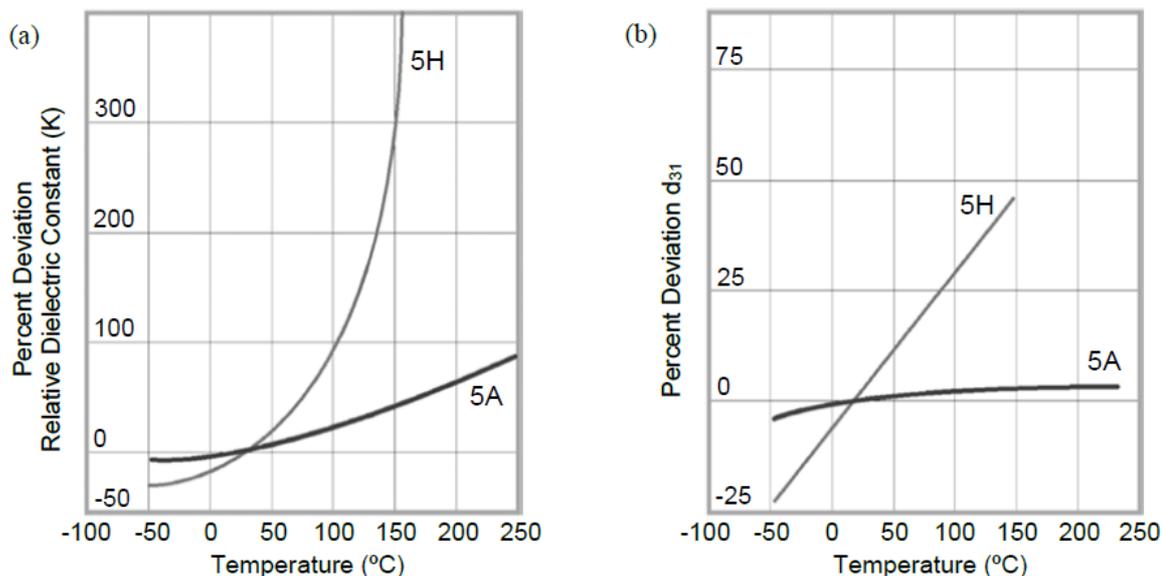
$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (\text{efeito inverso}) \quad (2)$$

As equações (1) e (2) definem uma relação entre a deformação mecânica, S_{ij} , a tensão mecânica, T_{kl} , o campo elétrico, E_k e o deslocamento elétrico, D_j , que são acoplados através do coeficiente de elasticidade s_{ijkl}^E medido com campo elétrico zero ($E = 0$), da permissividade dielétrica ε_{jk}^T medida com tensão mecânica nula ($T = 0$) e do coeficiente piezelétrico d_{kij} .

Importante destacar que algumas propriedades das cerâmicas piezelétricas de PZT, como a constante dielétrica e a constante de deformação, são fortemente dependentes da temperatura (PARK; FARRAR, 2009). Dessa forma alguns fabricantes de cerâmicas piezelétricas fornecem gráficos de algumas propriedades em função da temperatura (MURATA, 2008; PIEZO SYSTEMS, 2011), como apresentado nas Figuras 1(a) e 1(b) algumas das propriedades das cerâmicas PSI-5A e PSI-5H.

Além disso, vários estudos têm sido realizados com o objetivo de caracterizar, em função da temperatura, as constantes elásticas, dielétricas e piezelétricas, componentes da matriz reduzida das constantes dos materiais piezelétricos (SHERRIT *et al.*, 1999; SABAT; MUKHERJEE, 2007).

Figura 1 – Influência da temperatura sobre (a) constante dielétrica relativa e (b) constante de acoplamento piezométrico, propriedades das cerâmicas piezométricas PSI-5A e PSI-5H.



Fonte: Piezo Systems (2011).

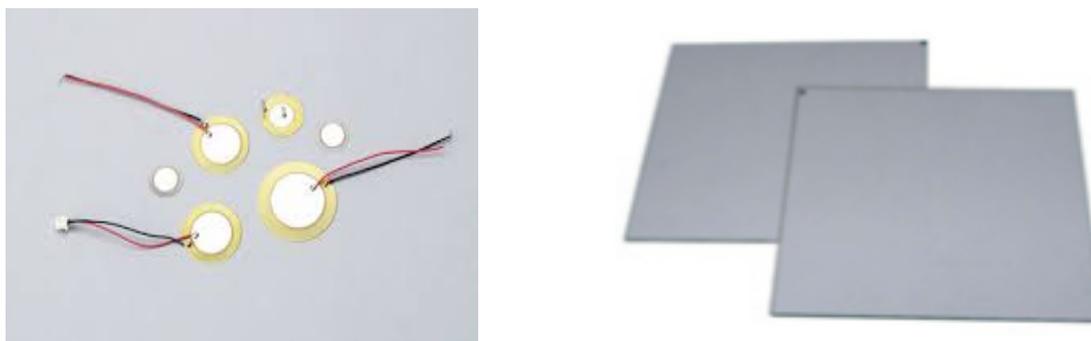
2.2.2 Tipos de transdutores piezométricos

Transdutor piezométrico é um tipo de transdutor eletroacústico que converte cargas elétricas produzidas por alguma forma de material sólido em energia. A palavra “piezo” tem origem grega e significa pressão. Já a palavra “piezométrica” significa literalmente eletricidade causada por pressão. Uma aplicação da tecnologia transdutor piezo ocorreu durante 1ª Guerra Mundial que usou o sonar para detectar a presença de navios inimigos.

Originalmente os transdutores eram feitos de cristais de quartzo, mas depois as cerâmicas piezométricas se tornaram o material primário. Conforme Banks, Smith e Wang (1996), os transdutores piezométricos têm uma grande vantagem, pois possuem uma flexibilidade de uso em várias situações e podem ser moldados na forma e tamanho desejados para monitorar uma estrutura, além da capacidade de ser utilizado com baixa tensão e em altas temperaturas (acima de 300°C). Na maioria das aplicações, os transdutores de PZT utilizados na técnica da EMI são constituídos de finas placas de cerâmica de PZT revestidas, em ambas as faces, por um filme metálico que é utilizado como eletrodo, os transdutores podem ser cortados no formato desejado (BAPTISTA, 2010).

Na Figura 2, são apresentadas algumas ilustrações de tipos de transdutores de cerâmica piezométrica, essas cerâmicas são fornecidas em vários tamanhos, diversas espessuras e formas.

Figura 2 – PZT (Titanato Zirconato de Chumbo).



Fonte: Hinkle, Wiesrma e Jurs (2002).

As cerâmicas piezelétricas da família PZT (PbTiO_3 ; PbZrO_3) são largamente usadas em atuadores eletromecânicos, sensores, transdutores de ultrassom, entre outras aplicações (GALLEGO-JUÁREZ, 1989; ZHANG; ZHAO, 1999).

A vantagem das cerâmicas de PZT é que as suas características físicas, químicas e piezelétricas podem ser ajustadas conforme a aplicação. Elas podem ainda ser confeccionadas em uma infinidade de formatos por causa do processo de fabricação por aglomeração de partículas. O PZT é um material piezelétrico muito utilizado em estruturas inteligentes por causa de sua versatilidade, sua alta temperatura de *Curie* e de suas fortes características piezelétricas, entre outros fatores (CORTEZ, 2012).

Os tipos de sensores e atuadores mais utilizados são o PZT, o Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) e o *Macro Fiber Composite* (MFC). Neste trabalho são utilizadas cerâmicas de PZT produzidas pela Piezo Systems, frequentemente utilizadas em aplicações de SHM.

2.3 MONITORAMENTOS DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

Sistemas de SHM baseados na impedância eletromecânica são utilizados para detectar alterações na rigidez estrutural, amortecimento e massa. Os sensores e atuadores consistem em pequenas pastilhas de cerâmicas piezelétricas, geralmente de tamanho $25 \times 25 \times 0,02$ mm, usados para medir a impedância e a resposta dinâmica local.

Um sistema de monitoramento baseado na técnica da impedância utiliza ambos os efeitos piezelétricos (direto e reverso), simultaneamente, para obter uma assinatura de impedância para a estrutura (PARK; INMAN, 2005).

2.3.1 Técnicas da impedância eletromecânica (EMI)

A EMI é uma técnica de detecção de dano, desenvolvida por Sun *et al.* (1994), baseada na utilização acoplamento eletromecânico, que utiliza materiais inteligentes como as cerâmicas piezelétricas de PZT numa configuração de atuador e sensor que podem ser facilmente incorporados a uma estrutura hospedeira.

O princípio básico da técnica consiste em monitorar a variação da impedância mecânica de uma estrutura causada pela presença de danos. Como a medição da impedância mecânica das estruturas é difícil de ser obtida, a técnica da EMI utiliza as medições da impedância elétrica de sensores piezelétricos para monitorar as estruturas (PARK; INMAN, 2005).

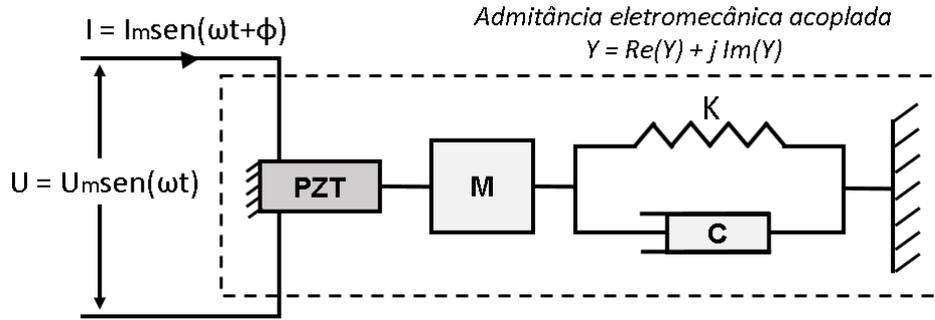
Nessa técnica, os dados para a avaliação da estrutura são coletados em condição dinâmica por meio de excitação natural ou forçada. Na excitação natural, a vibração produzida pelo ambiente em condições normais de operação da estrutura é aproveitada. Por outro lado, a excitação forçada é feita de forma controlada por atuadores e transdutores piezelétricos.

Devido ao efeito piezelétrico, existe uma relação entre a impedância mecânica de uma estrutura e a impedância elétrica de um transdutor piezelétrico, colado à estrutura, de forma que qualquer variação na impedância mecânica da estrutura, causada por um dano, pode ocasionar uma correspondente variação na impedância elétrica do transdutor (LIANG; SUN; ROGERS, 1994).

Assim, no processo de medição da impedância elétrica do transdutor, na técnica da EMI, utilizam-se os efeitos piezelétricos direto e inverso. Ao aplicar um campo elétrico alternado de alta frequência no transdutor de PZT, colado à estrutura, uma pequena deformação é produzida no transdutor, então, a resposta da área próxima ao sensor a essa vibração mecânica é transferida de volta ao transdutor em forma de uma resposta elétrica. Se houver um dano na estrutura, a resposta dinâmica mecânica irá mudar, o que conseqüentemente, provocará também uma mudança na resposta elétrica do transdutor de PZT (PARK; INMAN; 2005).

Um modelo eletromecânico que descreve o processo de medição de impedância é apresentado na Figura 3. No modelo, um transdutor PZT é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial em resposta à aplicação de tensão elétrica alternada. Uma extremidade é fixa e a outra é conectada a uma estrutura, representada por um sistema de um grau de liberdade (LIANG; SUN; ROGERS, 1994).

Figura 3 – Transdutor de PZT e a estrutura monitorada (modelo eletromecânico do tipo massa-mola).



Fonte: Liang, Sun e Rogers (1994).

Na Figura 3, M é a massa, K é a constante elástica da mola e C o coeficiente de amortecimento. O transdutor é excitado por uma fonte de tensão senoidal U com amplitude U_m e frequência angular ω que produz uma corrente I com amplitude I_m e fase Φ .

Considerando-se que as propriedades do transdutor sejam invariáveis no tempo, qualquer mudança na estrutura irá afetar o valor da impedância do sistema.

A solução do sistema apresentado na Figura 3 em termos da impedância elétrica do transdutor é dada, de acordo com Liang, Sun e Rogers (1994), pela equação 3:

$$Z_E(\omega) = \frac{U}{I} = \frac{1}{i\omega} \frac{l_a}{w_a h_a} \left(\bar{\epsilon}_{33}^T - \frac{Z_s(\omega)}{Z_a(\omega) + Z_s(\omega)} d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E \right)^{-1} \quad (3)$$

sendo $Z_E(\omega)$ a impedância elétrica do transdutor; $Z_a(\omega)$ e $Z_s(\omega)$ as impedâncias mecânicas do PZT e da estrutura monitorada, respectivamente; U é a tensão de entrada aplicada ao PZT atuador; I é a corrente de saída do PZT atuador; d_{32} é a constante de acoplamento piezoeletrico; $\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica do PZT a uma tensão mecânica constante e \bar{Y}_{22}^E é o módulo de Young; w_a , h_a e l_a são a largura, espessura e comprimento do PZT atuador, respectivamente.

De acordo com a equação (3), qualquer alteração na impedância mecânica da estrutura, provocada por um dano ou mudanças de temperatura causam variações significativas nas medições de impedância elétrica (BAPTISTA *et al.*, 2014; KABEYA, 1998; SEPEHRY; SHAMSHIRSAZ; ABDOLLAHI, 2011; CORTEZ, 2015). Essas variações são devidas ao fato de que as propriedades da estrutura e do PZT serem afetadas pela temperatura (SABAT; MUKHERJEE, 2007; HOOKER, 1998).

Dessa forma, a técnica da EMI permite que a integridade da estrutura seja avaliada de uma maneira simples através da medição da impedância elétrica do transdutor de PZT.

Uma das grandes vantagens da técnica da EMI é a utilização de um pequeno pedaço de cerâmicas de PZT como atuadores/sensores para fazer o monitoramento de locais de difícil acesso,

outra vantagem é a possibilidade de implementação de sistemas de SHM em tempo real, facilitando a detecção do dano de forma imediata a qualquer alteração na estrutura monitorada.

Mas a técnica da EMI apresenta desvantagens, uma delas que podemos destacar, é a variação de temperatura ambiente que afeta as propriedades da cerâmica piezoeétrica e da estrutura, e dificultam as aplicações em estruturas reais. Dessa forma, as variações de temperatura afetam a resposta dinâmica de uma estrutura, provocando mudanças nos resultados da medição da impedância elétrica em um transdutor PZT acoplado a essa estrutura, podendo levar a um falso dano (falso positivo), causado somente pelo efeito de temperatura. (BAPTISTA *et al.*, 2014; KOO *et al.*, 2009; SUN *et al.*, 1995).

Dessa forma, para realizar a identificação de danos, de forma quantitativa, uma comparação da assinatura *baseline* com a assinatura de monitoramento é feita por meio de métricas estatísticas, as quais serão apresentadas na próxima seção.

O termo *baseline* é muito utilizado para a assinatura obtida quando a estrutura se encontra em um estado íntegro. Cortez (2015) denomina como assinatura de monitoramento, a assinatura obtida quando a estrutura se encontra sob inspeção com dano ou não.

2.4 MÉTRICAS PARA DETECÇÃO DE DANO

De forma geral, a identificação de danos utilizando a técnica da EMI, é realizada por meio da comparação da assinatura de impedância elétrica no estado íntegro (condição inicial sem danos) *baseline* e a assinatura em um estado desconhecido denominado assinatura de monitoramento.

Comparando as assinaturas de *baseline* e de monitoramento, através de índices estatísticos de falha métrica, é possível identificar o dano. Os índices mais utilizados na literatura são o desvio da raiz média quadrática *Root Mean Square Deviation* (RMSD), e a métrica do desvio do coeficiente de correlação *Correlation Coefficient Deviation Metric* (CCDM). Geralmente, o índice CCDM é mais sensível à mudança no formato da assinatura de impedância e o RMSD é mais sensível às variações das amplitudes da assinatura de impedância. Quanto menores os valores das métricas, mais “próximas” são as assinaturas.

O índice RMSD é baseado na distância Euclidiana entre as duas assinaturas, (GIURGIUTIU; ROGERS, 1997). Esse índice sofreu várias modificações por muitos pesquisadores, um dos mais utilizados é o da Equação (4)

$$RMSD = \sum_n^N \sqrt{\frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,h}^2}} \quad (4)$$

sendo:

$Z_{n,h}$ a impedância elétrica do transdutor com a estrutura íntegra

$Z_{n,d}$ a impedância após a ocorrência de um dano, ambas medidas na frequência n

N é o número total de amostras.

Já o índice CCDM é obtido pela Equação (5):

$$CCDM = 1 - C_c \quad (5)$$

Onde C_c é o coeficiente de correlação, dado pela Equação (6):

$$C_c = \left| \frac{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)(Z_{n,d} - \bar{Z}_d)}{\sqrt{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)^2} \sqrt{\sum_n^N (Z_{n,d} - \bar{Z}_d)^2}} \right| \quad (6)$$

sendo \bar{Z}_h e \bar{Z}_d são as médias da impedância na faixa de frequência considerada, obtidas antes e depois do dano, respectivamente, dadas pela Equação 7:

$$\bar{Z}_h = \frac{1}{N} \sum_n^N Z_{n,h} \quad \bar{Z}_d = \frac{1}{N} \sum_n^N Z_{n,d} \quad (7)$$

$\bar{Z}_{n,h}$ e $\bar{Z}_{n,d}$ podem ser tanto o módulo da impedância elétrica do transdutor como a parte real (resistência) ou imaginária (reatância). Embora alguns pesquisadores recomendem o uso da parte real (BHALLA; NAIDU; SOH, 2003, SUN *et al.*, 1995), ainda não há um consenso na literatura de qual componente da impedância é mais adequada.

Os índices RMSD e CCDM são calculados para uma faixa de frequência que contém as frequências naturais da estrutura, mais sensíveis ao dano. Para selecionar essa faixa de frequência é utilizada uma metodologia observando os dados obtidos em uma quantidade considerável de testes. Outro ponto importante é que as frequências dessa faixa selecionada devem ser altas, o suficiente para que tenha um comprimento de onda menor que o tamanho do dano que se deseja detectar (NOKES; CLOUD, 1993). Frequências elevadas, entretanto, limitam a região de sensibilidade do transdutor, mas esse efeito pode ser compensado para a localização de dano em sistemas que utilizam rede de transdutores (PARK *et al.*, 2003).

2.5 COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO

Os coeficientes estatísticos de correlação são, geralmente, utilizados para avaliar o grau de relacionamento entre duas ou mais variáveis, sendo possível descobrir com relativa precisão, o quanto uma variável interfere no resultado de outra. Portanto, a fim de validar e

garantir que as assinaturas de impedância elétrica de transdutores de PZT, obtidos através das simulações, sejam idôneos para analisar sistemas de SHM baseados na EMI, serão utilizados os coeficientes de correlação de *Pearson* e de *Spearman*, avaliando o grau de relacionamento com as assinaturas de impedância elétrica obtidos por meio do simulador com os experimentos reais.

Primeiramente para medir o grau de correlação entre duas variáveis de escala métrica Z_S (impedância do simulador) e Z_E (impedância do experimento real), foi utilizado o coeficiente de correlação de *Pearson*, onde os valores de Cc são tabulados, a fim de indicar certo grau de correlação.

O coeficiente de correlação de *Pearson* definida na Equação (8) foi condicionado para avaliar o grau de correlação das assinaturas da impedância elétrica obtidas através do simulador e o resultado experimental.

$$Cc = \left| \frac{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_S(k) - \bar{Z}_S] [Z_E(k) - \bar{Z}_E]}{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_S(k) - \bar{Z}_S]^2 \sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_E(k) - \bar{Z}_E]^2} \right| \quad (8)$$

Desta forma, um valor do Cc compreendido dentro da faixa entre 0,8 e 1, denota a existência de uma forte correlação entre as variáveis analisadas, conforme Hinkle, Wiersma, e Jurs (2002), demonstrado na Tabela 1, onde esse valor varia de 0 a 1.

Onde $Z_S(k)$ e $Z_E(k)$ são as assinaturas da impedância elétrica obtidas na simulação e do modelo experimental, respectivamente. \bar{Z}_S e \bar{Z}_E são as médias dessas assinaturas na faixa de frequência selecionada de (ω_I a ω_F).

Tabela 1 - Interpretação dos índices de correlação.

Grau de correlação	Interpretação
0.00 a 0.19	Uma correlação bem fraca
0.20 a 0.39	Uma correlação fraca
0,40 a 0.69	Uma correlação moderada
0.70 a 0.89	Uma correlação forte
0.90 a 1.00	Uma correlação muito forte

Fonte: Adaptada de Devore (2006).

Outro coeficiente aplicado para validar os resultados do simulador foi o coeficiente de correlação de *Spearman* que pode ser utilizado para sistemas lineares e não lineares. O coeficiente de correlação de *Spearman* é frequentemente descrito como sendo "não paramétrico". Isto pode ter dois sentidos. Em primeiro lugar, uma correlação de *Spearman*

perfeita ocorre quando as possíveis variáveis x e y estão relacionadas por qualquer função monótona, em contraste com a correlação de *Pearson*, que dá um valor perfeito quando x e y estão relacionadas por uma função linear conforme a Equação (9).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (9)$$

em que $d_i = r_{X_i} - r_{Y_i}$, com r_{X_i} e r_{Y_i} variam de 1 a n .

O valor máximo para o coeficiente de correlação de *Spearman* ($r_s = 1$) ocorre quando todos os valores de d_i são nulos, e o valor mínimo é obtido quando a soma dos quadrados das

diferenças é máxima e igual a $\frac{n^3 - n}{3}$, portanto $r_s = -1$.

2.6 REVISÃO DA LITERATURA

Para estudar e desenvolver sistemas de SHM, baseados na EMI, são necessários utilizar pequenos recortes de PZT acoplados às estruturas. Os PZT's podem ser de diferentes modelos e formas geométricas. Os danos simulados podem ser de natureza destrutiva e não destrutiva. Portanto, para fins experimentais, na grande maioria de casos têm-se perda significativa de materiais, principalmente quando simulam danos destrutivos na estrutura analisada. Outro ponto importante a se destacar é que na maioria dos trabalhos apresentados utilizam-se caros analisadores de impedância, câmeras térmicas e outros, agregando um custo elevado à pesquisa, e que em muitas das vezes tornam o experimento proibitivo para um grande número de aplicações.

Portanto, a fim de simplificar o estudo e o desenvolvimento de técnicas de SHM baseadas na EMI, o uso de métodos numéricos tornou-se importante. Assim, existem vários estudos que utilizam simuladores numéricos, baseados em elementos finitos (FE), tais como *ANSYS*, *PZFlex* ou *ABAQUS*, todos aplicados a sistemas de SHM.

Dessa forma, nesta seção faz-se uma análise de alguns trabalhos que avaliam impedância elétrica em aplicações de SHM usando método de elementos finitos, investigando o efeito da temperatura nas assinaturas de impedância de transdutores piezelétricos colados às estruturas e estudos desenvolvidos em estruturas cilíndricas (tubos e dutos).

Em Lim e Soh (2016) foi criado um modelo tridimensional de estrutura metálica (uma placa de alumínio) usando o simulador *ANSYS*. Foram criados danos de fadiga na placa de alumínio, danos destrutivos. O modelo simulado foi comparado com o experimento real

avaliando três estágios de danos usando a técnica da EMI e cerâmicas piezelétricos de PZT na estrutura monitorada. Os resultados demonstraram que a técnica é muito sensível para monitorar a propagação de falhas de fadiga, tanto no experimento real, como no simulado.

Havránek *et al.* (2015) apresentou resultados comparando o uso do simulador com um experimento real em diferentes faixas de frequência e tipos de modelos de cerâmicas piezelétricas de PZT. Foi analisado a impedância elétrica usando sensores de emissão acústica para diagnóstico não destrutivo. A análise foi realizada em primeiro lugar numericamente com modelagem de elementos finitos e, posteriormente, em comparação com os resultados experimentais obtidos por medição, com o analisador de impedância de precisão. As simulações foram realizadas utilizando software de modelagem de elementos finitos, *COMSOL*.

O efeito do campo acústico para determinar a melhor configuração de cerâmicas piezelétricas de PZT-5H, quanto ao número de anéis, espaçamento entre eles e a necessidade de separação, foram simulados utilizando o software *PZFlex*. A partir dos resultados das simulações do campo acústico gerado pelos transdutores de matriz anular, como contribuição do trabalho, conclui-se que, é possível construir um transdutor com as mesmas características da simulação para comparação de medições reais com os resultados das simulações executadas (NASCIMENTO, 2013).

O uso do método de elementos finitos foi investigado por análises numéricas e simulações de modelos simples, com piezelétricos livres em várias formas e espessuras para diferentes tipos de estrutura, a fim de detectar os locais de danos e investigar o efeito da temperatura, utilizando o software *ANSYS* (DJEMANA; HRAIRI, 2016). Observa-se nos resultados, viabilidade de utilização da simulação numérica para o diagnóstico de danos e o efeito da temperatura.

No entanto, os métodos baseados na EMI são muito sensíveis às mudanças de temperatura, que afetam diretamente as propriedades dos transdutores. Nesse sentido, a temperatura ambiente é citada na literatura como um problema crítico para aplicativos baseados na EMI, dessa forma vários autores têm investigado os efeitos da temperatura em sistemas acoplados (Estrutura/PZT) de forma experimental.

Dentre os estudos realizados podem-se citar Sun *et al.* (1995), Krishnamurthy, Lalande e Rogers (1996), Park *et al.* (1999), Koo *et al.* (2009), Sepehry, Shamshirsaz e Abdollahi (2011), Baptista *et al.* (2014). Nos trabalhos citados foram utilizados diversos sistemas acoplados, monitorados a diferentes faixas de temperatura e frequência, com dimensões e formatos variados. Já como estruturas hospedeiras foi utilizada placas de alumínio ou liga de alumínio 2024 de diferentes dimensões.

Em Koo *et al.* (2009) e Rabelo (2014) foi identificado que a variação de temperatura causa variações significativas nas assinaturas de impedância nos eixos vertical (magnitude) e horizontal (frequência). Verificou-se que a mudança de frequência da impedância elétrica não é constante, mas aumenta com a frequência de excitação. Observado também que os deslocamentos horizontais de cada ponto do espectro não são constantes para uma certa variação de temperatura, pois quanto maior é a frequência do ponto analisado, maior será o deslocamento horizontal do mesmo. Ou seja, os deslocamentos horizontais dependem tanto da temperatura quanto da frequência.

Por outro lado, a diminuição do módulo da impedância elétrica do PZT é atribuída ao aumento da capacitância do transdutor piezolétrico com o aumento da temperatura (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996; SEPEHRY; SHAMSHIRSAZ; ABDOLLAHI, 2011; BAPTISTA *et al.*, 2014). Já o deslocamento horizontal é atribuído à variação das propriedades do material com o aumento da temperatura (SEPEHRY; SHAMSHIRSAZ; ABDOLLAHI, 2011).

Um dos primeiros trabalhos realizados com tubulações, apresenta a avaliação de uma estrutura, por meio do monitoramento das condições de parafusos em franges que acoplam essas tubulações. Os autores utilizaram um analisador de impedância HP4194, realizando medições da parte real da impedância em uma faixa de frequência de 80 a 100 kHz, buscando detectar e analisar os danos à medida que foram retirados parafusos dessas franges (PARK; INMAN, 2005). Os referidos autores também realizaram testes na mesma estrutura tubular, desta vez utilizando um analisador de impedância HP36665A para detectar cinco tipos de danos na faixa de frequências de 35-47.8 kHz (PEAIRS; PARK; INMAN, 2004).

Vários testes experimentais foram feitos utilizando diferentes tipos e tamanhos de estruturas tubulares e vários modelos de cerâmicas piezolétricas. Para a detecção de danos nessas estruturas tubulares, utilizaram dois índices de falha métrica, o *Root Mean Square Deviation* (RMSD) e o *Correlation Coefficient Deviation Metric* (CCDM). Nesse trabalho foi observado que foi possível identificar danos no corpo principal dos segmentos do tubo, onde é demonstrado que é viável a detecção de danos em estruturas tubulares utilizando transdutores piezolétrico de baixo custo (PITA; TURRA; VIEIRA FILHO, 2013).

Mitra e Gopalakrishnan (2016) apresentam um artigo que faz uma revisão de diversos trabalhos desenvolvidos de forma compilada desenvolvidos nos últimos anos, na área de SHM utilizando ondas guiadas em estruturas tubulares.

Como contribuição para o campo de estudo da SHM, no próximo capítulo apresenta-se o desenvolvimento e implementação de uma metodologia para modelagem de sistemas

PZT/estrutura acoplados por meio do software PZFlex, onde são discutidos os resultados experimentais e simulados.

3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS/PZT

O uso de um simulador é um método computacional capaz de prever como um sistema reage ao estímulo do mundo real usando FE, como vibração, temperatura, fluxo de fluido e outros efeitos físicos. No entanto, não é suficiente ter um poderoso software de simulação sem desenvolver um modelo preciso para simular, que satisfaça todos os critérios para obter resultados precisos. Embora o PZFlex simule transdutores piezoelétricos ligados a estruturas hospedeiras em suas formas e tamanhos mais variados, deve-se considerar que a eficácia da modelagem é proporcional à precisão das propriedades do material, fidelidade ao modelo geométrico, detalhes do processo de fabricação e estratégias de projeto (NASCIMENTO, 2013).

Além disso, aproveitando o simulador, é possível ter um controle personalizado dos parâmetros dependentes da temperatura e usar solucionadores específicos para calcular diferentes magnitudes eletromecânicas como tensão, carga, impedância, etc.

Além do PZFlex existem outros programas para modelagem e simulação, como ANSYS, COMSOL, ATILA, disponíveis comercialmente, que são baseados também em elementos finitos.

3.1 SOFTWARE PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO BASEADO EM ELEMENTOS FINITOS

O PZFlex é um software baseado na análise de elementos finitos, que permite modelar e simular a resposta dinâmica de matérias piezelétricos de PZT acoplados a estruturas. Por meio do PZFlex é possível analisar elementos sólidos e líquidos considerando diversos fenômenos acoplados ou multifísicos, em particular os efeitos do acoplamento eletromecânico em materiais piezelétricos. Utilizando as suas ferramentas de pós-processamento, é possível gerar espectros de impedância elétrica, obter informações dos perfis do feixe acústico, entre outros recursos como o tempo de simulação (CHAN, 2011; NASCIMENTO, 2013).

3.1.1 Elementos finitos

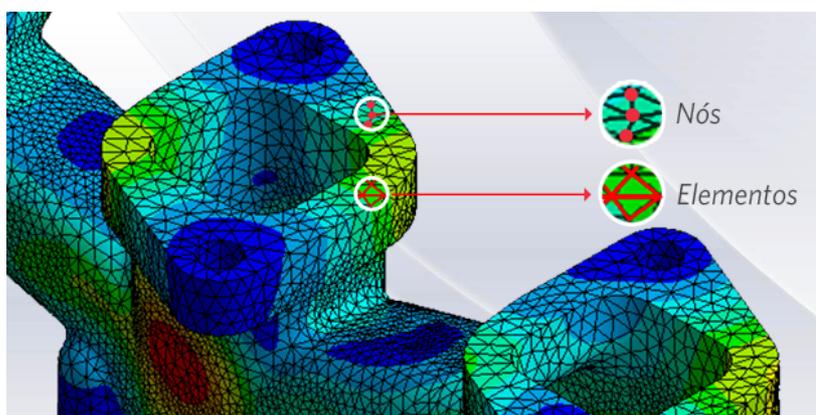
O Método dos Elementos Finitos é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados (LOTTI *et al.*, 2006).

Segundo Assan (2003), o conceito para dividir um objeto é antigo, foi utilizado pela primeira vez há mais de dois mil anos por filósofos gregos que haviam elaborado teorias de que todos os objetos eram divididos em inúmeras partículas. O método de exaustão criado por

Eudóxo que consiste em inscrever e circunscrever figuras retilíneas em figura curvilíneas, discretizando figuras contínuas facilita os cálculos de áreas e volumes.

O uso de FE permite calcular tensões e deformações mecânicas em diversos tipos de estruturas, utilizando a geometria para segmentar uma estrutura complexa em pequenos elementos. Cada elemento finito possui pontos, ou nós, que conectam os elementos entre si, formando uma malha como ilustrada na Figura 4. O tipo e número de elementos utilizados depende da precisão desejada, pois quanto menor for o tamanho do elemento, mais elementos e nós estarão presentes na malha, tornando a solução mais próxima da solução real, porém mais complexa para os cálculos aumentando o custo computacional. Quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, maior precisão nos resultados da análise (SORIANO, 2009).

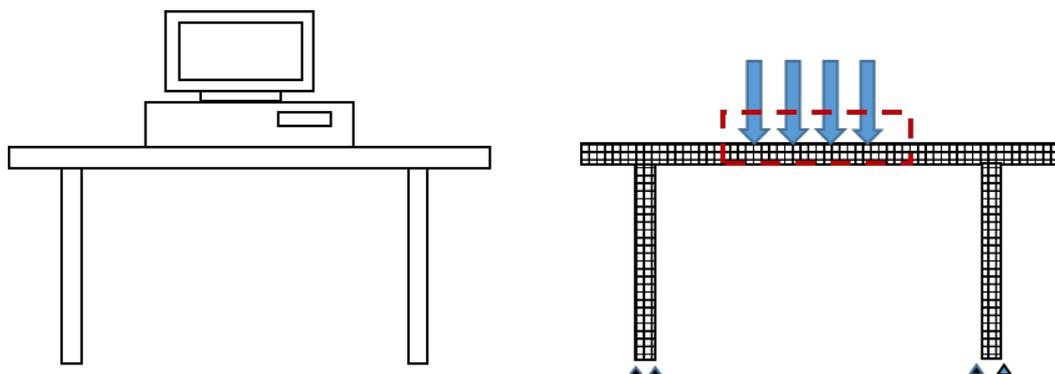
Figura 4 – Nós e elementos presentes em uma malha.



Fonte: Piola *et al.* (2017).

O PZFlex usa análise de elementos finitos para criar um modelo computacional de um objeto para simular sua resposta em condições específicas de carregamento. A modelagem baseada em FE consiste em dividir a realidade física de um objeto em elementos menores e discretos. Por exemplo, para modelar a pressão que um computador exerce sobre uma mesa, a mesa é dividida em elementos menores como uma tabela. Em seguida é calculada como a pressão é distribuída através da tabela. A estrutura geral da mesa é a mesma, ainda que dividida em elementos menores, conforme ilustrada na Figura 5.

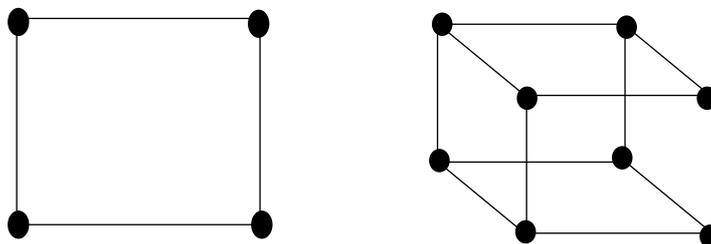
Figura 5 – Estrutura de uma Mesa.



Fonte: Weidlinger Associates (2009).

No PZFlex calcula as tensões e deformações sobre um único elemento. Logo depois, essas tensões e deformações são transferidas proporcionalmente aos elementos circundantes. Para entender como ele faz isso, é necessário considerar a estrutura de um elemento individual. Um elemento consiste em nós individuais conectados entre si; cada elemento tem quatro nós (para modelagem 2D) ou oito nós (para modelagem 3D), como apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Localização de Nós nas Modelagens 2D e 3D.



Fonte: Weidlinger Associates (2009).

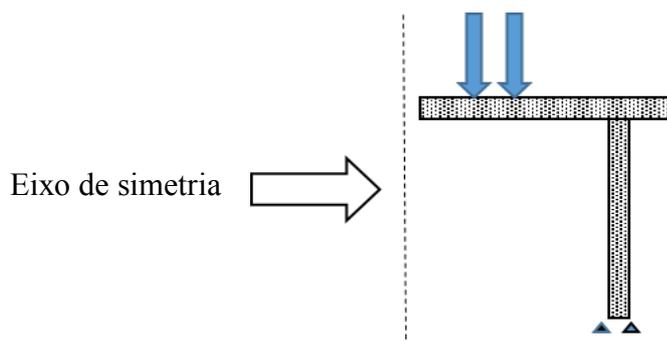
Quando uma carga é aplicada a um nó, o PZFlex calcula primeiro a distribuição dessa carga para os nós circundantes, depois para o próximo conjunto de nós, e assim por diante. No modelo da Figura 5, o computador foi substituído por uma carga de pressão. Embora seja possível modelar todo o computador, fazer isso seria um desperdício de tempo e recursos pois o interesse está apenas no comportamento da mesa. Em vez disso, a carga de pressão colocada é equivalente sobre os elementos da superfície da mesa onde o computador repousa (definido pela linha tracejada vermelha). Isso produz os mesmos resultados que a construção de um modelo de computador, mas em uma fração do tempo.

O objetivo na construção de protótipo é fazer o modelo mais próximo da realidade e tão simples quanto possível. Quanto mais complexo um modelo é, mais tempo leva para ser

executado. Uma maneira de simplificar um modelo é aplicar simetria a ele. Usando o exemplo da mesa, podemos reduzir o modelo como pode ser observado na Figura 7.

Como a carga do computador está no centro da mesa e a tabela é simétrica em relação ao eixo central, podemos aplicar um limite simétrico no meio. Tal limite é chamado de "condição de contorno".

Figura 7 – Modelo de Carga de Pressão.



Fonte: Weidlinger Associates (2009).

PZFlex é baseado nos mesmos princípios que o problema do computador sobre a mesa. Em vez de uma carga estática pode aplicar cargas variáveis, para ver como o objeto reage. O que torna PZFlex diferente, com a possibilidade de incluir as propriedades elétricas de materiais piezelétrico, para modelar o efeito piezelétrico sobre o modelo. Quando um campo elétrico é aplicado através de um material piezelétrico, ele provoca uma deformação no material, e ao contrário, a deformação de um material piezelétrico gera uma carga elétrica proporcional ao grau de deformação.

3.2 ALGORITMO PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS ACOPLADOS

Nesta seção são propostos o desenvolvimento e implementação de uma metodologia para modelagem de sistemas acoplados estrutura/PZT. Os sistemas acoplados modelados e simulados neste trabalho são dois tipos e estrutura sendo plana (placa de alumínio) e cilíndrica (tubo de aço). Os modelos foram implementados via comandos textuais. Os códigos para a simulação dos modelos acoplados e para o cálculo da impedância elétrica dos piezelétricos foram implementados no próprio ambiente do software.

O algoritmo que descreve os procedimentos para modelagem e simulação dos sistemas acoplados é descrito nas seções a seguir:

3.2.1 Dimensões físicas do modelo

O primeiro passo consiste em definir as dimensões físicas que delimitam o modelo, criadas a partir da atribuição de valores conforme as dimensões de cada material. Para realizar atribuição de variáveis é utilizado o comando “*symb*”.

A utilização de variáveis facilita a mudança nos valores das dimensões, se for necessário. É mostrado um exemplo de atribuição das variáveis, para um sistema acoplado placa-de-alumínio/PZT.

```

symb offsetx = 50.e-3           /* distância da borda da placa ao PZT
symb pzt_x = 20.e-3           /* comprimento do PZT
symb pzt_y = 20.e-3           /* largura do PZT
symb pzt_z = 0.267e-3         /* espessura dos PZT
symb placa_x = 423.e-3        /* comprimento da placa
symb placa_y = 40.e-3         /* largura da placa
symb placa_z = 2.e-3          /* espessura da placa

```

3.2.2 Coordenadas cartesianas (sistema X-Y-Z)

Os eixos X, Y e Z correspondem ao sistema cartesiano de coordenadas. Utilizam-se as variáveis x, y, e z para definir a geometria do modelo, especificando as dimensões físicas que determinam os limites ou transições entre os materiais. Geralmente, os modelos têm uma origem, a mesma é identificada utilizando as variáveis *x1*, *y1* e *z1*. Na Figura 8 mostra-se um dos modelos criados.

Figura 8 – Placa Alumínio e PZT.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No entanto, outras variáveis poderão ser criadas para fazer referência a dimensões particulares, ao longo de cada eixo, em relação à origem ou pontos de referência.

São mostrados a seguir trechos de código onde são definidas as coordenadas do modelo, essas coordenadas podem ser criadas de diversas formas em relação ao ponto de

referência escolhido, o ponto de referência é demonstrado pelo indicador amarelo, no canto inferior, Figura 8.

```
symb x1 = 0.0
symb x2 = $x1 + $offsetx
symb x3 = $x2 + $pzt_x
symb x4 = $x3 + $x6 - $offsetx - $pzt_x
symb x5 = $x4 + $pzt_x
symb x6 = $x1 + $placa_x
```

3.2.3 Tamanhos dos elementos nos materiais

Os tamanhos dos elementos são calculados para determinar o nível de precisão dos resultados da simulação e podem ser calculados usando a Equação (10).

$$T_{\text{amanho_do_elemento}} = \frac{\text{velocidade_de_onda}}{(\text{freq_de_interesse}) \times (\text{nro_elem})} \quad (10)$$

A frequência de interesse representa a frequência de operação, que também define o ponto central da faixa de frequências alvo da análise. A velocidade da onda definida no modelo deve corresponder a maior velocidade de propagando em um dos materiais utilizados. Dessa forma a velocidade de onda utilizada nesse exemplo é a da placa de alumínio, que tem a menor velocidade em relação a cerâmica piezométrica de PZT.

Para um modelo de boa precisão, é recomendável que o número de elementos por comprimento de onda seja no mínimo 15 elementos. A seguir, o código necessário para determinar o tamanho do elemento.

```
symb ne = 15 /* Número de elemento >= 15
symb freqint = 150.e3 /* Frequência de interesse
symb wavevel = 3000 /* Velocidade do som alumínio
symb wavelength = $wavevel / $freqint /*Velocidade propagação de onda em relação frequência.
symb elemento = $wavelength / $ne /* Tamanho do elemento
```

3.2.4 Definir distâncias físicas (coordenadas I-J-K)

O próximo passo é determinar quantos nós se encaixam na geometria. Esses nós transferem informação das grandezas físicas calculadas em cada elemento, assim como força/tensão/deslocamento, ao redor do modelo. O PZFlex trabalha com uma estrutura de malha, que são representados através de um número inteiro de nós, sendo necessário determinar o tamanho da malha para cada direção. Para identificar os nós ao longo do eixo x , utiliza-se as variáveis $i1, i2, i3$, etc.; para os nós ao longo do eixo y , utiliza-se as variáveis $j1, j2, j3$, etc., e para os nós ao longo do eixo z utiliza-se as variáveis $z1, z2, z3$, etc. Assim, o tamanho da malha é regulado pelo número de elementos por comprimento de onda.

A seguir, o trecho de código utilizado para definir o malhado no modelo:

```

symb i1 = 1
symb i2 = $i1 + max ( 1 , nint ( ( $x2 - $x1 ) / $elemento ) ) /* limita o nº de elemento
symb i3 = $i2 + max ( 1 , nint ( ( $x3 - $x2 ) / $elemento ) )
symb i4 = $i3 + max ( 1 , nint ( ( $x4 - $x3 ) / $elemento ) )
symb i5 = $i4 + max ( 1 , nint ( ( $x5 - $x4 ) / $elemento ) )
symb i6 = $i5 + max ( 1 , nint ( ( $x6 - $x5 ) / $elemento ) )
symb j1 = 1
symb j2 = $j1 + max ( 1 , nint ( ( $y2 - $y1 ) / $elemento ) )
symb j3 = $j2 + max ( 1 , nint ( ( $y3 - $y2 ) / $elemento ) )
symb j4 = $j3 + max ( 1 , nint ( ( $y4 - $y3 ) / $elemento ) )

symb k1 = 1
symb k2 = $k1 + max ( $min_esp , nint ( ( $z2 - $z1 ) / $elemento ) )
symb k3 = $k2 + 1

```

3.2.5 A geometria do modelo

As coordenadas *I-J-K*, previamente definidas, devem ser associadas às dimensões físicas *X-Y-Z*. O processo para realizar essas associações é implementado no código a seguir:

```

geom
  nchk
    xcrd $x1 $x2 $i1 $i2 /* Dimensões físicas da placa de aluminio (largura)
    xcrd $x2 $x3 $i2 $i3 /* Dimensões físicas do PZT (largura)
    xcrd $x3 $x4 $i3 $i4
    xcrd $x4 $x5 $i4 $i5
    xcrd $x5 $x6 $i5 $i6
    ycrd $y1 $y2 $j1 $j2 /* Dimensões físicas placa de aluminio (comprimento)
    ycrd $y2 $y3 $j2 $j3 /* Dimensões físicas do PZT (comprimento)
    ycrd $y3 $y4 $j3 $j4

    zcrd $z1 $z2 $k1 $k2 /* Dimensões físicas placa de aluminio (espessura)
    zcrd $z3 $z4 $k3 $k4 /* Dimensões física do PZT (espessura)
  end

```

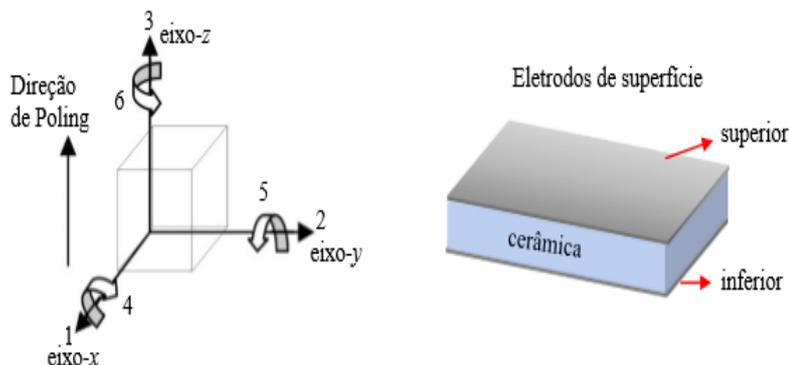
3.2.6 Atribuição de propriedades dos materiais

Todos os parâmetros que correspondem um material isotrópico ou anisotrópico podem ser especificados no mesmo código ou em outro arquivo. Para modelar materiais comuns, tais como aço, gás, água, alumínio, etc., os números de parâmetros necessários a serem declarados são relativamente poucos, porém para modelar as cerâmicas piezelétricas, que são anisotrópicas, tem que se detalhar um número maior de propriedades, por não terem as mesmas propriedades em todos os eixos.

Nos materiais piezelétricos também é importante especificar o eixo de polarização. Assim, por exemplo, na Figura 9 ilustra-se o eixo de polarização (eixo *z*), e os eixos perpendiculares a ele (*x* e *y*). Um material piezelétrico é geralmente, embora não sempre, dotado

de eletrodos ao longo dos planos perpendiculares ao eixo z. As direções 4, 5 e 6 referem-se, respectivamente, a rotações sobre os eixos x , y e z (ou 1, 2 e 3).

Figura 9 – Material Piezelétrico.



Fonte: Weidlinger Associates (2009).

Para incluir o conteúdo do arquivo onde estão definidos os parâmetros dos materiais utilizados no modelo deve ser aplicado o seguinte comando:

```
symb # read material.prjmat
```

Portanto, o passo seguinte é descrever as atribuições dos materiais para cada elemento do modelo, dentro dos contornos limitados pelos nós e utilizando as coordenadas do malhado; criando a placa:

```
regn void
  */Cria estrutura - placa de alumínio
  regn alum $i1 $i6 $j1 $j4 $k1 $k2
  */ Cria cerâmica piezelétrica – PZT1 atuador
  regn pzt5h4e $i2 $i3 $j2 $j3 $k2 $k3
  */ Cria cerâmica piezelétrica – PZT2 sensor
  regn pzt5h4e $i14 $i5 $j2 $j3 $k2 $k3
```

3.2.7 Condições de contorno

Com os materiais criados, as condições de contorno definidas no modelo, devem instruir ao simulador sobre o mecanismo para reagir nas bordas onde o modelo definido termina. As definições mais utilizadas são FREE, ABSR e SYMM. Se o limite é definido como FREE, ele atua como um refletor perfeito. Se o limite é definido como ABSR, a energia incidente neste limite é absorvida. Se o modelo continuar 'infinitamente', então SYMM deve ser usado. SYMM também é útil quando a simetria é usada para criar o modelo completo. Quando a simetria é aplicada aos modelos, o eixo ao qual ele é aplicado precisa ser ajustado nas condições de contorno, o código a seguir mostra as condições de contorno utilizadas.

```

boun
    side xmin free          /* limite de contorno da placa de aluminio
    side xmax free
    side ymin free
    side ymax free
end.

```

3.2.8 Colagem nas juntas entre materiais (PZT/estrutura)

A fim de garantir que o simulador considere na análise a iteração dos fenômenos multifísicos entre os elementos de um material que se encontram em contato com elementos de outro material, todos os elementos da área de contato devem ser especificados. Os códigos criados para colagem do material são definidos através de nós do malhado, é necessário que seja feita a colagem do material piezelétrico na estrutura. Essa parte do código, muitas das vezes é desconsiderada em alguns experimentos de simulação, mas é de extrema importância para obter resultados semelhantes aos testes experimentais. Define-se uma área de colagem para cada recorte de cerâmica de PZT, dessa forma garante o contato somente nas áreas que serão usadas pelas zonas definidas para análise de campo dos materiais piezelétricos.

```

glues
    defn glue1
        master $i2 $i3 $j2 $j3 $k2 $k2      /* área de contacto da placa/PZT-atuador
        slave $i7 $i8 $j5 $j6 $k3 $k3
    defn glue2
        master $i4 $i5 $j2 $j3 $k2 $k2      /* área de contacto da placa/PZT-sensor
        slave $i9 $i10 $j5 $j6 $k3 $k3
end

```

3.2.9 Zonas computacionais

Para definir as zonas computacionais usam-se as coordenadas *I-J-K*, essas computacionais são necessárias para definir os limites de cada material no malhado e também alteram o tempo de execução na simulação. Existem pontos que se destacam quando se cria um código para definir as zonas computacionais:

- Todos os elementos devem ser incluídos em alguma zona;
- Cada zona tem a forma retangular;
- Um elemento pode ser incluído apenas em uma única zona, não deve existir superposição;
- Uma zona não pode cruzar a fronteira de uma partição padrão;
- Como existe uma pequena carga por cada zona, não é recomendável criar um número muito grande de pequenas zonas;

O código para definição das zonas computacionais é apresentado a seguir:

```
zone * $i1 $i6 $j1 $j4 $k1 $k2           /* placa alumínio
zone * $i7 $i8 $j5 $j6 $k3 $k4           /* PZT1 - atuador
zone * $i9 $i10 $j5 $j6 $k3 $k4         /* PZT1* - sensor
```

3.2.10 Função de excitação

Para definir o tipo de função de excitação, diferentes formas de ondas podem ser usadas, tais como: *Balckman*, *Harris*, *Gaussian*, *sine*, *step*, *wavelet*, *time delay*. Porém, para simular os modelos utilizados nesse trabalho, forma utilizados apenas ondas senoidais para excitar as cerâmicas piezelétricas.

Assim, para examinar a resposta do dispositivo sobre uma faixa de frequências, apenas é necessário aplicar um ciclo da onda na frequência de interesse (*freqint*). Porém, o tempo de simulação deve ser maior que a duração de um ciclo da onda, para garantir a existência de energia aplicada na faixa de frequência de interesse.

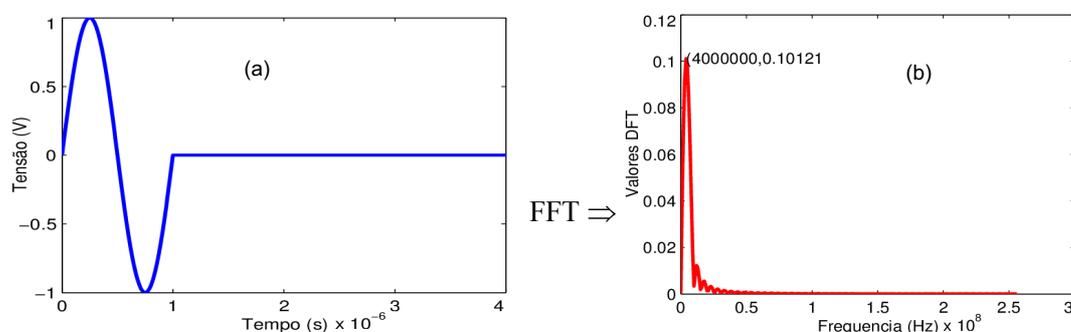
Na Figura 10(a) é mostrada a forma de onda do sinal de excitação aplicada no simulador, que representa apenas um ciclo de uma onda senoidal mais um sinal constante.

Na Figura 10(b) deve-se notar que o espectro de frequência, correspondente ao sinal de excitação, apresenta energia em uma faixa continua de frequências ao redor da frequência de interesse. Por essa razão para gerar resultados entre uma faixa de frequências limitado por uma frequência mínima (0) e uma frequência máxima (300 kHz), a frequência de interesse (*freqint*), deve corresponder à frequência central (150 kHz).

Os códigos a seguir definem a função de excitação e tem o seguinte formato:

```
func sine $freqint amplitude fase n°_ciclos
func sine $freqint 2. 0. 1.
```

Figura 10 – (a) Sinal de excitação e o (b) Espectro de energia.



Fonte: Weidlinger Associates (2009).

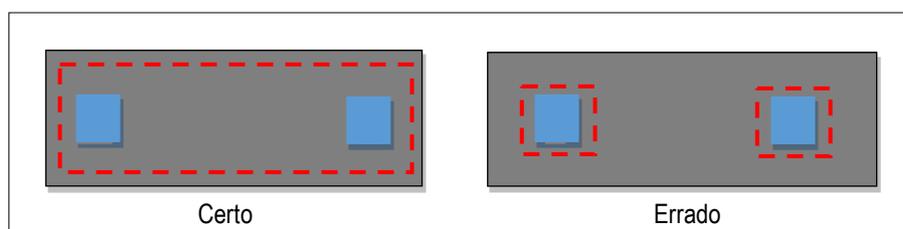
3.2.11 Análise de campo elétrico

Para o PZFlex analisar os deslocamentos produzidos pela aplicação de campos elétricos em materiais piezelétricos devem-se definir janelas de campo elétrico, no entanto esse fato aumenta consideravelmente o tempo computacional do processamento. Portanto, o janelamento deve ser usado apenas no modelo afetada pelo campo elétrico e é possível atribuir mais de uma janela. Na Figura 11 é ilustrada a forma correta de definir as janelas.

Seguem os passos para definir janelas de campo elétrico:

1. Definir a janela elétrica
2. Especificar os eletrodos
3. Especificar as tensões nos eletrodos

Figura 11 – Janela de Campo Elétrico.



Fonte: adaptado Weidlinger Associates (2009).

Para definir as janelas de campo elétrico, o seguinte código foi utilizado:

```
piez
wndo $i2 $i3 $j2 $j3 $k3 $k4 /* Janela de cálculo PZT
defn top /* eletrodo superior
node $i2 $i3 $j2 $j3 $k3 $k3 /* definição nós no PZT atuador
defn bot /* eletrodo inferior
node $i2 $i3 $j2 $j3 $k2 $k2
wndo $i4 $i5 $j2 $j3 $k3 $k4
defn top2
node $i4 $i5 $j2 $j3 $k3 $k3
defn bot2
node $i4 $i5 $j2 $j3 $k2 $k2
bc top volt func /* aplica tensão no eletrodo top
bc bot grnd /* terra
bc bot2 grnd
end
```

Nesse exemplo foi aplicado o campo elétrico sobre os eletrodos superior e inferior. Foi definida uma janela para cada elemento piezelétrico, em seguida, são atribuídas às condições de contorno ("bc"). Nesse caso, aplica-se a tensão elétrica de onda senoidal para o eletrodo superior e conecta-se o outro eletrodo na inferior da placa.

3.2.12 Registro de dados

Para calcular e armazenar um registro de dados de algumas grandezas físicas, obtidos no domínio do tempo, é necessário especificar cada uma delas utilizando o comando “*calc*” e/ou comando “*pout*”. No exemplo a seguir, é apresentada a sintaxe para solicitar o cálculo de pressão, deslocamento, deformação e tensão mecânica, respectivamente:

```
calc
pres    /* para cálculo da pressão
disp    /* para cálculo deslocamento
strn    /* para cálculo deformação
strs    /* para cálculo tensão mecânica
end
```

No exemplo a seguir, o trecho do código ilustra a forma de especificar algumas grandezas que devem ser calculadas e armazenadas em arquivos.

No entanto, para calcular a impedância elétrica nos materiais piezelétricos, isto é, na fase de pós-processamento, é necessário ter um registro de dados da tensão e carga elétrica nos eletrodos do material. No código apresentado a seguir são mostrados exemplos para especificar que a tensão e a carga elétrica devem ser registradas e armazenadas em um histórico de dados.

```
pout
  histname electrode.vq top    /* tensão, carga, desde eletrodo top
  histname electrode vq all    /* tensão, carga, para todos os eletrodos
```

3.2.13 Simulação do Modelo

No modelo deve-se executar o comando “*prcs*” (*process*), uma preparação para processar as informações, o PZFlex precisa calcular o passo de tempo (*time-step*) do modelo para garantir a estabilidade e prepara as matrizes necessárias para armazenamento de dados. A partir desse ponto, não se pode alterar a geometria as propriedades dos materiais. Seguem os comandos utilizados nessa fase:

```
PrCs                                     /* calcula o time-step do modelo
symb #get {steps} timestep              /* recupera na variável steps do modelo
symb simtime = 1.e-3                    /* tempo de execução do modelo (1ms).
symb nruns = nint ( $simtime / $steps)   /* o número de vezes o time-step,
exec $nruns                              /* executa o modelo nruns vezes
```

Quando o modelo está pronto para ser executado, o próximo passo é selecionar o tempo de execução da simulação. Ao se definir um longo tempo de simulação é possível que se desperdice um grande tempo computacional simulando aspectos desnecessários do modelo.

Um das formas de otimizar o tempo de simulação é executar uma versão simplificada do modelo, monitorando os resultados e dessa forma determinar o tempo de simulação adequado.

Para fazer isso, a malha do modelo é reduzida para acelerar os cálculos (o que, naturalmente, reduz a precisão), e um loop é inserido no arquivo de entrada do modelo para traçar os resultados à medida que são calculados. Isso mostra como o modelo está reagindo, permitindo que o tempo de execução seja otimizado. Depois de determinar o tempo de execução ideal, retorna-se a malha ao tamanho modelado que foi utilizado inicialmente, para obter resultados adequados.

3.2.14 Algoritmo para cálculos da impedância elétrica do transdutor PZT

Após a execução da simulação do modelo, é necessário implementar procedimentos de pós processamento a fim de calcular outras grandezas como a impedância elétrica, portanto a seguir descreve-se o procedimento para calcular a impedância elétrica dos transdutores de PZT, ler os dados de tensão e carga, criado na execução modelo.

A leitura dos dados é feita desde um arquivo (*flxht*) que contém históricos do tempo de tensão e carga nos eletrodos no transdutor PZT, criados durante a execução do modelo. Para fazer a leitura desse arquivo usa-se código a seguir:

```
symb #get { labl } jobname
symb #read $labl.symb          /* Símbolos e parâmetros do modelo
read f1 '$labl.flxhst'        /* Le arquivo de histórico
symb #msg 1
```

Dessa forma, o arquivo local possui 3 entradas, todo referente ao tempo, onde são salvos na mesma ordem:

1. Função de excitação aplicada ao atuador de PZT
2. Tensão no eletrodo do PZT
3. Carga no eletrodo do PZT

3.2.15 Aplicação de filtro digital

A fim de melhorar as características espectrais das medições de impedância elétrica é aplicado um janelamento e um filtro digital passa baixa. Após aplicar filtro são especificados os parâmetros usados para representar a impedância elétrica: magnitude e fase ou parte imaginária. Para finaliza, são definidas as faixas de frequências e salvo o arquivo da impedância elétrica em arquivos (.dat), conforme código s seguir:

```
file f2                      /* f2: novo arquivo para armazenar resultados
wndo hann righ 0.9          /* filtro
type amp                     /* Magnitude/fase
```

Com o algoritmo desenvolvido podemos modelar diversas estruturas e materiais piezelétricos, e utilizar desses modelos para caracterizar danos em diversos tamanho, tipos e modelos diferentes, analisando o comportamento da estrutura e as respostas da cerâmica piezelétrica acoplada a essas estruturas.

A criação de um algoritmo para uma modelo simulado não garante um bom resultado no experimento, o êxito de uma boa simulação está na forma precisa de criar esse algoritmo com máximo de detalhe possível de um sistema real. Dessa forma teremos resultados muito semelhantes com experimentos reais. Muitas das vezes para validar o modelo simulado faz-se necessário comparar com o sistema real.

No próximo capítulo serão apresentados alguns modelos criados no simulador utilizando elementos finitos. Os resultados da simulação serão comparados com os experimentos reais em dois tipos de estruturas plana e cilíndrica.

4 MODELOS DESENVOLVIDOS USANDO O SIMULADOR

Nesse Capítulo são apresentados os modelos usando algoritmo proposto na seção anterior, esses modelos simulados serão comparados com experimentos reais através das assinaturas da impedância elétrica utilizando os índices RMSD e CCDM, e o coeficiente de correlação de *Spearman* avaliando o grau de correlação. Em seguida será apresentada a detecção de danos destrutivos e não destrutivos para dois tipos de estrutura é analisado o comportamento dos índices RMSD e CCDM.

4.1 SETUP MODELOS

Aplicando os procedimentos descritos no Capítulo 3, foram implementados alguns modelos de sistema acoplados de diferentes geometrias. Foram modelados e simulados, duas placas de alumínio e três tubos de aço de tamanhos diferentes, com dano destrutivo e não destrutivo.

As dimensões e características dos materiais empregados, nas simulações, estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Configuração dos Modelos Estrutura/PZT Simulado.

Material	Nome	Dimensões
Placa Alumínio	Placa-1	Comprimento: 423 mm; largura: 40 mm; Espessuras: 2 mm
Placa Alumínio	Placa-2	Comprimento: 423 mm; largura: 40 mm; Espessuras : 2 mm
Tubo de aço	Tubo-1	Comprimento: 400 mm; diâmetro externo: 4,7 cm; Espessuras : 1 mm
Tubo de aço	Tubo-2	Comprimento: 300 mm; diâmetro externo: 4,7 cm; Espessuras : 1 mm
Tubo de aço	Tubo-3	Comprimento: 150 mm; diâmetro externo: 12 cm; Espessuras : 2 mm
PZT	PZT-1	Modelo Piezo Systems PSI-5A4E , de 30 mm × 5 mm × 0,508 mm
PZT	PZT-2	Modelo Piezo Systems PSI-5A4E , de 30 mm × 7 mm × 0,508 mm
PZT	PZT-3	Modelo Piezo Systems PSI-5H4E, de 30 mm × 5 mm × 0,267 mm.
Buraco	Dano-1	Dano destrutivo: buraco na parede do tubo-3, de 8 mm × 10 mm
Massa	Dano-2	Dano não destrutivo: massa de aço na placa de alum., de 5 mm × 5 mm × 3 mm
Faixa frequência		Simulado: 0 – 125 kHz

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Uma simulação com materiais piezelétricos de PZT requer 13 parâmetros independentes, para que essa seja considerada uma modelagem apropriada (WEIDLINGER ASSOCIATES, 2009).

Dessa forma, foram caracterizados os parâmetros piezelétricos utilizando os valores dos coeficientes do material piezelétrico de PZT modelo EC-65 (equivalente ao PZT 5A) em função da temperatura, para a faixa de temperaturas de -165°C a 195°C, foram obtidos de Sabat *et al.* (2007).

Portanto, com base nesse resultado foi possível equacionar os parâmetros: coeficientes de deformação piezelétrica (d_{15} , d_{31} e d_{33}), coeficientes de deformação elástica (S_{11}^E , S_{12}^E , S_{33}^E e S_{44}^E) e constantes dielétricas (ϵ_{11}^T e ϵ_{33}^T).

No entanto, a densidade e o fator Q mecânico foram considerados os mesmos valores fornecidos pelo fabricante e na temperatura ambiente.

Já o coeficiente S_{66}^E foi calculado utilizando a Equação (11) (BUTLER; SHERMAN, 2016).

$$S_{66}^E = 2(S_{11} - S_{12}) \quad (11)$$

Além dos coeficientes dos transdutores de PZT, a densidade do alumínio e do aço em função da temperatura, e expressa pela Equação 12, foi incluída na simulação para melhorar a precisão do modelo, de acordo com Sepehry, Shamshirsaz e Abdollahi (2011),

$$\rho = -0.1844T + \text{DensidadeMaterial} \quad (12)$$

Para simular os modelos e calcular as assinaturas de impedância elétrica dos PZT's colados aos tubos e placas, foram caracterizados os principais parâmetros da cerâmica piezolétrica, para temperatura a 20°C, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros PZT/Densidade das estruturas – Temperatura Ambiente

Temperatura 25° C			
et11/e0	2104,9	s13 [m²/N] adap.	-9,022E-12
et33/e0	1184,7	s66 [m²/N]	4,09618E-11
s11 [m²/N]	1,54832E-11	d15 [C/N]	5,97991E-10
s33 [m²/N]	1,80081E-11	d31 [C/N]	-1,51828E-10
s44 [m²/N]	4,48499E-11	d33 [C/N]	2,82034E-10
s12 [m²/N]	-4,9977E-12	ρ alumínio	2709,21
s13 [m²/N]	-5,372E-12	ρ aço	7812,89

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os primeiros modelos criados no simulador foram as estruturas planas, conforme Figura 12(a) uma de placa de alumínio considerada íntegra (*baseline*, sem dano) com dois piezolétricos de PZT, a mesma que representa uma estrutura simples, mas bastante utilizada por alguns pesquisadores para estudar a detecção de danos baseado na técnica da EMI.

Na Figura 12(b) uma carga posicionada a 5 cm do PZT atuador (PZT-1) simulando um dano não destrutivo foi simulada.

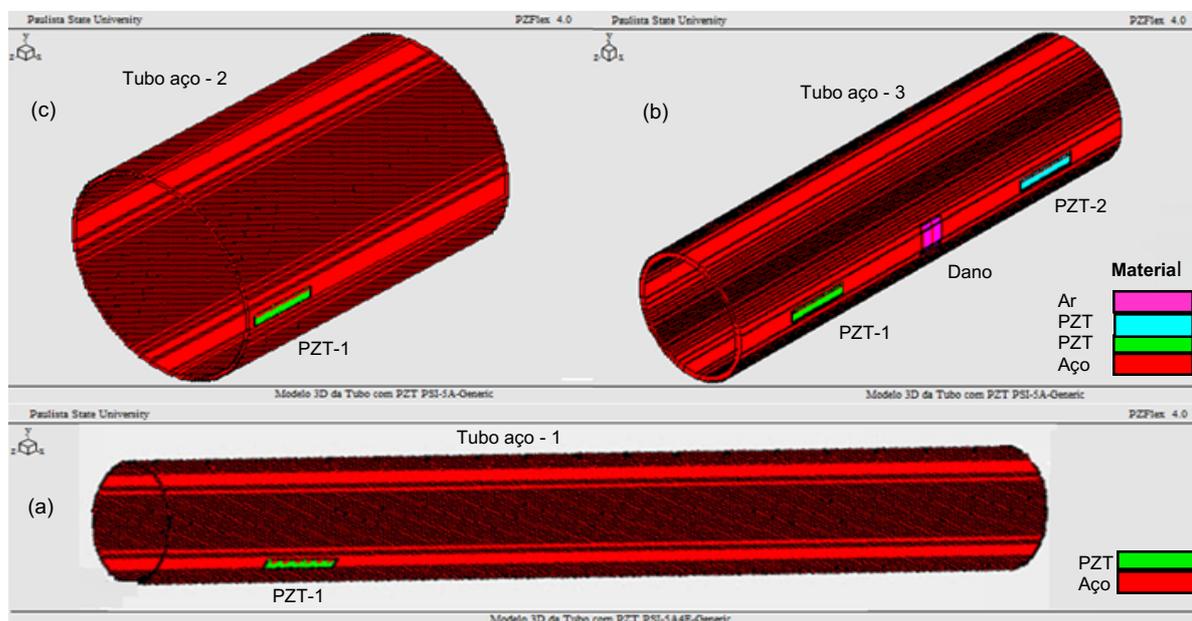
Figura 12 – Modelos de placas de alumínio – (a) Placa 1 (b) Placa 2.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na sequência foram criadas as estruturas cilíndricas de tubos de aço já definidas da Tabela 2 com diferentes tipos de danos, destrutivo e não destrutivos, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Modelos de Tubo de aço – (a) Tubo 1 (b) Tubo 2 (c) Tubo 3.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com esses modelos criados no simulador pode-se dizer que é possível modelar uma variedade de estruturas e cerâmicas piezelétricas, com diferentes tamanhos e formas, além de produzir danos destrutivos sem desperdício de material. Desta forma para validar os resultados dos modelos simulados serão analisadas e comparadas as assinaturas de impedância elétrica com os correspondentes resultados obtidos experimentalmente.

4.2 ASSINATURAS DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

As assinaturas da impedância elétrica, de transdutores de PZT, obtidas por meio de simulações e comparadas com os resultados experimentais dos modelos vistos anteriormente. As assinaturas de impedância elétrica calculadas com resultados do simulador foram obtidas usando o algoritmo da Seção 3.2. Já as medições experimentais de impedância elétrica foram realizadas utilizando o analisador de impedância desenvolvido por Baptista e Vieira Filho (2009), combinado com um sistema de aquisição de dados, modelo USB-6259, da *National Instruments*, que tem precisão de tanto, velocidade de resposta e destaca pela sua eficiência, precisão, velocidade e versatilidade. O analisador de impedância foi cedido pelo laboratório de Processamento de Sinais e Instrumentação do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP.

Por meio do analisador, a cerâmica piezelétrica de PZT é excitada utilizando um sinal chip com amplitude de 2 V na faixa de frequências de 0-125 kHz.

Os resultados colhidos pelo analisador, para cada medição de impedância elétrica, são o módulo, a parte real, a parte imaginária e a frequência. Dessa forma, a fase da impedância deve ser calculada via software.

As características das estruturas e materiais piezelétricos utilizados nos testes experimentais são descritas na Tabela 4.

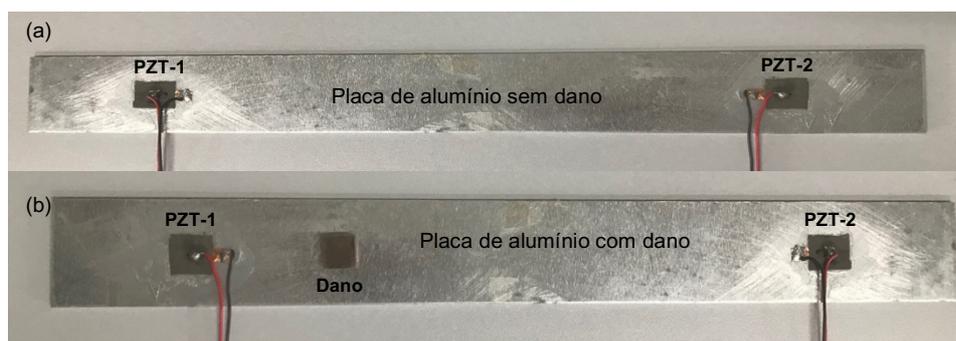
Tabela 4- Configuração dos Modelos Estrutura/PZT Experimental.

Material	Nome	Dimensões
Placa Alumínio	Placa-1	Comprimento: 42,3 cm; largura: 4 cm; Espessuras : 2 mm
Placa Alumínio	Placa-2	Comprimento: 42,3 cm; largura: 4 cm; Espessuras : 2 mm
Tubo de aço	Tubo-1	Comprimento: 40 cm; diâmetro externo: 4,7 cm; Espessuras : 1 mm
Tubo de aço	Tubo-2	Comprimento: 30 cm; diâmetro externo: 4,7 cm; Espessuras : 1 mm
Tubo de aço	Tubo-3	Comprimento: 15 cm; diâmetro externo: 12 cm; Espessuras : 2 mm
PZT	PZT-1	Modelo Piezo Systems PSI-5A4E , de 3,0 cm × 5 mm × 0,508 mm
Massa	Dano-2	Dano não destrutivo: massa de aço, de 5 mm × 5 mm × 10 mm
Faixa	Faixa	Experimental: 0 – 300 kHz
Frequência		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

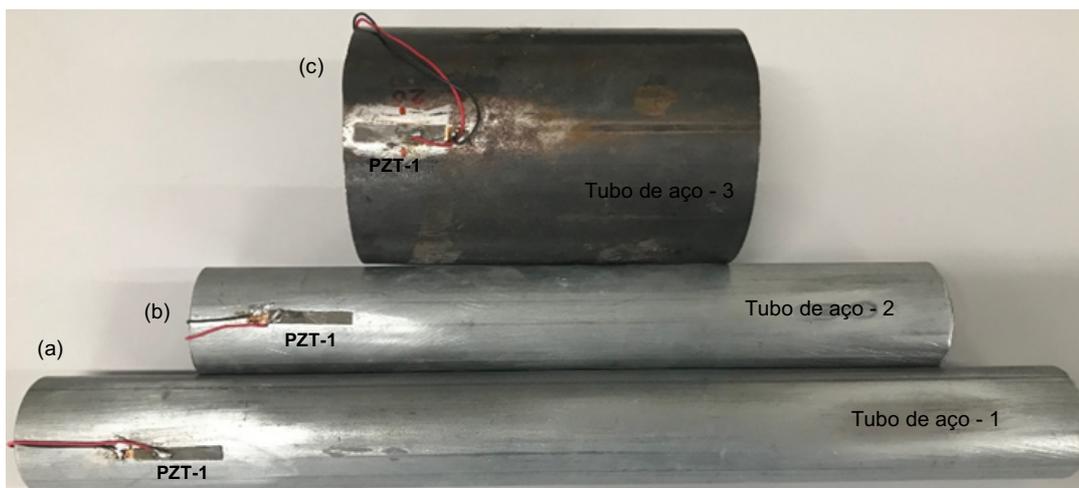
A placa de alumínio e o tubo de aço são adotados como uma estrutura hospedeira, e um transdutor PZT PSI-5A4E é colado nessa estrutura com uma fina camada de cola a base de cianoacrilato. Nas Figuras 14 e 15 são mostrados os sistemas experimentais (sistemas reais).

Figura 14 – Sistema Real: (a) Placa de alumínio sem dano; (b) Placa de alumínio dano não destrutivo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 15 – Sistema Real: (a) Tubo de aço - 1; (b) Tubo de aço - 2; (b) Tubo de aço – 3.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

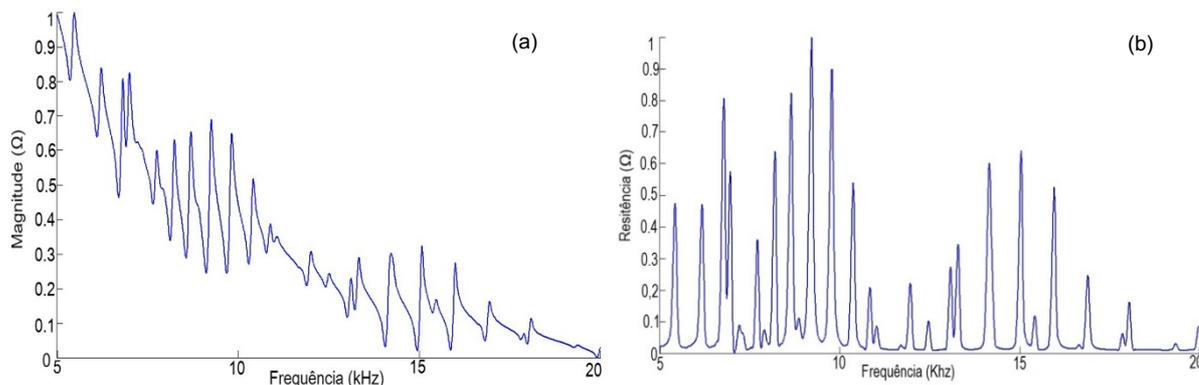
Esses sistemas experimentais foram usados como referências para criação dos modelos simulados no PZFlex. Foram adotados os mesmos tipos de materiais, com as mesmas características e dimensões reais nos modelos criados no simulador, de forma mais precisa possível, para obter o melhor índice de correlação dos resultados quando comparados aos modelos simulados com experimentos reais.

4.2.1 Resultados da simulação

No simulador foram obtidas as assinaturas da impedância elétrica na faixa de 0 até 125 kHz, porém em alguns casos são apresentados apenas resultados em faixas estreitas, considerando as melhores variações nos picos de ressonância e faixa de frequências mais sensível. Para a placa de alumínio (Placa-1) foi utilizada a faixa de 5-20 kHz e no tubo de aço (Tubo-1) de 10-25 kHz.

Na Figura 16 é apresentada a magnitude e a parte real da impedância elétrica com a estrutura em estado íntegro da placa de alumínio (Placa-1).

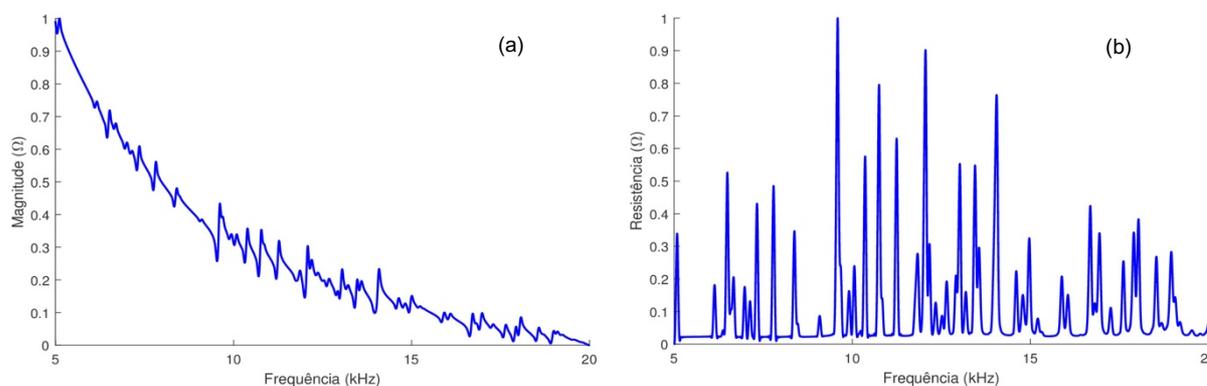
Figura 16 – Simulação: Placa (a) Magnitude da Impedância do PZT-1 (b) Parte Real da Impedância do PZT-1



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 17 é apresentada a magnitude e a parte real da impedância elétrica com a estrutura em estado íntegro do tubo de aço (Tubo-1).

Figura 17 – Simulação Tubo (a) Magnitude da Impedância do PZT-1 (b) Parte Real da Impedância do PZT-1



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2.2 Resultados no sistema real (experimental)

Inicialmente é apresentado um breve *setup* experimental do analisador de impedância utilizado como referência, em seguida são exibidos os resultados experimentais obtidos através desse analisador.

O analisador é composto de um dispositivo DAQ (*Data Acquisition*) e uma interface gráfica baseada na plataforma *LabVIEW*, desenvolvido por Baptista e Vieira Filho (2009).

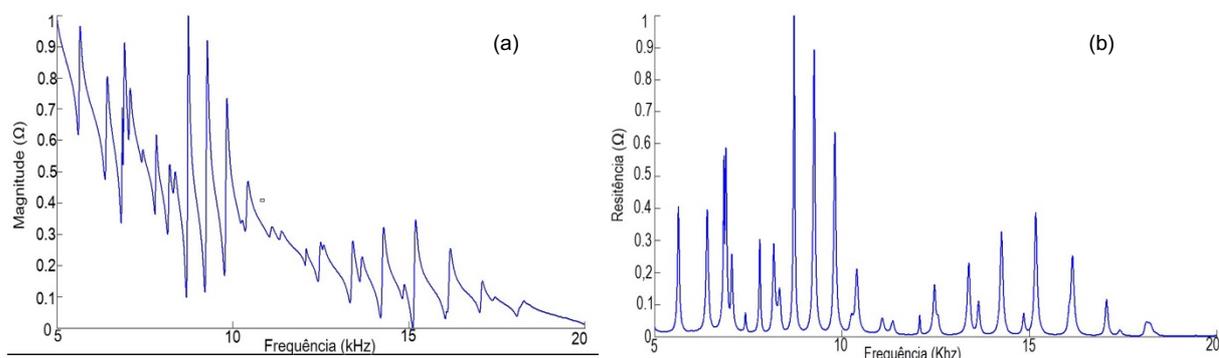
Para coletar os dados da impedância elétrica, os seguintes parâmetros foram definidos na interface gráfica:

- Resistor externo: $1\text{k}\Omega$;
- Frequência inicial: 1 kHz;
- Frequência final: 125 kHz;
- Amplitude: 2 V;
- Taxa de amostragem: 1 M Sample/s;
- Número de amostras: 250 000;
- Resolução de frequência: 3,84 Hz.

Foram obtidas as assinaturas da impedância elétrica na faixa de 0 até 125 kHz; são apresentados apenas resultados em faixas de frequência estreitas, onde identifica-se as melhores variações nos picos de ressonância, dessa forma, na placa de alumínio (Placa-1) foi utilizada a faixa de 5-20 kHz e no tubo de aço (Tubo-1) de 10-25 kHz.

Na Figura 18 são mostradas a magnitude e a parte real da impedância elétrica da Placa-1 com a estrutura em estado íntegro (*baseline*).

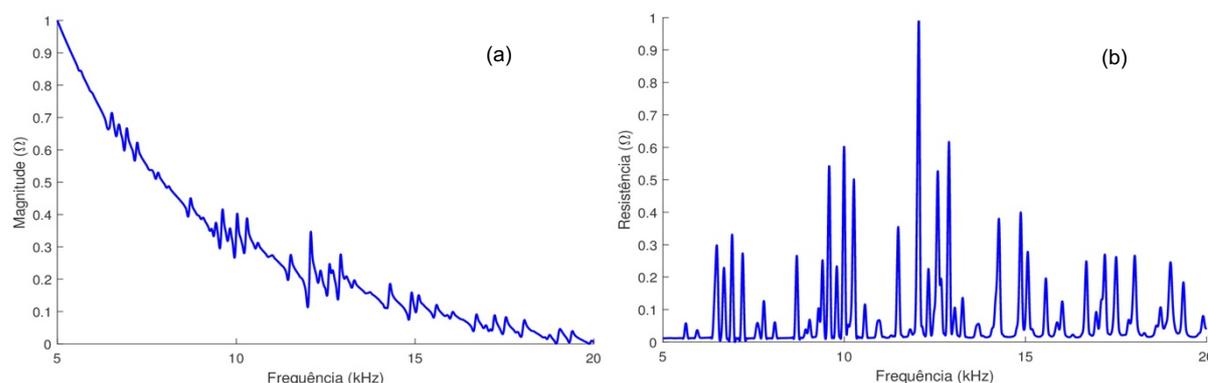
Figura 18 – Experimental Placa (a) Magnitude da Impedância do PZT-1 (b) Parte Real da Impedância do PZT-1.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 19 são apresentadas a magnitude e a parte real da impedância elétrica com a estrutura em estado íntegro do tubo de aço (Tubo -1).

Figura 19 – Experimental: Tubo (a) Magnitude da Impedância do PZT-1 (b) Parte Real da Impedância do PZT-1.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

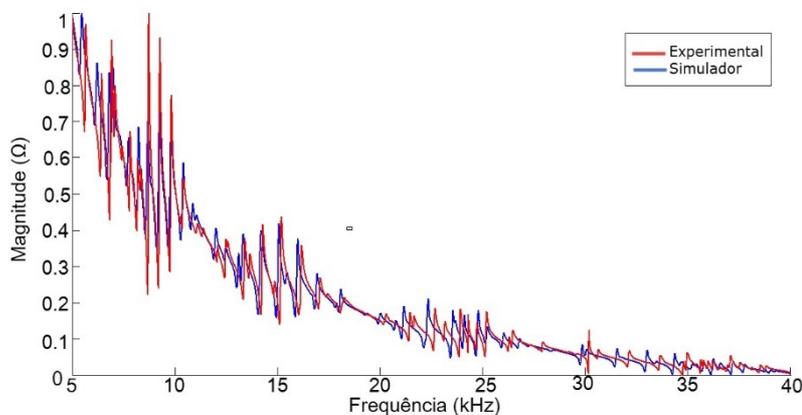
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA – EXPERIMENTAL x SIMULAÇÃO

Com a proposta de desenvolver técnicas que contribuem na área de detecção de falhas em estruturas, neste trabalho são utilizadas as assinaturas da magnitude e parte real da impedância elétrica para analisar as mudanças na resposta dinâmica de uma estrutura. Assim, é notório que em aplicações reais, os sistemas de SHM são dependentes da variação da temperatura, por esse motivo alguns pesquisadores recomendam analisar as assinaturas da parte real da impedância, por ser menos susceptível a variações de temperatura (BHALLA; NAIDU; SOH, 2003).

Nas Figuras 20 e 21 são identificadas as assinaturas da magnitude e a parte real da impedância elétrica, para o sistema placa-de-alumínio/PZT (Placa-1) respectivamente, para a estrutura em estado íntegro. Os resultados experimentais e simulados são comparados apenas

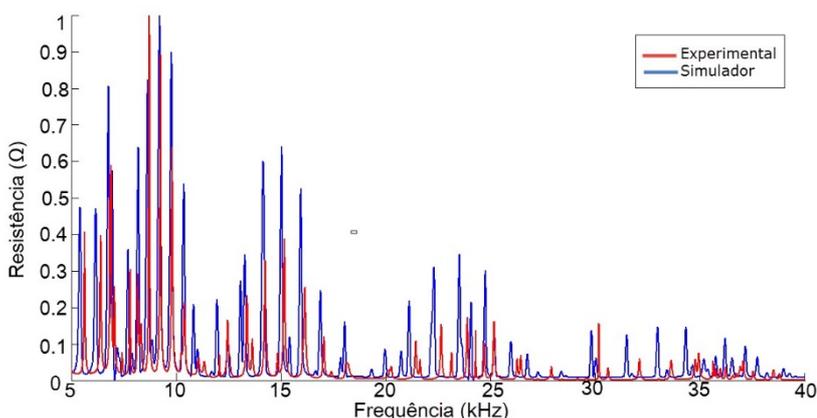
para a faixa de frequências de 5–40 kHz, faixa onde as variações dos picos de ressonância são mais significativas.

Figura 20 – Magnitude da Impedância elétrica do PZT-1 (Placa -1 Experimental vs Simulação).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

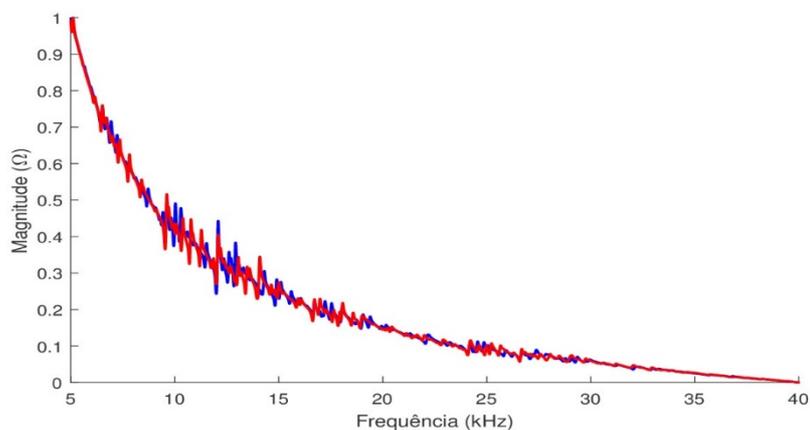
Figura 21 – Parte Real da Impedância elétrica do PZT1 (Placa -1 Experimental vs Simulação).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

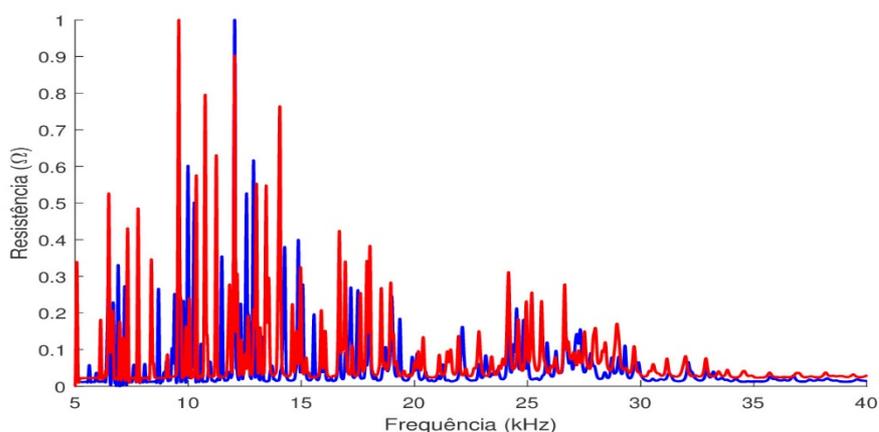
Nas Figuras 22 e 23 são apresentadas as assinaturas da magnitude e a parte real da impedância elétrica, para o sistema tubo-de-aço/PZT, estrutura em estado íntegro. Os resultados experimentais e simulados são comparados apenas para a faixa de frequências de 10-25 kHz.

Figura 22 – Magnitude da Impedância elétrica do PZT-1 (Tubo -1 Experimental vs Simulação).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 23 – Parte Real da Impedância elétrica do PZT1 (Tubo -1 Experimental vs Simulação).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.3.1 Análise qualitativa

Analisando as assinaturas ilustradas nas Figuras 20, 21, 22 e 23 pode ser observado que os resultados obtidos através do simulador apresentam uma elevada similaridade, quando comparados com os resultados experimentais, porém existem alguns fatores que podem ajudar a justificar as pequenas diferenças observadas, tais como, a temperatura na qual foram obtidos os resultados experimentais é diferente da temperatura ambiente considerada pelo simulador. Outro fator importante é a colagem, que no sistema real os transdutores de PZT são colados à estrutura utilizando cola instantânea a base de Cianocrilato ou uma resina de epóxi. Entre outros motivos podem ser citados também as imperfeições dos materiais utilizados no experimento real e o grau de aproximação dos métodos de elementos finitos.

4.3.2 Análise quantitativa

Para avaliar e quantificar o grau de correlação entre os resultados obtidos experimentalmente e através de simulações, foram calculados os coeficientes de correlação de *Pearson* e de *Spearman* aplicando as Equações (8) e (9), respectivamente. Na Tabela 5, apresentam-se os índices de correlação calculados e suas respectivas interpretações.

Tabela 5 - Grau de correlação entre resultados experimentais e simulados.

Estrutura	Coefficiente de correlação	Grau de correlação	Interpretação
Placa de alumínio	<i>Pearson</i>	0,9746	Correlação muito forte
	<i>Spearman</i>	0,978	Correlação muito forte
Tubo de aço	<i>Pearson</i>	0,9702	Correlação muito forte
	<i>Spearman</i>	0,962	Correlação muito forte

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Considerando as tendências similares das assinaturas de impedância elétrica e os valores dos coeficientes de *Pearson* e *Spearman*, que indicam uma correlação muito forte, pode-se concluir que através dos modelos criados no simulador é possível gerar resultados similares aos experimentais.

Para desenvolver e implementar um modelo apropriado que permita gerar resultados satisfatórios, técnicas e procedimentos foram adquiridos estudando a literatura sobre o software PZFlex, além de tentar diferentes configurações e abordagens, ao criar códigos no software.

Com a finalidade de estudar e analisar novas abordagens ou desenvolver novas técnicas aplicadas a sistemas de SHM baseadas na técnica da EMI, podem ser utilizados apenas os resultados de simulações com a certeza que as conclusões serão confiáveis.

Deste modo, depois de obter um modelo apropriado, é possível estudar outros fenômenos ou comportamentos, que não são triviais para implementar ou estudar em sistemas reais, tanto em avaliações danos, como efeito da temperatura. Em um modelo simulado, por exemplo, podem ser utilizados diferentes tipos de danos, mesmo que sejam destrutivos, onde esses danos destrutivos, se implementados em sistemas reais, implicariam em alto custo e desperdício e perda de material.

Portanto, os resultados obtidos através da simulação de modelos desenvolvidos podem ser usados nos estudos sobre o monitoramento de SHM, bem como para analisar a detecção de danos estruturais e o efeito da temperatura com um grau de precisão satisfatório. A seguir apresentam-se as simulações para duas estruturas com danos destrutivos e não destrutivos e também o efeito da temperatura.

4.4 DETECÇÃO DE DANOS USANDO SIMULADOR

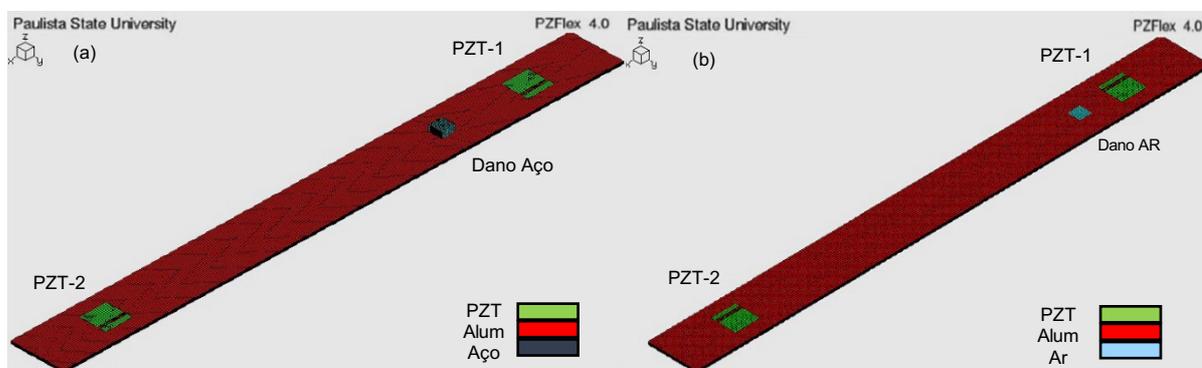
Nessa seção são simuladas e analisadas as mudanças nas assinaturas de impedância elétrica de transdutores de PZT, devidas a alterações provocadas nas estruturas. Essas alterações nas estruturas são feitas colando uma massa adicional (para simular dano não destrutivo) ou fazendo um buraco (para simular dano destrutivo) para duas estruturas: plana (placa de alumínio) e cilíndrica (tubo de aço).

4.4.1 Detecção de dano nas estruturas planas

Dessa forma, a primeira simulação incluiu um aumento de massa na placa de alumínio, como mostrado na Figura 24(a). Em outra simulação é realizada uma diminuição de massa na placa de alumínio, criando um buraco; como pode ser observado na Figura 24(b).

Os procedimentos para análise e detecção de danos baseados na técnica da EMI, amplamente utilizados na literatura, são os mesmos usados neste trabalho, portanto serão usados os índices de falhas métricas RMSD e CCDM.

Figura 24 – Placa de alumínio: (a) Dano não destrutivo (b) Dano destrutivo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

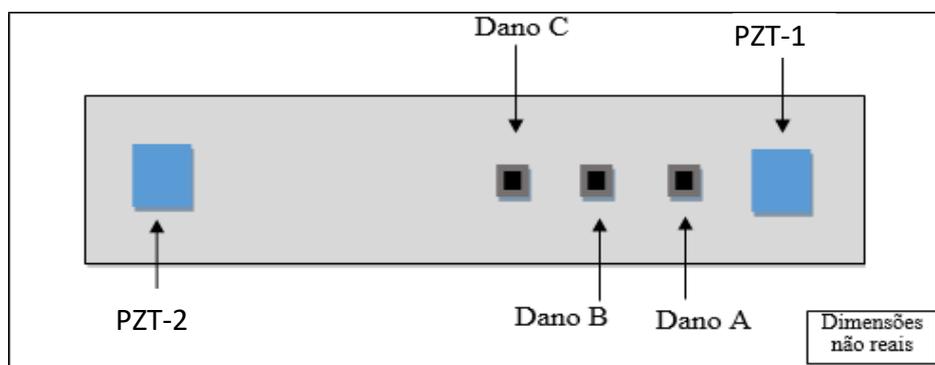
O software MATLAB foi utilizado para elaborar os gráficos das figuras e para calcular os índices de falha métrica RMSD e CCDM.

Foram simulados três danos em localizações diferentes, porém um dano de cada vez: dano A (massa de 2x2 mm colada a 50 mm), dano B (massa colada a 100 mm) e dano C (massa colada a 150 mm) conforme ilustrado na Figura 25.

Considerando que as maiores variações, nos picos de ressonância, apresentam-se em faixas estreitas, apenas as faixas de frequências de 5-20 kHz e 60-100 kHz foram selecionadas para análise, visando obter uma maior sensibilidade na detecção do dano.

Serão apresentadas as assinaturas da parte real da impedância comparando os danos causados na placa de alumínio através das assinaturas, na próxima seção são analisados de forma quantitativa e qualitativa.

Figura 25 – Níveis de danos simulados em placa de alumínio.

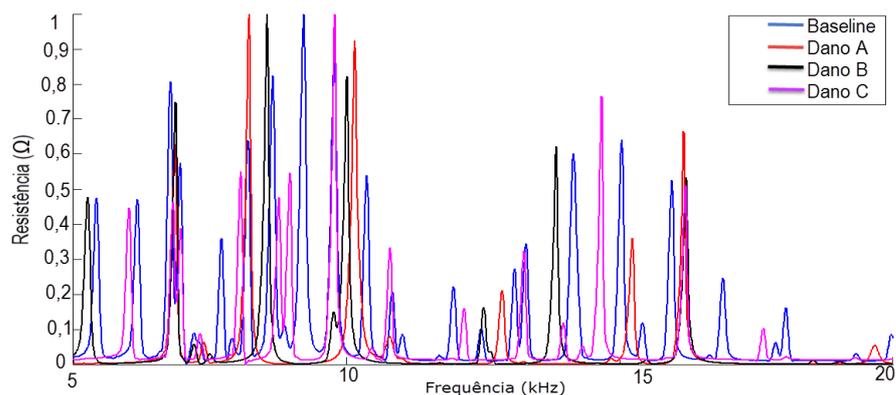


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4.2 Estrutura com dano não destrutivo (aumento de massa)

Na Figura 26 são apresentadas as assinaturas da parte real da impedância elétrica, obtidas no simulador, incluindo o dano A, dano B ou dano C. Porém, neste caso para a faixa de frequência de 5-20 kHz.

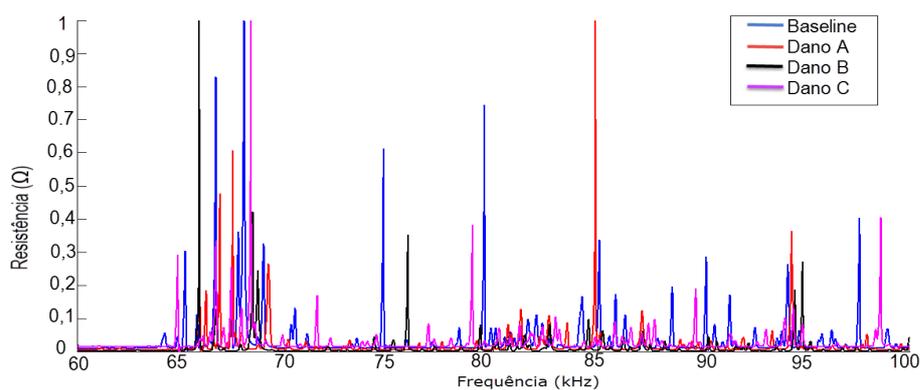
Figura 26 – Parte real da impedância faixa de frequências de 5-20 kHz.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 27 é mostrada as assinaturas da parte real da impedância para a faixa de frequências de 60-100 kHz.

Figura 27 – Parte real da impedância faixa de frequências de 60-100 kHz.

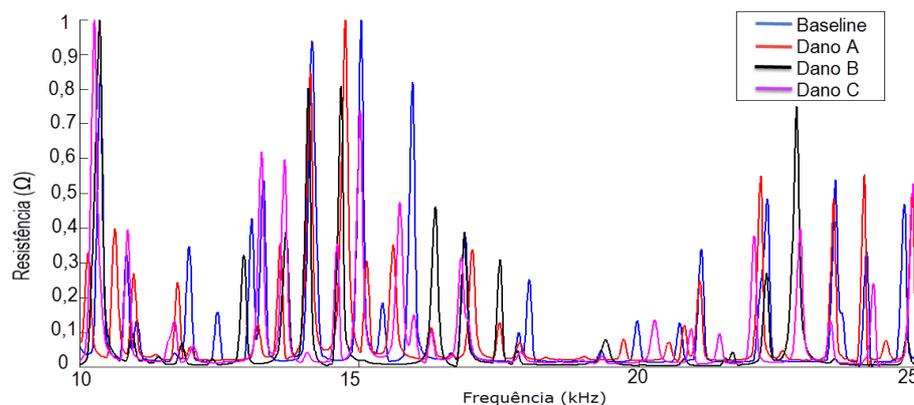


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4.3 Dano destrutivo (buraco)

Para a mesma estrutura, na Figura 28 são apresentadas as assinaturas da parte real da impedância elétrica, obtidas no simulador, incluindo o dano A, dano B e dano C, em forma de buraco. Nesse caso serão mostradas para a faixa de frequência de 10-25 kHz.

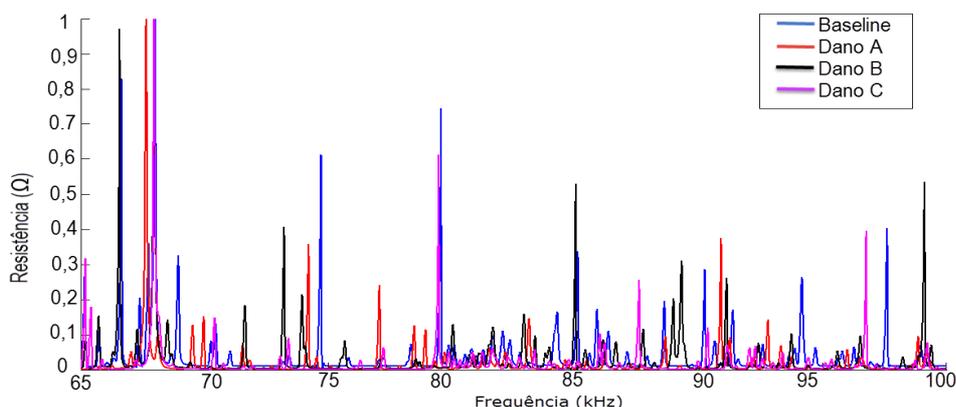
Figura 28 – Parte real da impedância faixa de frequências de 10-25 kHz.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 29 observa-se a medida da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 65-100 kHz.

Figura 29 – Parte real da impedância faixa de frequências de 65-100 kHz.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4.4 Análise qualitativa

Pode se observar nas Figuras 26, 27, 28 e 29 que as assinaturas obtidas com danos simulados apresentam diferenças significativas, no deslocamento de frequência e amplitude do sinal, em relação às assinaturas obtidas com a estrutura em estado íntegro (*baseline*). Portanto, é possível concluir que os resultados obtidos pelo simulador permitem analisar e avaliar as mudanças estruturais aplicando a técnica da EMI. Dessa forma, o modelo proposto usando o simulador de fato é útil para o desenvolvimento de sistemas de SHM no estágio de detecção de falhas.

4.4.5 Análise quantitativa

Para uma avaliação quantitativa foram utilizados os índices de falha métrica RMSD e CCDM conforme as Equações (4) e (5). Os valores obtidos são apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9. Os índices RMSD e CCDM das Tabelas 6 e 7 e a Figura 30 correspondem aos resultados para

danos não destrutivos e os índices das Tabelas 7 e 8 e a Figura 31 são os resultados para danos destrutivos.

Tabela 6 - Índices RMSD e CCMD Dano NDE na faixa de frequência de 5-20 kHz.

Distância do Dano				
L (cm)	RMSD simples	RMSD normalizado	CCMD simples	CCMD normalizado
Baseline*	1741.13	1	0.000523	1
5	28487.02	16.36	0.1194	244.11
10	19962.30	11.47	0.1277	228.24
15	15524.21	8.92	0.0817	156.19

*Índice calculado entre duas medidas com a barra sem dano

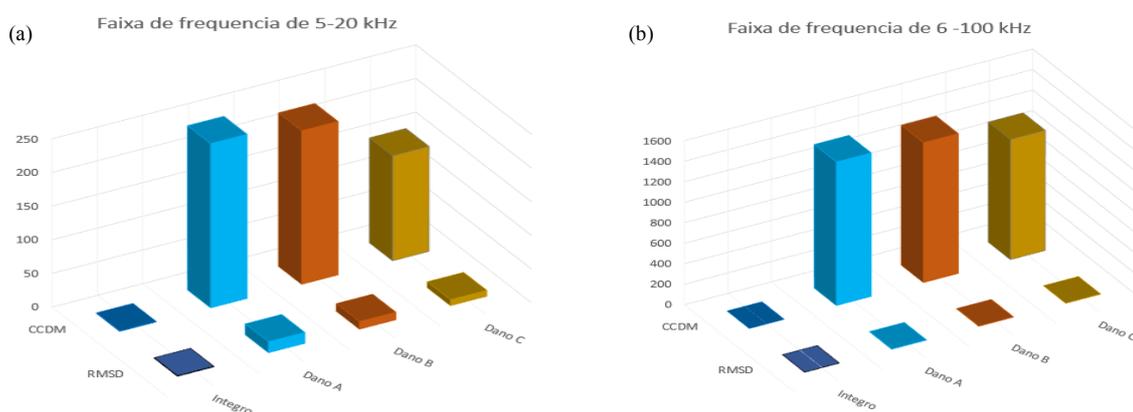
Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 7 - Índices RMSD e CCMD Dano NDE na faixa de frequência 60-100 kHz.

Distância do Dano				
L (cm)	RMSD simples	RMSD normalizado	CCMD simples	CCMD normalizado
Baseline*	1741.13	1	0.000523	1
5	4137.46	2.38	0.7328	1400.66
10	5452.91	3.13	0.7142	1365.18
15	4702.86	2.70	0.6136	1172.91

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 30 – Índices RMSD e CCMD Dano NDE. (a) Faixa de freq. de 5-20 kHz. (b) Faixa de freq. 60-100 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na presença de danos não destrutivos, os valores dos índices RMSD para os casos de maior (28487,02) e de menor impacto (4137,46) são, respectivamente, 16,36 e 2,38 vezes maior do que o valor obtido na condição sem dano (1741,14).

Tabela 8 - Índices RMSD e CCDM, Placa - Dano Destrutivo faixa de frequência 10-25 kHz.

Distância do Dano				
L (cm)	RMSD simples	RMSD normalizado	CCMD simples	CCMD normalizado
Baseline*	1741.13	1	0.000523	1
5	30920.41	1.78	0.0460	87.93
10	27970.59	1.61	0.0440	84.10
15	19660.72	1.13	0.0490	93.70

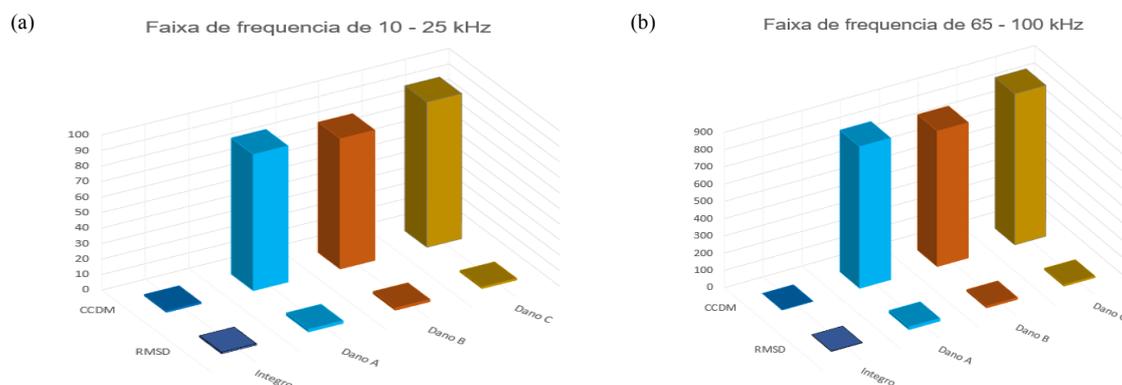
Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 9 - Índices RMSD e CCDM, Placa - Dano Destrutivo faixa de frequência 65-100 kHz.

Distância do Dano				
L (cm)	RMSD simples	RMSD normalizado	CCMD simples	CCMD normalizado
Baseline*	1741.13	1	0.000523	1
5	4446.21	2.55	0.4299	821.74
10	4168.15	0.94	0.4111	785.79
15	5556.33	1.33	0.4580	875.38

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 31 – Índices RMSD e CCDM: Dano Destrutivo. (a) Faixa de freq. de 10 - 25 kHz. (b) Faixa de freq. 65-100 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor.

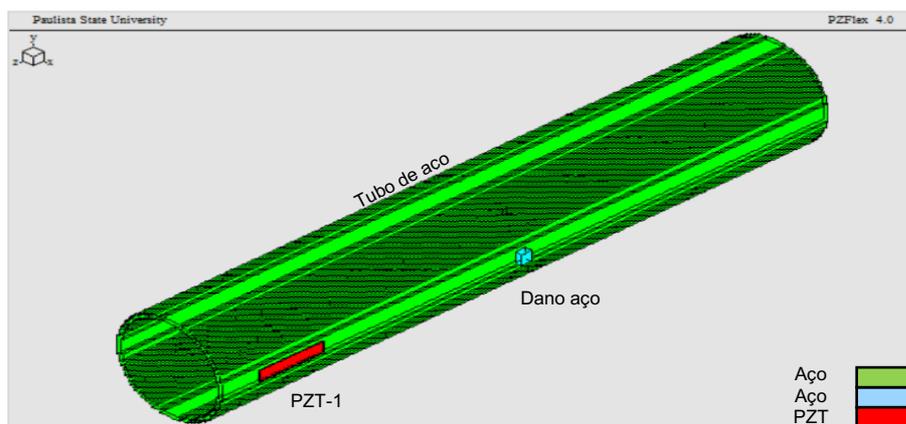
Na presença de dano destrutivo (buraco) de maior impacto (5556.33) e de menor impacto (19660.72) são, respectivamente, 3,19 e 1,13 vezes maior do que o valor obtido na condição sem dano (1741,14). Portanto, o sistema apresenta uma boa sensibilidade na detecção de falha. Pode-se observar que a sensibilidade do índice CCDM do sistema é maior do que a obtida para o índice RMSD para ambos os tipos de danos.

4.5 DETECÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS CILINDRICAS

Para detecção de danos de uma estrutura cilíndrica foi criado no simulador um tubo de aço (tamanho: 30 cm x 4,7 cm x 1 mm) com dano não destrutivo (uma massa de aço), e simulados dois danos, dano A (massa de 5 mm x 5 mm x 3 mm colada a 100 mm) e dano B (massa colada a 150 mm), conforme ilustrado na Figura 32.

A faixa de frequência definida foi de 5-20 kHz ou 80-110 kHz, onde encontram-se os melhores picos de ressonância, e conseguir uma maior sensibilidade na detecção do dano.

Figura 32 – Tubo de aço com dano não destrutivo.



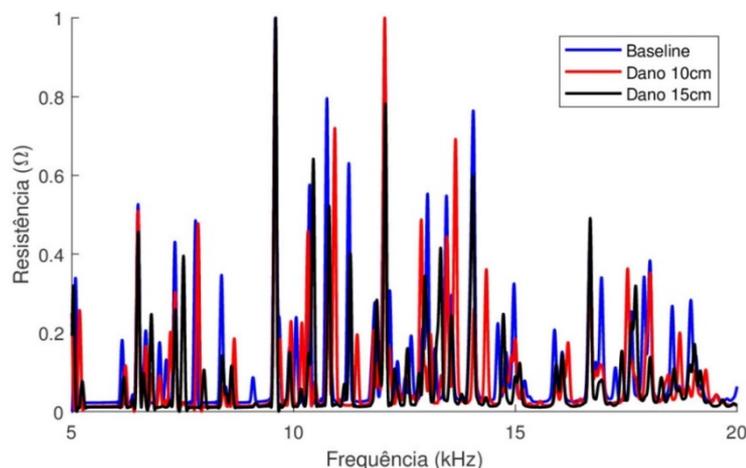
Fonte: Dados do próprio autor.

As assinaturas da parte real da impedância comparando os danos causados no tubo de aço serão apresentadas através das assinaturas, em seguida são analisados os índices de falha métrica RMSD e CCDM.

4.5.1 Estrutura com dano não destrutivo (Aumento de Massa)

Na Figura 33 são apresentadas as assinaturas da parte real da impedância elétrica, obtidas no simulador, incluindo o dano A e dano B, e identificada as assinaturas para a faixa de frequência de 5-20 kHz.

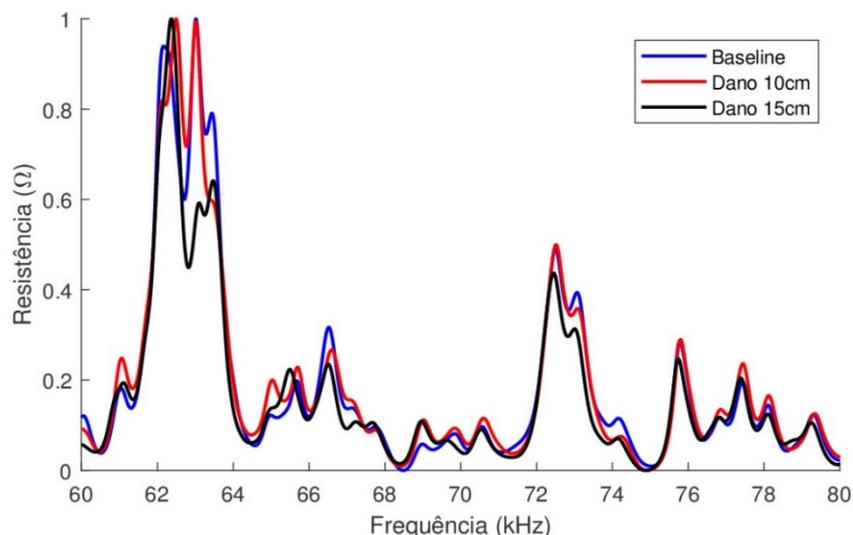
Figura 33 – Tubo: Parte real da impedância faixa de frequências de 5-20 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 34 observa-se a medida da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 65-100 kHz.

Figura 34 – Tubo: Parte real da impedância faixa de frequências de 60-80 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor.

4.5.2 Análise índice RMSD e CCMD

Para uma avaliação dos índices de falha métrica RMSD e CCMD os valores obtidos são apresentados nas Tabelas 10 e 11, representando os resultados de danos não destrutivos; na Figura 35 corresponde aos resultados dos danos não destrutivos.

Tabela 10 - Índices RMSD e CCMD Dano não Destrutivo faixa de frequência 5-20 kHz.

Distância do Dano				
L (cm)	RMSD simples	RMSD normalizado	CCMD simples	CCMD normalizado
Baseline*	20,98	1	4,88E-06	1
10	1174,27	55,97	0,003216	659,60
15	988,12	47,09	0,003634	733,68

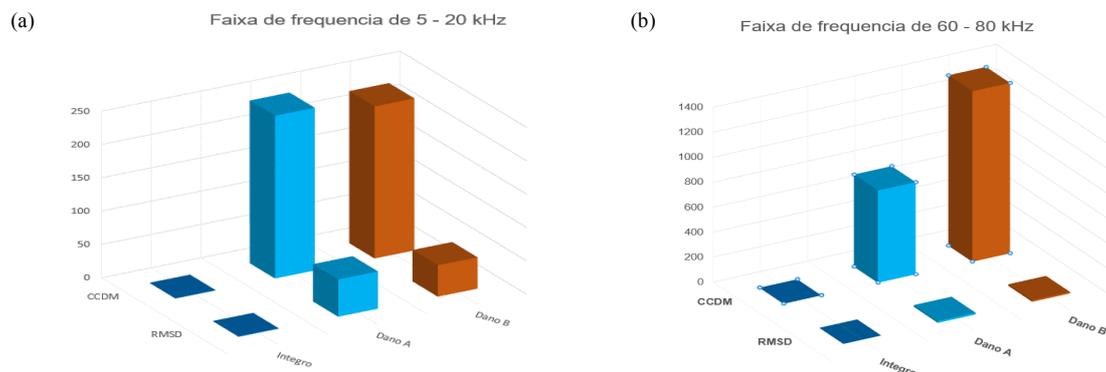
Fonte: Dados do próprio autor

Tabela 11 - Índices RMSD e CCMD Dano não Destrutivo faixa de frequência 60-80 kHz

Distância do Dano				
L (cm)	RMSD simples	RMSD normalizado	CCMD simples	CCMD normalizado
Baseline*	20,98	1	4,88E-06	1
10	301,41	14,37	0,003683	738,83
15	259,61	12,37	0,006656	1365,17

Fonte: Dados do próprio autor

Figura 35 – Índices RMSD e CCDM Dano não Destrutivo. (a) Faixa de freq. de 5 - 20 kHz. (b) Faixa de freq. 60 - 80 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor

Analisando os dados da Tabela 10 e 11 observa-se que na presença de danos não destrutivos os valores do índice RMSD apresentam diferenças em relação ao *baseline* de forma significativa para a faixa de frequência mais baixa de 5-20 kHz, (55,97 e 47,09) vezes maior que valor obtido sem dano na assinatura com a estrutura em estado íntegro. Observa-se que os dois índices apresentam melhores resultados para os danos mais próximo ao PZT-1, para ambas faixas de frequências analisadas, e que a sensibilidade do índice CCDM do sistema é maior do que a obtida para o índice RMSD, como já detectado na placa de alumínio no item anterior.

Dessa forma, avaliando os resultados das duas estruturas, tanto plana como cilíndrica conclui-se que os modelos criados no simulador têm comportamento similar e é possível ter bons resultados na detecção de falhas de forma adequada sem custo de materiais, principalmente para análises de danos não destrutivos no material.

5 EFEITO DA TEMPERATURA

Os sistemas de SHM baseado na EMI é muito sensível às mudanças ambientais, em particular a temperatura, que afeta as propriedades dos transdutores piezelétricos, que são citados na literatura como um problema crítico (SEPEHRY; SHAMSHIRSAZ; BASTANI, 2010), dessa forma a variação da temperatura provoca alterações nas assinaturas de impedância elétrica, podendo gerar falsos positivos. Nesse Capítulo é apresentado um estudo e a caracterização do efeito da temperatura usando o simulador e por experimentos reais. Em seguida é proposto um algoritmo computacional para compensação da temperatura na variação das características das propriedades dos transdutores piezelétricos. São apresentados os resultados obtidos por simulação e os experimentais e as análises e discussões.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS PZT/ ESTRUTURA NO SIMULADOR

Para uma pesquisa mais aprofundada é necessário considerar os dados reais obtidos para cada parâmetro, obtidas pelos fabricantes dos materiais são os mais indicados em fornecê-los. Portanto, neste trabalho, a fim de modelar um sistema acoplado de Estrutura/PZT e simular o efeito da temperatura foi necessário caracterizar os principais parâmetros dependentes da temperatura, da estrutura e do PZT (apresentado no Capítulo 4). Portanto, para simular o sistema corretamente, foi necessário caracterizar esses 13 parâmetros em função da temperatura, na faixa de -40°C a 80°C . Os valores dos coeficientes do material piezelétrico (PZT 5A) e da estrutura (placa de alumínio e tubo de aço), são apresentados Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros PZT/Densidade das estruturas para temperaturas de -40°C a 80°C .

temp [°C]	et11/e0	et33/e0	s11 [m ² /N]	s33 [m ² /N]	s44 [m ² /N]	s12 [m ² /N]	s13 [m ² /N]	s13 [m ² /N]	s66 [m ² /N]	d15 [C/N]	d31 [C/N]	d33 [C/N]	alumínio	aço
-40	1993,7	1075,2	1,52E-11	1,77E-11	4,43E-11	-4,82E-12	-5,31E-12	-8,96E-12	4E-11	5,89E-10	-1,4E-10	2,67E-10	2711,98	7816,767
-35	2034,2	1109,2	1,53E-11	1,78E-11	4,44E-11	-4,88E-12	-5,33E-12	-8,98E-12	4,03E-11	5,93E-10	-1,5E-10	2,69E-10	2711,05	7815,475
-30	2072,1	1146,1	1,54E-11	1,79E-11	4,46E-11	-4,94E-12	-5,35E-12	-9E-12	4,06E-11	5,95E-10	-1,5E-10	2,74E-10	2710,13	7814,183
-25	2104,9	1184,7	1,55E-11	1,8E-11	4,48E-11	-5E-12	-5,37E-12	-9,02E-12	4,1E-11	5,98E-10	-1,5E-10	2,82E-10	2709,21	7812,891
-20	2132,4	1223,8	1,56E-11	1,81E-11	4,51E-11	-5,05E-12	-5,39E-12	-9,04E-12	4,13E-11	6,01E-10	-1,6E-10	2,92E-10	2708,29	7811,61
-15	2159	1262,9	1,57E-11	1,81E-11	4,54E-11	-5,1E-12	-5,4E-12	-9,05E-12	4,16E-11	6,03E-10	-1,6E-10	3,01E-10	2707,37	7810,31
-10	2190,9	1301,6	1,58E-11	1,82E-11	4,56E-11	-5,15E-12	-5,42E-12	-9,07E-12	4,2E-11	6,04E-10	-1,6E-10	3,07E-10	2706,44	7809,019
-5	2232,9	1340,3	1,6E-11	1,82E-11	4,57E-11	-5,2E-12	-5,43E-12	-9,08E-12	4,23E-11	6,04E-10	-1,7E-10	3,09E-10	2705,52	7807,73
0	2285,2	1379,1	1,61E-11	1,83E-11	4,58E-11	-5,25E-12	-5,44E-12	-9,09E-12	4,26E-11	6,03E-10	-1,7E-10	3,1E-10	2704,61	7806,44
5	2343	1418	1,62E-11	1,83E-11	4,59E-11	-5,3E-12	-5,45E-12	-9,1E-12	4,29E-11	6,03E-10	-1,7E-10	3,1E-10	2703,68	7805,151
10	2399,3	1456,4	1,62E-11	1,82E-11	4,59E-11	-5,34E-12	-5,46E-12	-9,11E-12	4,32E-11	6,02E-10	-1,7E-10	3,14E-10	2702,76	7803,863
15	2447,7	1493,5	1,63E-11	1,81E-11	4,6E-11	-5,38E-12	-5,46E-12	-9,11E-12	4,34E-11	6,01E-10	-1,8E-10	3,2E-10	2701,83	7802,575
20	2486	1528,3	1,64E-11	1,8E-11	4,62E-11	-5,42E-12	-5,47E-12	-9,12E-12	4,36E-11	6,01E-10	-1,8E-10	3,29E-10	2700,91	7801,287
25	2515,9	1560,5	1,64E-11	1,78E-11	4,64E-11	-5,45E-12	-5,47E-12	-9,12E-12	4,37E-11	6E-10	-1,8E-10	3,38E-10	2699,99	7800,00
30	2540,7	1590,4	1,65E-11	1,77E-11	4,64E-11	-5,48E-12	-5,47E-12	-9,12E-12	4,39E-11	6E-10	-1,9E-10	3,46E-10	2699,07	7798,713
35	2563	1619,5	1,65E-11	1,76E-11	4,64E-11	-5,51E-12	-5,47E-12	-9,12E-12	4,4E-11	6E-10	-1,9E-10	3,53E-10	2698,15	7797,427
40	2583,4	1649,4	1,65E-11	1,76E-11	4,61E-11	-5,53E-12	-5,47E-12	-9,12E-12	4,41E-11	5,99E-10	-1,9E-10	3,58E-10	2697,22	7796,141
45	2601,2	1681,9	1,65E-11	1,76E-11	4,57E-11	-5,55E-12	-5,46E-12	-9,11E-12	4,41E-11	5,98E-10	-1,9E-10	3,64E-10	2696,30	7794,855
50	2616,9	1718,1	1,65E-11	1,76E-11	4,53E-11	-5,57E-12	-5,46E-12	-9,11E-12	4,42E-11	5,95E-10	-2E-10	3,71E-10	2695,38	7793,57
55	2632,5	1758,1	1,66E-11	1,76E-11	4,49E-11	-5,59E-12	-5,45E-12	-9,1E-12	4,43E-11	5,91E-10	-2E-10	3,78E-10	2694,46	7792,286
60	2651,6	1801,5	1,66E-11	1,76E-11	4,46E-11	-5,61E-12	-5,44E-12	-9,09E-12	4,44E-11	5,87E-10	-2E-10	3,85E-10	2693,54	7791,00
65	2675,6	1846,9	1,66E-11	1,76E-11	4,43E-11	-5,64E-12	-5,43E-12	-9,08E-12	4,46E-11	5,83E-10	-2E-10	3,9E-10	2692,61	7789,718
70	2701,7	1893,5	1,67E-11	1,75E-11	4,4E-11	-5,66E-12	-5,42E-12	-9,07E-12	4,47E-11	5,81E-10	-2E-10	3,92E-10	2691,69	7788,434
75	2722,6	1940,3	1,67E-11	1,74E-11	4,37E-11	-5,68E-12	-5,4E-12	-9,05E-12	4,47E-11	5,82E-10	-2E-10	3,92E-10	2690,77	7787,151
80	2730,1	1987,1	1,67E-11	1,73E-11	4,35E-11	-5,7E-12	-5,39E-12	-9,04E-12	4,48E-11	5,84E-10	-2,1E-10	3,92E-10	2689,85	7785,869

Fonte: Dados do próprio autor

5.1.1 Efeito da temperatura nos parâmetros do PZT

As cerâmicas piezelétricas são altamente dependentes da temperatura. A constante dielétrica, ϵ_{33}^T , é conhecida por variar significativamente com a temperatura (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996; THE ENGINEERING TOOLBOX, 2018; PARK; KABEYA, 1999). Geralmente essa dependência não é linear, mas pode ser caracterizado por meio de uma função quadrática ou cúbica.

O modulo de Young's medido com campo elétrico zero do PZT, Y_{xx}^E é conhecido como sendo levemente dependente da variação da temperatura e essa variável muda com campo elétrico.

Além disso, sabe-se que a constante de acoplamento piezoelétrico, d_{3x} , na direção arbitrária, x medida com *stress* zero, é conhecida por variar linearmente com a temperatura. Um aumento da temperatura leva a um aumento muito pequeno de d_{3x} (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996; STEIN, 1994). As Dimensões do PZT, w_a , l_a e h_a , são dependentes da temperatura devido ao coeficiente de expansão térmica. Nesses casos, essas dependências podem ser consideradas lineares.

A fim de caracterizar o comportamento das frequências de ressonância em função da temperatura, cada um dos parâmetros é representado por um tipo de função, linear ou quadrática, considerando as observações acima indicadas. Além disso, sabendo da complexidade para representar realmente a relação de impedâncias, que é parte da Equação (13), em função da frequência e da temperatura, procura-se simplificar a análise por meio da equivalência apresentada na Equação (14).

$$\left[1 + \left(\frac{Z_a(\omega)}{Z_s(\omega)}\right)\right]^{-1} = (a_1 + b_1\omega)(a_2 + b_2T) \quad (13)$$

onde, a_1 , b_1 , a_2 e b_2 são apenas constantes. Então, são substituídas na Equação (1) deslocamento elétrico.

Para encontrar as frequências de ressonância, calcula-se a derivada da expressão resultante com respeito a ω , e em seguida iguala-se a zero. Um resultado possível que caracteriza as frequências de ressonância em função da temperatura, que cumpre com os requisitos, é apresentada na Equação (14),

$$\omega = a_3 + b_3T \quad (14)$$

onde, a_3 , b_3 são apenas constantes.

5.1.2 Efeito da temperatura nos parâmetros da estrutura.

O segundo termo da Equação (3) inclui a impedância mecânica tanto do PZT, Z_a quanto da estrutura hospedeira, Z_s . Quando o PZT é colado na estrutura, Z_a é fixa, portanto, Z_s é a parte que determina exclusivamente a contribuição do segundo termo para a impedância geral. A contribuição do segundo termo aparece no espectro de impedância como picos agudos da impedância elétrica. Como esses picos correspondem a ressonâncias estruturais específicas, eles constituem uma descrição única do comportamento dinâmico da estrutura.

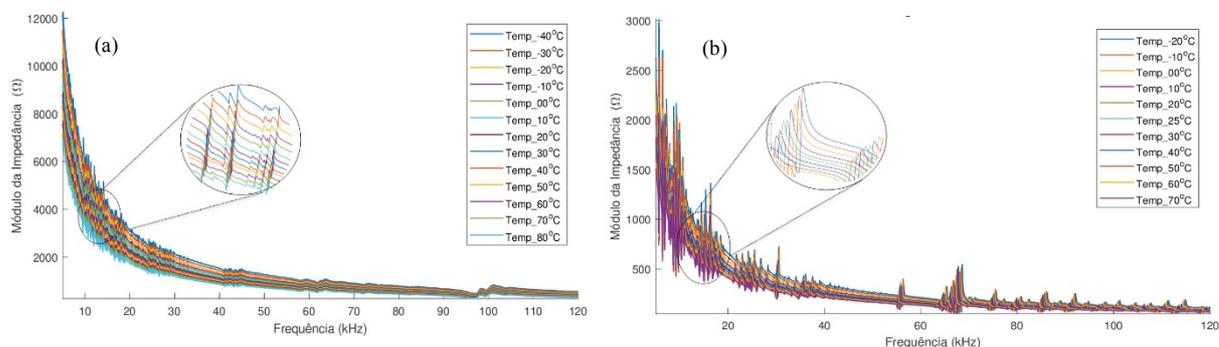
Considerando que Z_s é dependente da frequência de excitação e da temperatura (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996). Sendo que o módulo de Young da estrutura varia levemente em relação à temperatura (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996). Assim, o efeito da variação da temperatura na, Z_s altera os picos de ressonância, produzindo principalmente um deslocamento de frequência nas medições de impedância.

5.2 ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA APLICADA A TUBO DE AÇO E PLACA DE ALUMÍNIO

Para analisar e estudar o efeito da variação de temperatura é utilizado também os modelos placa de alumínio e tubo de aço do sistema composto pelo PZT-1 colado a essas estruturas, que foi simulado e validado, cujas características e parâmetros das duas estruturas encontram-se na Tabela 2. As características e parâmetros do Tubo-1 e Placa-1 foram detalhadas nas Tabelas 2 (Seção 4).

Na Figura 36 são apresentadas as assinaturas de impedância elétrica do PZT-1, obtidas através do simulador para diferentes temperaturas na faixa de -40°C até 80°C para tubo-1 e -20°C até 70°C para placa-1, para a faixa de frequência 5 kHz até 125 kHz.

Figura 36 – Assinaturas de impedância elétrica do PZT-1 sob efeito da temperatura; (a) Tubo-1 (b) Placa-1.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Conforme já registrado na literatura, na figura observa-se que, à medida que a temperatura muda, as assinaturas de impedância elétrica do PZT evidenciam deslocamentos de frequência e de amplitude.

Para estudar e entender com mais detalhes as implicações da variação de temperatura nas medições de impedância elétrica, são analisados e discutidos os resultados de três tipos de simulações, correspondentes a três casos diferentes para o tubo-1. Nota-se que este tipo de estudo não poderia ser realizado experimentalmente, porém somente é possível pôr meio de simuladores numéricos. Assim, para cada caso, o modelo é simulado mudando os valores dos parâmetros de cada material (PZT-1 e/ou tubo-1), separadamente e do conjunto como um todo. As respostas são apresentadas a seguir em apenas duas faixas a primeira na faixa de 18.6 kHz a 19.2 kHz e a segunda de 96 kHz a 106 kHz.

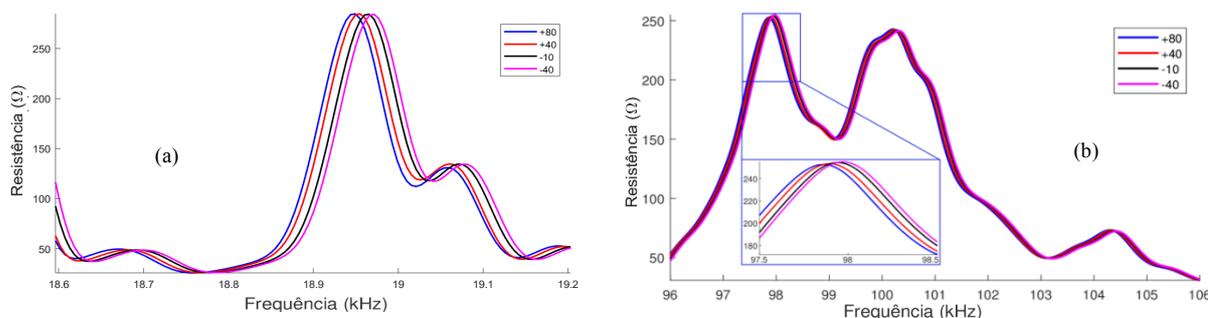
5.2.1 Caso 1: Deslocamento horizontal da impedância - propriedades do tubo de aço dependentes da temperatura

No primeiro caso, para cada simulação apenas os parâmetros do tubo-1 foram alterados, em função da temperatura.

apenas os parâmetros do tubo-1, em função da temperatura. Na Figura 37 são apresentadas as assinaturas da parte real da impedância elétrica nas duas faixas de frequência indicadas, onde observa-se que existe um deslocamento horizontal para, à medida que a temperatura aumenta. Nas figuras é possível observar que como efeito principal existe um deslocamento horizontal para a esquerda à medida que a temperatura aumenta.

Nota-se que para os picos localizados em baixa frequência, ou seja, entre 18.9 kHz e 19 kHz, Figura 37(a), as assinaturas obtidas a -40°C e 80°C apresentam um deslocamento de 20 Hz. No entanto, para “alta frequência”, ou seja, para os picos localizados adjacência de 98 kHz (Figura 37(b)), as mesmas assinaturas apresentam um deslocamento de 106 Hz.

Figura 37 – Deslocamento horizontal da parte real de impedância: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.



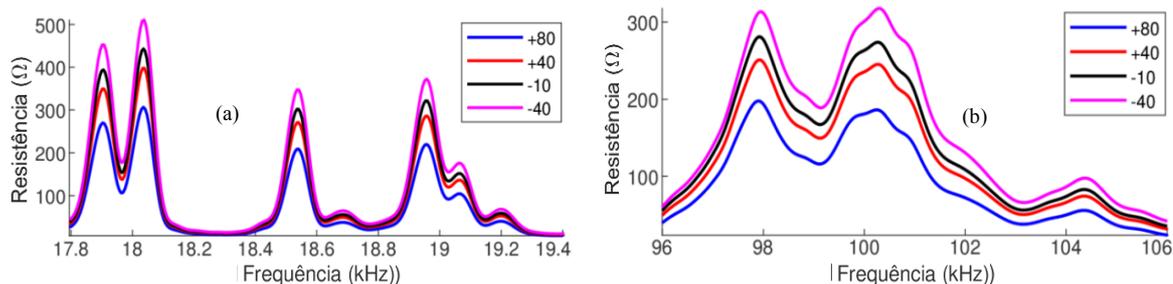
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Dessa forma, confirmando que o efeito da temperatura nos parâmetros do tubo-1, produz principalmente o deslocamento de frequência nas assinaturas de impedância elétrica. Verifica-se também que, conforme a frequência aumenta, o deslocamento horizontal também aumenta. Além disso, pode-se observar que existe uma alteração muito pequena na amplitude da impedância elétrica quando a temperatura varia.

5.2.2 Caso 2: Deslocamento vertical da impedância - propriedades do PZT dependentes da temperatura

No segundo caso, para cada simulação alteram-se apenas os parâmetros do PZT-1 em função da temperatura. Na Figura 38 são apresentadas as assinaturas da parte real da impedância elétrica para as mesmas duas faixas estreitas. Observa-se que para ambas faixas de frequência existe uma diminuição da amplitude (deslocamento vertical) conforme a temperatura aumenta e que as alterações das amplitudes correspondentes aos picos de ressonância são mais expressivas. No entanto, assim como no primeiro caso, existe também um deslocamento horizontal que não pode ser desconsiderado.

Figura 38 – Deslocamento vertical da parte real de impedância: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.



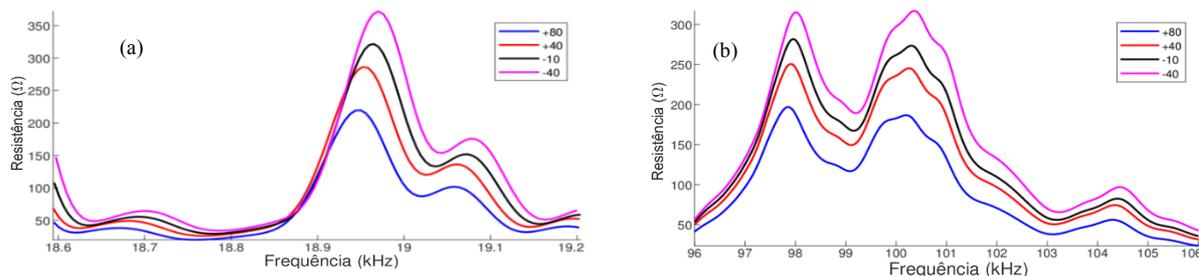
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Portanto, o efeito da temperatura nos parâmetros do PZT produz principalmente alterações nas amplitudes das assinaturas de impedância elétrica e que esse deslocamento vertical produzido é proporcional a sua amplitude.

5.2.3 Caso 3: Deslocamentos horizontal e vertical da impedância

No terceiro caso, para cada simulação foram alterados os parâmetros do PZT-1 e do tubo-1 em função da temperatura. Na Figura 39 são apresentadas as assinaturas da parte real da impedância elétrica para as duas faixas estreitas. Neste caso, verifica-se que, verifica-se que existe um deslocamento horizontal/vertical de 22Hz/152,35Ω entre os picos de baixa frequência e um deslocamento horizontal/vertical de 155Hz/118,20Ω entre os picos de alta frequência. Na Tabela 13 são resumidos os efeitos para os três casos e observa-se que no caso 3, existe uma soma de efeitos dos casos 1 e 2.

Figura 39 – Deslocamentos horizontal e vertical da parte real de impedância: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 13. Deslocamentos horizontais e verticais da parte real de impedância para as temperaturas de -40°C e 80°C .

Caso	Deslocamento horizontal de picos		Deslocamento vertical picos	
	Entre 18.9 - 19kHz	Entorno de 98kHz	Entre 18.9 - 19kHz	Entorno de 98kHz
1	20 Hz	106 Hz	0,39 Ω	2,34 Ω
2	2 Hz	49 Hz	152,25 Ω	115,69 Ω
3	22 Hz	155 Hz	152,35 Ω	118,20 Ω

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por fim, confirma-se que existe uma relação direta entre os deslocamentos horizontais e o coeficiente de expansão térmica da estrutura da hospedeira tubo de aço, conforme demonstrado no primeiro caso. Os deslocamentos horizontais aumentam à medida que a frequência aumenta.

Existe evidência que os deslocamentos de amplitude se fazem presentes quando os parâmetros do material piezelétrico de PZT também são alterados em função da temperatura, como mostrado no segundo caso. Assim, no terceiro caso, ambos os efeitos podem ser observados simultaneamente. Com os resultados da Tabela 13, conclui-se que os parâmetros do PZT também afetam, ainda que em menor grau, no deslocamento horizontal. No entanto, os parâmetros da estrutura praticamente não afetam o deslocamento vertical.

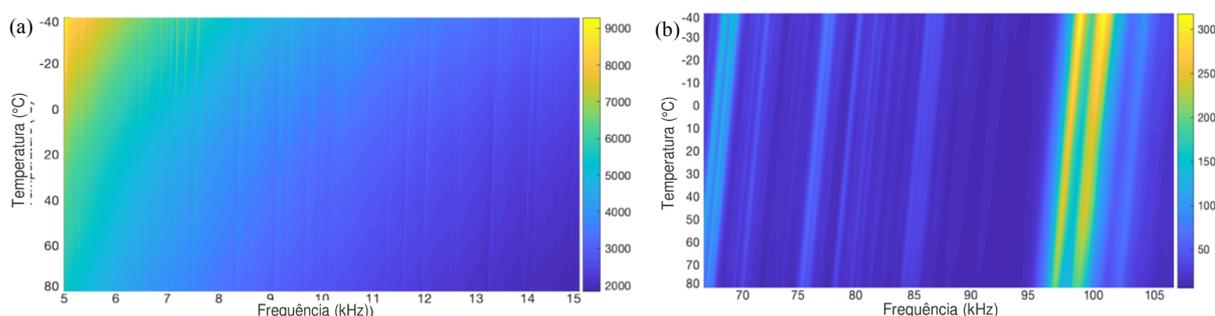
Para desenvolver e aplicar um mecanismo de compensação do efeito da temperatura, resta saber como seriam as linhas de tendência dos deslocamentos horizontais e verticais. Na seção a seguir, faz-se uma análise por meio de gráficos 3D para se ter um melhor entendimento das tendências das variações nas medições de Impedância Elétrica.

Análise no Comportamento das Alterações das Medições de Impedância Elétrica por Meio de Gráficos 3D

Para analisar com mais detalhes o comportamento espacial das medições de impedância elétrica em função da temperatura, foram gerados gráficos 3D da impedância elétrica para tubo-1. Na Figura 40 e 41, apresentam-se dois gráficos 3D da magnitude (Z), a primeira para baixa frequência e outra para alta frequência. Os valores das magnitudes são representados por meio da barra de cores.

Figura 40 analisa as amplitudes dos picos de ressonância, que se destacam pelas cores mais claras, é possível observar que, conforme muda a temperatura, os picos apresentam deslocamentos de frequência com linhas de tendência linear, no entanto, essas linhas de tendência não são paralelas em toda a faixa. Na Figura 40(a), para baixas frequências, as linhas de tendência são mais verticais. Na Figura 40(b), para altas frequências, as linhas de tendência são mais inclinadas. Conclui-se que as inclinações das linhas de tendência, em relação ao eixo de frequência, diminuem conforme a frequência aumenta.

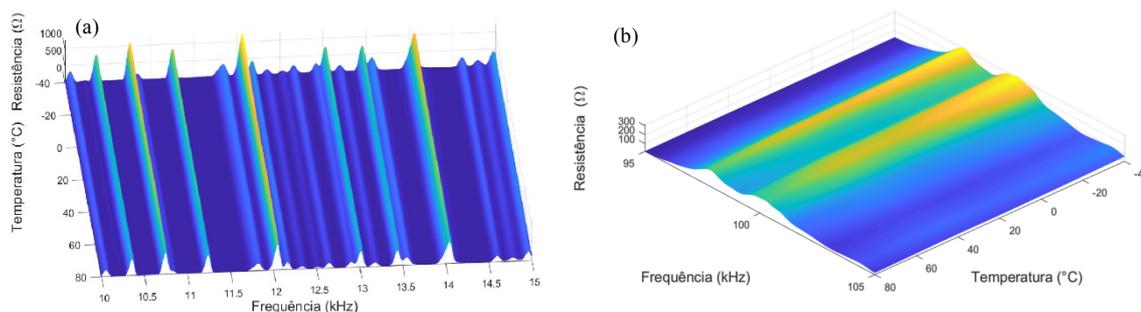
Figura 40 – Linhas de tendência do deslocamento horizontal da magnitude de Z Sistema: (a) baixa frequência e (b) alta frequência



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De forma similar, na Figura 41, analisando as amplitudes dos picos de ressonância, pode-se conferir que, conforme a temperatura muda, as linhas de tendência das amplitudes são praticamente lineares, no entanto as inclinações dependem das amplitudes dos picos.

Figura 41 – Linhas de tendência do deslocamento vertical da parte real de Z: (a) baixa frequência e (b) alta frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por fim de propor novas técnicas de compensação do efeito da temperatura, pode-se concluir que o deslocamento de frequência apresenta uma dependência linear tanto em função da temperatura quanto em função da frequência. No tocante ao deslocamento vertical, pode-se considerar que as alterações de amplitude são aproximadamente lineares em função da temperatura.

5.3 EFEITO DA TEMPERATURA NA DETECÇÃO DE DANO BASEADO NA EMI

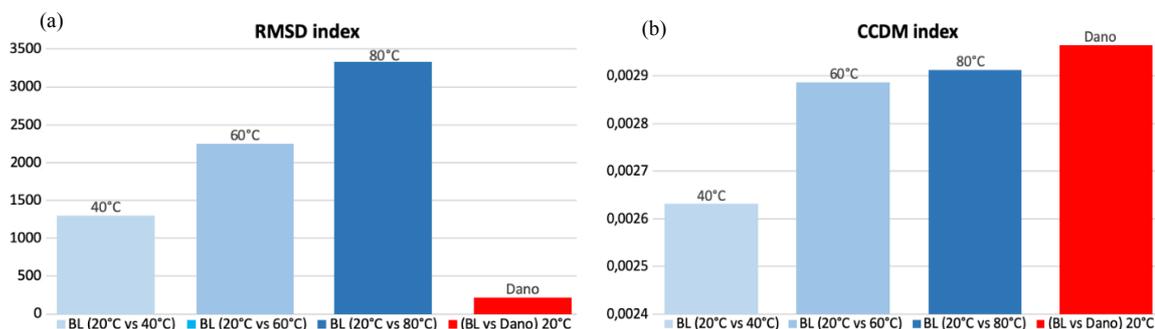
Portanto, as assinaturas da EMI são comparadas para detectar mudanças na a técnica da EMI, as assinaturas da impedância elétrica são comparadas para detectar mudanças na resposta dinâmica da estrutura. Uma assinatura de monitoramento é comparada com uma assinatura *baseline*, registrada previamente em condições de estrutura íntegra. Na presença de danos, os valores de impedância serão alterados, com frequências de ressonância e amplitudes diferentes dos presentes na assinatura de *baseline*, ou seja, a assinatura de monitoramento apresentará deslocamentos horizontais e verticais em relação às assinaturas de *baseline*.

Porém, conforme a literatura e as análises apresentadas nesse trabalho, os sistemas de detecção de danos baseados na EMI apresentam uma forte dependência da temperatura e, portanto, qualquer alteração associada a uma mudança de temperatura pode ser confundida como dano, ou seja, detecção de falso positivo.

Assim, nesta seção são comparadas as assinaturas a fim de detectar alterações na impedância elétrica utilizando os índices estatísticos CCDM e RMSD.

Foram comparadas as assinaturas de monitoramento e de *baseline* obtidas experimentalmente para tubo-1. A assinatura *baseline* foi coletada a 20°C. As assinaturas de monitoramento foram coletadas em dois cenários diferentes. No primeiro cenário, três assinaturas foram obtidas com a estrutura íntegra, mudando apenas a temperaturas para 40°C, 60°C e 80°C. No segundo cenário, com dano-2 colado na estrutura, a assinatura de monitoramento foi coletada na mesma temperatura da *baseline*, que é 20°C. Na Figura 42, são apresentados os índices calculados para a faixa de frequência de 5 kHz a 40 kHz.

Figura 42 – Métricas de dano e o efeito da temperatura: (a) RMSD e (b) CCDM.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Como já discutido anteriormente na Seção 2.4, quanto menores os valores dos índices, mais similares são as assinaturas comparadas. Dessa forma destaca-se que os valores dos índices RMSD e CCDM sofrem mudanças significativas quando há variação de temperatura. Os valores dos índices são cada vez maiores à medida em que a temperatura aumenta, indicando um falso

dano. O mesmo foi observado quando a temperatura diminui, sendo as diferenças mais significativas para temperaturas abaixo de 0°C.

Na Figura 42, observa-se que o dano real (barra vermelha) possui um valor de RMSD menor do que os valores obtidos, apenas variando-se a temperatura e um valor de CCDM muito próximo aos obtidos também com a variação de temperatura. Em outras palavras, em um cenário real, a variação de temperatura pode mascarar um dano real e também pode indicar um falso dano.

Portanto, para que a técnica da EMI possa ser aplicada de forma confiável, é imprescindível que os sistemas de SHM incluam técnicas e/ou mecanismos para compensar o efeito de variação da temperatura nas medições de impedância elétrica com sensores tipo PZT.

5.4 COMPENSAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA EM SISTEMAS SHM BASEADO EMI.

Como já exposto na revisão de literatura, diversos pesquisadores propuseram soluções para compensar o efeito da temperatura, mas cada uma delas apresenta restrições, tais como: aplicação em faixas estreitas de frequência, faixas limitadas de temperaturas, necessidade de contar com um número elevado de assinaturas para diferentes temperaturas, número elevado de amostras por cada assinatura e, em alguns casos, algoritmos com alta carga computacional. Com isso, o grande desafio continua sendo a procura de novos modelos para compensar de maneira efetiva o efeito da temperatura e que possam ser aplicadas em amplas faixas de frequência e temperatura.

Assim, considerando as discussões apresentadas anteriormente, nessa seção são apresentados dois algoritmos para compensar o efeito da temperatura. A proposta considera também que, de fato existem estruturas ou sistemas, como as aeronaves, que operam a temperaturas extremas (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009).

Para aplicação do método, pelo menos duas assinaturas *baseline* de referência, coletadas a diferentes temperaturas (BL_{T1} e BL_{T2}), deverão ser registradas e armazenadas antes de qualquer monitoramento, considerando que tanto nos deslocamentos horizontais quanto nos deslocamentos verticais existe uma dependência linear em função da temperatura e da frequência.

O método consiste em criar, a partir de uma *baseline* de referência, uma nova *baseline* (BL_{comp}) para a temperatura de operação (T_{op}), na qual será realizado o monitoramento. Inicialmente, uma das assinaturas de referência é compensada em frequência até a temperatura de operação. A seguir é feita a compensação em amplitude.

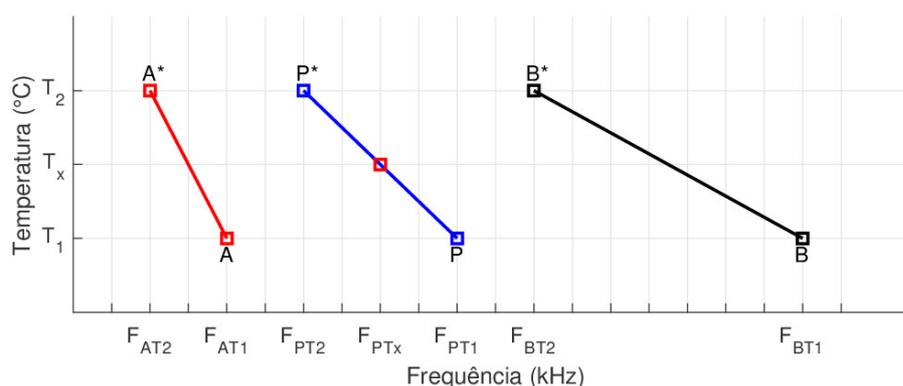
Nas seções seguintes são apresentados os dois algoritmos para compensar o efeito da temperatura: o primeiro para compensar os deslocamentos de frequência (compensação horizontal) e o segundo para compensar as alterações de amplitude (compensação vertical).

5.4.1 Algoritmo para compensar o deslocamento de frequência: compensação horizontal

Dois pontos importantes destacam-se, possibilitando compensar adequadamente o deslocamento de frequência. O primeiro é que as assinaturas da impedância elétrica sofrem um deslocamento horizontal para esquerda à medida que a temperatura aumenta, e vice-versa, como mostrado na Figura 39. O segundo é que o valor da impedância varia ao longo de uma linha de tendência reta conforme a temperatura varia, e com a inclinação que depende da frequência. Neste caso, quanto maior a frequência, menor a inclinação, como mostrado na Figura 40.

Então, baseado nos resultados do item 5.3, na Figura 43 ilustram-se as informações de dois picos de ressonância, identificados como A e B na temperatura T_1 e identificados como A* e B* na temperatura T_2 . Esses picos devem corresponder a duas *baselines* de referência conhecidas e registradas às temperaturas T_1 e T_2 . Na figura, F_{AT1} e F_{AT2} são as frequências do pico A obtidas às temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente. F_{BT1} e F_{BT2} são as frequências do pico B obtidas às temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente.

Figura 43 – Representação geométrica dos deslocamentos de frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Dessa forma, o objetivo é calcular o deslocamento de frequência e determinar a nova frequência, F_{PTx} , de uma medição P qualquer, porém na temperatura T_x . No percurso, uma vez escolhido P, primeiro deve ser calculado a frequência de P*. Neste caso, P corresponde a uma assinatura obtida a T_1 e P* para T_2 , sendo F_{PT1} a frequência de P obtida à temperatura T_1 e F_{PTx} a frequência que corresponderia a P na temperatura T_x . Então, segundo a Figura 43, enquanto a frequência de P pode variar entre as frequências de A e B para a temperatura T_1 , a frequência de P* pode variar entre as frequências de A* e B* para a temperatura T_2 .

Por tanto, a Equação 15 define a proporção entre os deslocamentos de frequências de A a P e de A a B.

$$\frac{F_{PT2} - F_{AT2}}{F_{BT2} - F_{AT2}} = \frac{F_{PT1} - F_{AT1}}{F_{BT1} - F_{AT1}} \quad (15)$$

A partir da Equação 15, isolando F_{PT2} , na Equação 16 pode-se calcular a frequência de P para a temperatura T_2 ,

$$F_{PT2} = F_{AT2} + (F_{BT2} - F_{AT2}) \cdot \frac{(F_{PT1} - F_{AT1})}{(F_{BT1} - F_{AT1})} \quad (16)$$

No triângulo retângulo que tem como hipotenusa P-P*, por semelhança podem ser obtidas as equivalências apresentadas nas Equações 17:

$$\frac{F_{PT1} - F_{PTx}}{F_{PT1} - F_{PT2}} = \frac{T_x - T_1}{T_2 - T_1} \quad \text{ou} \quad \frac{F_{PTx} - F_{PT2}}{F_{PT1} - F_{PT2}} = \frac{T_2 - T_x}{T_2 - T_1} \quad (17)$$

Portanto, a partir da Equação 9, isolando F_{PTx} , em (18) existem duas alternativas para calcular a frequência de P para a temperatura de operação $T_{op} = T_x$.

$$F_{PTx} = F_{PT1} - (F_{PT1} - F_{PT2}) \cdot \frac{(T_x - T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad \text{ou} \quad F_{PTx} = F_{PT2} + (F_{PT1} - F_{PT2}) \cdot \frac{(T_x - T_2)}{(T_2 - T_1)} \quad (18)$$

É recomendável utilizar a primeira expressão (lado esquerdo) se a temperatura T_1 se encontra mais próximo de T_{op} , porém, se a temperatura T_2 se encontra mais próximo de T_{op} , é recomendável utilizar a segunda expressão (lado direito).

O processo é iterativo e deve-se repetir para todos os pontos de frequência que correspondem às medições de impedância que se pretende compensar. Porém, fica claro que o processo de compensação horizontal depende da frequência.

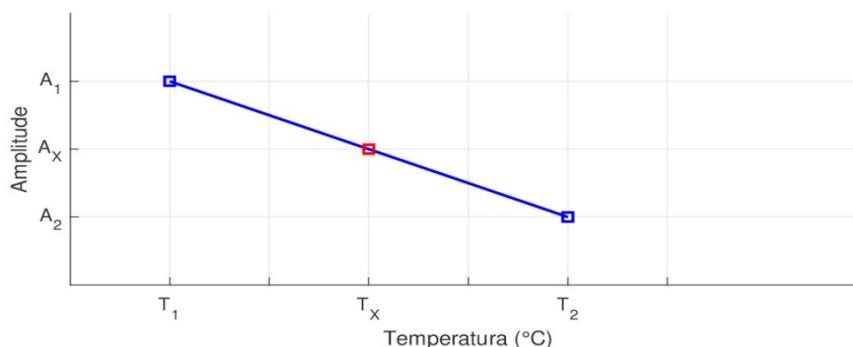
5.4.2 Algoritmo para compensar o deslocamento de amplitude: compensação vertical

A partir das conclusões tiradas das seções 5.3.2, 5.3.3 e 5.3.4, para compensar o deslocamento da amplitude, assumem-se duas hipóteses. A primeira, é que as amplitudes de impedância variam linearmente em função da temperatura, sendo que, conforme a temperatura aumenta a amplitude diminui seguindo uma linha de tendência linear. A segunda, quanto maior é a amplitude maior será o deslocamento vertical. Portanto, a compensação da amplitude é aplicada um desvio para cada ponto de frequência, que depende da temperatura e das amplitudes das duas assinaturas *baseline* de referência alinhadas em frequência. Para Tal, é necessário que a compensação horizontal seja realizada primeiro.

Então, baseado nos resultados do item 5.3., na Figura 44 ilustram-se as informações de um só pico de ressonância, identificados como A_1 e A_2 , que correspondem às assinaturas *baseline* de referência registradas às temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente. Antes de aplicar o

método, as assinaturas *baseline* de referência devem estar alinhadas em frequência, ou seja, as frequências de A_1 e A_2 devem ser iguais. Assim, pela primeira hipótese, A_1 e A_2 pertencem à mesma reta, portanto, para o mesmo ponto de frequência, a amplitude (A_x) para qualquer temperatura de operação (T_x) também estará localizada na reta.

Figura 44 – Representação geométrica dos deslocamentos de amplitude.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Aplicando semelhança de triângulos, a proporção entre os deslocamentos de amplitude em função da temperatura é dada pela Equação 19.

$$\frac{A_1 - A_x}{T_x - T_1} = \frac{A_1 - A_2}{T_2 - T_1} \quad \text{ou} \quad \frac{A_x - A_2}{T_2 - T_x} = \frac{A_1 - A_2}{T_2 - T_1} \quad (19)$$

A partir da Equação 19, isolando A_x , em (20) existem duas alternativas para calcular a amplitude para a temperatura de operação $T_{op} = T_x$.

$$A_x = A_1 + (A_1 - A_2) \cdot \frac{(T_1 - T_x)}{(T_2 - T_1)} \quad \text{ou} \quad A_x = A_2 + (A_1 - A_2) \cdot \frac{(T_2 - T_x)}{(T_2 - T_1)} \quad (20)$$

Neste caso, também é recomendável utilizar a primeira expressão (lado esquerdo) se a temperatura T_1 se encontra mais próximo de T_{op} , porém, se a temperatura T_2 se encontra mais próximo de T_{op} , é recomendável utilizar a segunda expressão (lado direito).

O processo é iterativo deve ser repetido para todos os pontos de frequência que correspondem às medições de impedância que se pretende compensar.

5.5 INTERFACE GRÁFICA PARA COMPENSAR O DESLOCAMENTO DE AMPLITUDE: COMPENSAÇÃO VERTICAL

Para desenvolver a interfase gráfica foi desenvolvido um algoritmo computacional foi implementado para compensar os deslocamentos de frequência e amplitude. A Figura 45 apresenta a interface gráfica de fácil utilização, elaborada em Matlab®.

Figura 45 – Interface gráfica para compensar o efeito da temperatura.

The interface is divided into two main sections:

- Data for compensation:**
 - Information collected from signatures:** Choose structure: Pipe 40cm - Experimental, Load: L.
 - Temperatures:** T1: -40 °C, T2: 80 °C, Tref: 20 °C.
 - Z peak 1:** Freq. T1: 15567.8 Hz, Freq. T2: 15346.5 Hz, Freq. Tref: 15457.1 Hz.
 - Z peak 2:** Freq. T1: 98682.4 Hz, Freq. T2: 97492.2 Hz, Freq. Tref: 98087.3 Hz.
 - Compensation range:** Initial freq.: 5000 Hz, Final freq.: 40000 Hz, Top: 40 °C.
 - Buttons: Compensate, Exit, Close figures.
- Calculation of index:**
 - Freq. range to calculate:** Initial freq.: 10000 Hz, Freq. Final: 30000 Hz.
 - Temperatures:** Tref: 20 °C, Top: 40 °C.
 - Buttons: Calculate, Close figures.
 - CCDM and RMSD results:**
 - BLref vs BLOp
 - BLcomp vs BLOp
 - BLref vs Dano 10cm
 - BLcomp vs Dano 10cm

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na interface é possível escolher uma das estruturas, cujas medições de impedância, que serão utilizadas como *baseline* de referência, são registradas e armazenadas. Para a estrutura selecionada deve-se indicar pelo menos as temperaturas T_1 e T_2 , em seguida, indicar as frequências de dois picos registrados para essas temperaturas, de preferência um pico escolhido para baixa frequência e outro pico para alta frequência. Caso exista a possibilidade de registrar outros *baselines* para diferentes temperaturas, seria útil para aprimorar a precisão no processo de compensação, então, dados adicionais podem ser indicados para T_{ref} , considerando que o T_{ref} escolhido deve ser mais próximo da temperatura de operação (T_{op}). A seguir devem ser indicadas as frequências que limitam a faixa de compensação e obtida, a partir de um sensor, a temperatura de operação. Pressionando o botão “*compensate*” será executado a compensação e, após finalizar, serão apresentados gráficos com os resultados da compensação.

Por outro lado, a interface também permite calcular os índices de RMSD e CCDM, para isso indicam-se as frequências que limitam a faixa de compensação e as temperaturas de referência e operação. Pressionando o botão *Calculate* será realizado o cálculo dos índices.

5.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados do método de compensação aplicado a duas estruturas tubulares, apresentadas na seção 4.1. O método proposto foi testado utilizando as assinaturas de impedância elétrica obtidas experimentalmente e por meio do simulador, sob o efeito da variação de temperatura. A detecção dos danos foi realizada através de métricas baseadas nos índices CCDM e RMSD.

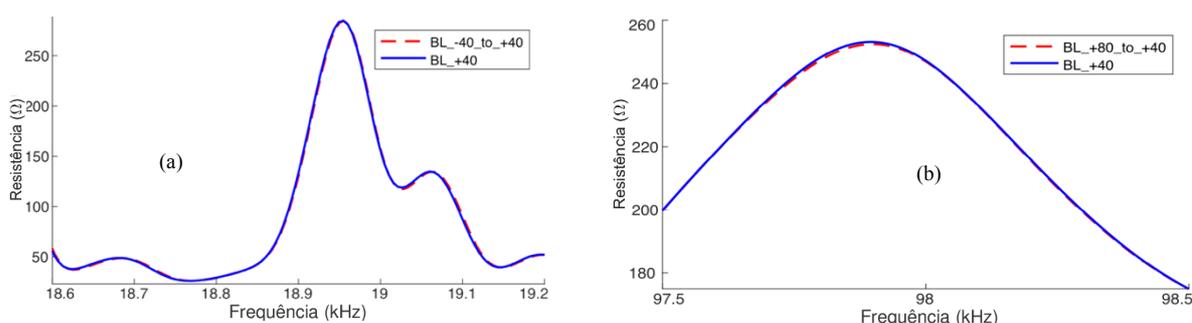
Para os resultados obtidos por meio do simulador, os dois algoritmos foram testados, individualmente e em conjunto, compensando os efeitos da temperatura conforme apresentados nas seções 5.3.1 e 5.3.3. Os resultados das compensações são apresentados nas seções 5.7.1 e 5.7.2.

O método completo foi aplicado também aos resultados experimentais obtidos para os tubos tubo-1, tubo-2 e placa-1, cujo os resultados das compensações são apresentados nas seções 5.7.3 e 5.7.4.

5.6.1 Compensação horizontal

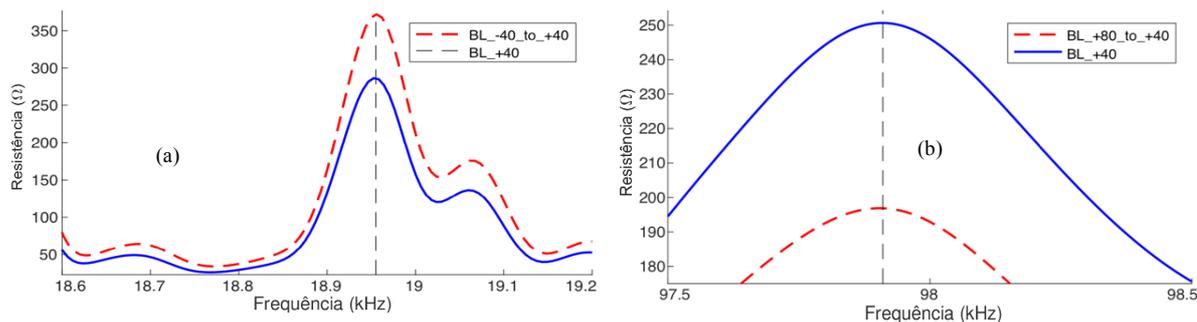
Apresentam-se a seguir os resultados obtidos após compensar o deslocamento de frequência da parte real da impedância, a partir de *baselines* coletadas por meio do simulador. Para uma melhor visualização, os resultados são apresentados apenas para faixas estreitas de frequência, sendo de um lado para baixa frequência e de outro lado para alta frequência. Na Figura 46 são apresentados resultados obtidos para o caso-1 e na Figura 47 são apresentados resultados obtidos para o caso-3.

Figura 46 – Compensação horizontal – Caso-1: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 47 - Compensação horizontal – Caso-3: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

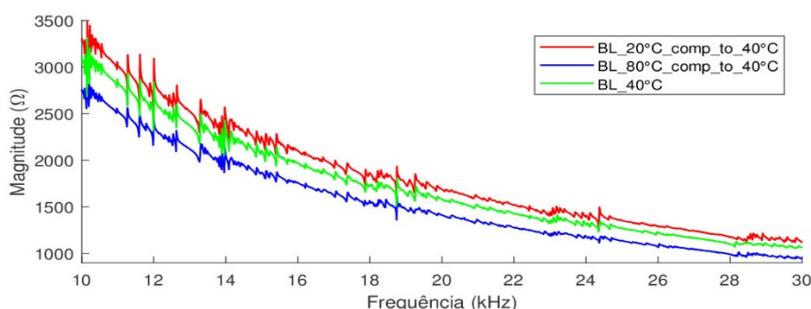
Para as compensações exibidas nas Figuras 46 e 47, as *baselines* de referência (BL_{T1} e BL_{T2}) foram obtidas a -40°C e $+80^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Nas Figuras 46(a) e 47(a), a *baseline* obtida a -40°C foi compensada horizontalmente para $+40^{\circ}\text{C}$ (linha vermelha). Já nas Figuras 46(b) e 47(b), a *baseline* obtida a $+80^{\circ}\text{C}$ foi compensada para $+40^{\circ}\text{C}$ (linha vermelha). Nota-se em todos os casos que, as assinaturas

compensadas praticamente coincidem com a *baseline* obtida a +40°C (linha azul), o que indica que o método de compensação horizontal funciona.

Dessa forma para conferir o método de compensação horizontal, também com resultados experimentais obtidos para tubo-1, na Figura 48 são apresentadas as *baselines* da magnitude obtidas a 20°C (BL_{T1}) e 80°C (BL_{T2}) compensadas horizontalmente para +40°C. Ambas assinaturas compensadas se encontram alinhadas em frequência com a *baseline* obtida a +40°C. Esse passo importante permite criar a assinatura compensada em amplitude para a temperatura de operação ($T_{op} = +40^\circ\text{C}$). Assim, após o alinhamento (BL_{T1}) e (BL_{T2}), é aplicada a Equação 20 criando novos elementos da assinatura compensada a partir das *baselines* de 20°C (BL_{T1}) e 80°C (BL_{T2}). É fácil verificar que os picos das impedâncias compensadas estão alinhados com os picos da impedância da *baseline* obtida a +40°C (linha verde).

Figura 48 – Compensação horizontal para tubo-1.



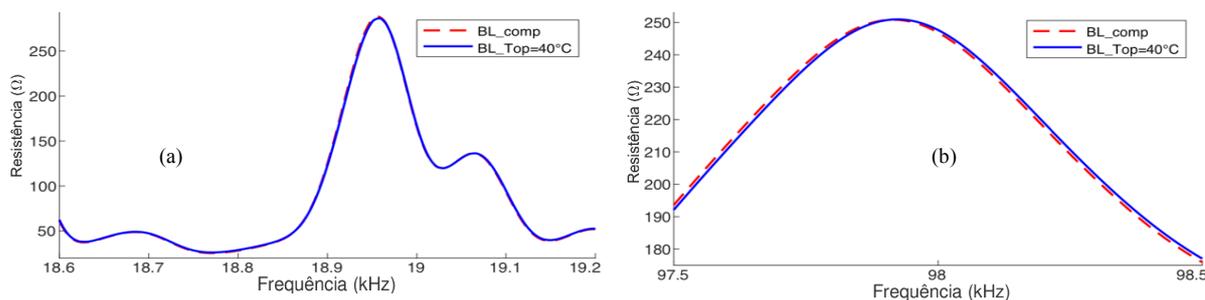
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.6.2 Compensação completa: horizontal e vertical

Na Figura 49 apresenta-se, apenas para duas faixas estreitas de frequência, os resultados compensados obtidos com a parte real da impedância, a partir de *baselines* coletadas por meio do simulador no caso-3. Enquanto que, na Figura 50 são mostrados os resultados para a faixa completa, de 5 kHz a 120 kHz, indicando que o método funciona para amplas faixas de frequência.

Na Figura 49, as *baselines* (BL_{T1}) e (BL_{T2}) foram obtidas a +20°C e +80°C, respectivamente, a assinatura foi compensada para $T_{op} = +40^\circ\text{C}$ a partir da *baseline* obtida a +20°C (BL_{T1}). Para conferir a eficácia da compensação, também são apresentadas as *baselines* coletadas para a mesma T_{op} (linha azul).

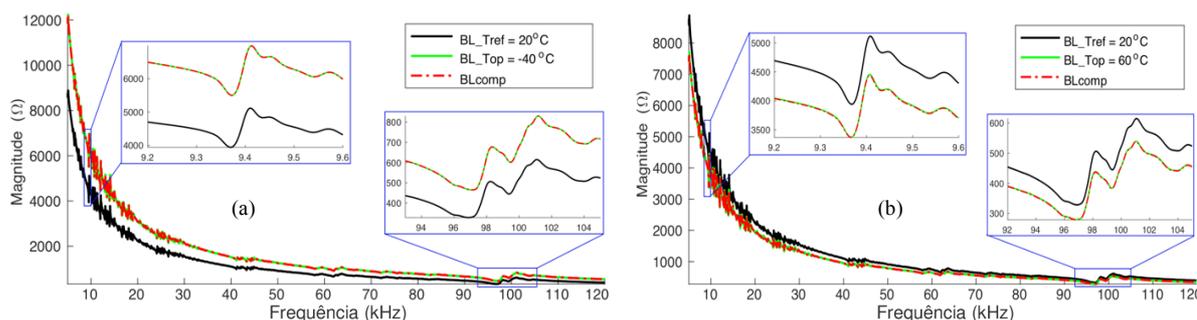
Figura 49 – Compensação completa de +80°C para 40°C – Caso-3: (a) em baixa frequência e (b) em alta frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 50(a), tem-se a assinatura compensada para Top = -40°C, a partir de uma *baseline* obtida a 20°C, e na Figura 50(b) tem-se a assinatura compensada para Top = 60°C a partir da *baseline* obtida a 20°C. Assim, a fim de validar qualitativamente o desempenho do método proposto, mais uma vez verifica-se que, quando comparadas com as *baselines* obtidas para a mesma Top (linha verde), ambas as assinaturas são extremamente semelhantes.

Figura 50 – Compensação completa – Caso-3: (a) de 20°C para -40°C e (b) de 20°C para 60°C.



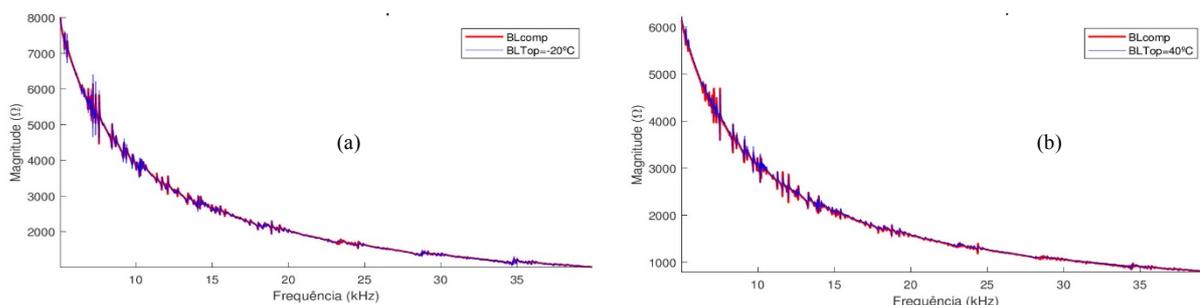
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.6.3 Compensação horizontal e vertical para diferentes estruturas

Nas Figuras 51 a 53, tem-se os resultados experimentais, após a compensação completa, para o tubo-1, tubo-2 e placa-1.

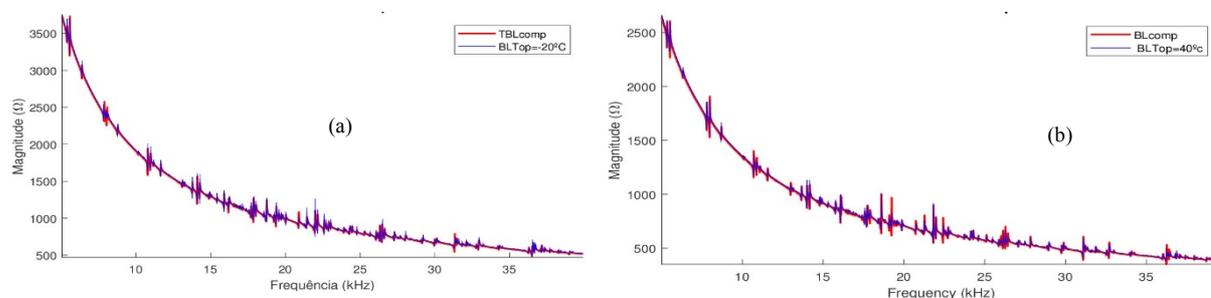
A faixa de frequência de 10 kHz a 30 kHz foi escolhida porque apresenta os maiores picos de ressonância, facilitando a avaliação. Para as compensações exibidas nas Figuras 51 e 52, as *baselines* de referências (BL_{T1} e BL_{T2}) foram obtidas a -40 ° C e + 80 ° C, respectivamente. Nas Figuras 51(a) e 52(a) mostra-se as assinaturas compensadas para $T_{op} = -20^{\circ}\text{C}$ a partir da *baseline* obtida a -40°C (BL_{T1}). Por outro lado, nas Figuras 51(b) e 52(b) apresenta as assinaturas compensadas para $T_{op} = +40^{\circ}\text{C}$ a partir da *baseline* obtida a +80°C (BL_{T2}).

Figura 51 – Compensação completa para tubo-1: (a) de -40°C para -20°C e (b) de $+80^{\circ}\text{C}$ para 40°C .



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

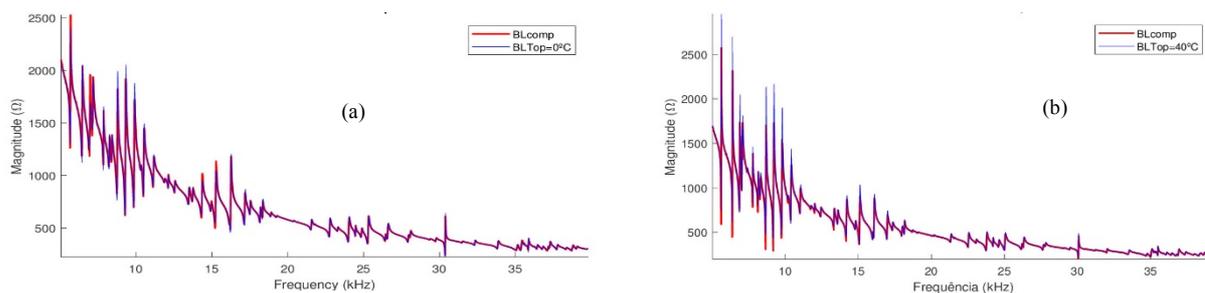
Figura 52 – Compensação completa para tubo-2: (a) de -40°C para -20°C e (b) de $+80^{\circ}\text{C}$ para 40°C .



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 53(a) têm-se as assinaturas compensadas para $T_{op} = 0^{\circ}\text{C}$ a partir da *baseline* obtida a -20°C (BL_{T1}). Já na Figura 53(b) têm-se as assinaturas compensadas para $T_{op} = +40^{\circ}\text{C}$ a partir da *baseline* obtida a $+70^{\circ}\text{C}$ (BL_{T2}).

Figura 53 – Compensação completa para placa-1: (a) de -20°C para 0°C e (b) de $+70^{\circ}\text{C}$ para 40°C .



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Pelos resultados obtidos comprova-se a eficácia do método de compensação quando aplicado a estruturas planas e tubulares reais, sendo que as assinaturas compensadas são muito próximas às *baselines* obtidas nas mesmas temperaturas de operação. Nota-se que nas assinaturas existem picos onde as diferenças são notórias. Isto pode ser explicado pelo fato de existirem efeitos secundários nas medições experimentais (instrumentos, materiais e acessórios), sendo que nos resultados apresentados na Figura 50 não aparecem essas diferenças.

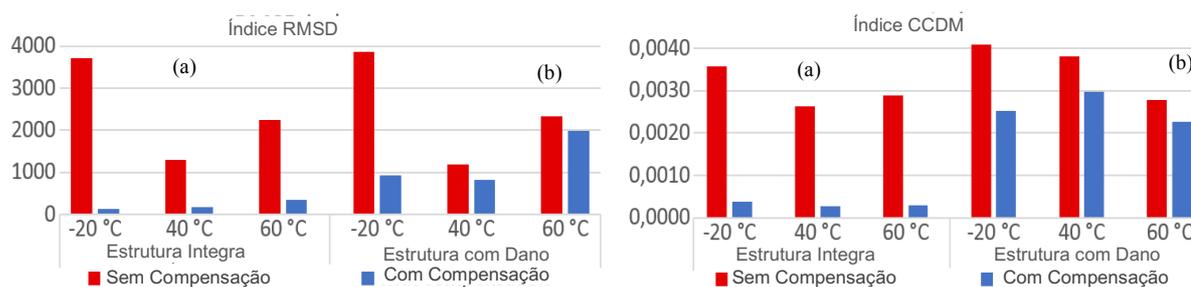
5.6.4 Detecção de dano sob o efeito da variação de temperatura

Monitorar uma estrutura a fim de detectar dano utilizando a técnica da EMI, sem aplicar qualquer método de compensação do efeito da temperatura, é geralmente feito por meio dos índices CCDM e RMSD calculados comparando as assinaturas de monitoramento e *baseline*. A assinatura de monitoramento é obtida à temperatura de operação (T_{op}), enquanto a *baseline* é tipicamente registrada à temperatura ambiente com a estrutura íntegra. No entanto, para evitar os falsos positivos, no SHM em aplicações reais, é necessário compensar a *baseline* para a T_{op} , antes de calcular os índices. Assim, nesta seção são apresentados alguns resultados de detecção de dano sob o efeito da variação da temperatura.

Em um primeiro momento, o monitoramento é realizado na estrutura tubo-1 saudável, apenas sob o efeito da variação de temperatura. Depois, o monitoramento é realizado após colar uma massa na estrutura (dano-2 indicado na Tabela 4, seção 4.2), também sob o efeito da variação de temperatura. Todo monitoramento é realizado à temperatura de operação (T_{op}). Para a compensação, a partir da assinatura *baseline* de referência (BL_{ref}) deve ser gerada a assinatura compensada (BL_{comp}) para a temperatura T_{op} . Neste caso, BL_{ref} foi coletada à temperatura $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$, que está próxima da temperatura ambiente, podendo ser qualquer outra temperatura. No entanto, para melhorar a eficácia do método, é recomendável utilizar uma *baseline* registrada a uma temperatura mais próxima de T_{op} .

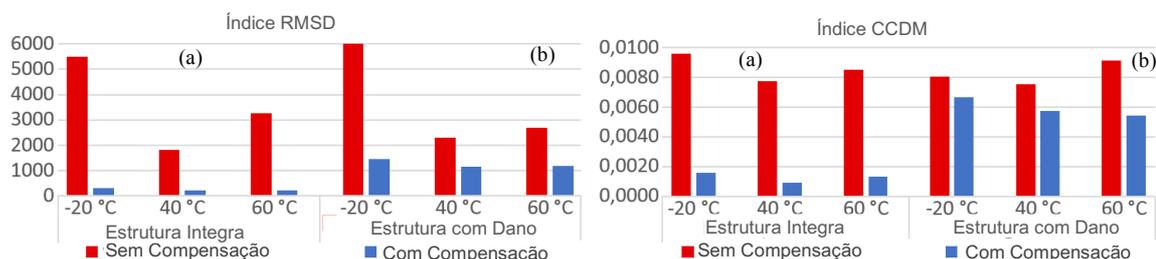
Então, para avaliar a condição estrutural de tubo-1 e tubo-2, os índices CCDM e RMSD são calculados comparando BL_{comp} com a assinatura de monitoramento. Os índices apresentados nas Figuras 54 e 55 foram calculados para a faixa de frequência de 10 kHz a 30 kHz e para diferentes temperaturas de operação: -20°C , 40°C e 60°C . Na parte (a) são apresentados os índices para a estrutura saudável, apenas sob o efeito da temperatura na (b), têm-se os índices para a estrutura danificada e sob o efeito da variação da temperatura. As barras em vermelho indicam os índices calculados sem compensação e as barras em azul indicam os índices calculados após compensar o efeito da variação da temperatura.

Figura 54 – Índices de dano para avaliar a condição estrutural de tubo-1: (a) sem dano e (b) com dano.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 55 – Índices de dano para avaliar a condição estrutural de tubo-2: (a) sem dano e (b) com dano.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os resultados em vermelho apresentados nas Figuras 54 e 55 mostram que, sem aplicar o método de compensação, os valores dos índices calculados para a estrutura saudável são comparáveis aos obtidos para a estrutura danificada, o que inviabilizaria qualquer detecção de dano em um sistema de SHM. No entanto, os resultados são diferentes quando o monitoramento é realizado aplicando o método de compensação. Nesse caso, os valores dos índices, para a estrutura saudável, são consideravelmente menores do que para a estrutura danificada. Isso prova o desempenho do método proposto, sendo possível definir um limiar para identificar a diferença quando uma estrutura se encontra danificada ou apenas existe uma variação de temperatura. Ainda é importante destacar que os índices CCDM mostram-se mais sensíveis aos danos, como esperado.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se duas contribuições importantes relacionadas aos sistemas de SHM, baseados na EMI, com aplicação a tubos de aço e placa de alumínio. Inicialmente, desenvolveu-se um modelo numérico usando o software PZFlex® e demonstrou-se que os resultados obtidos numericamente e as medições experimentais eram fortemente correlacionadas. Então, utilizando o simulador foram investigadas e caracterizadas as alterações nas assinaturas de EMI em função da variação de temperatura.

Primeiro, caracterizou-se o comportamento da EMI sob o efeito da temperatura em três diferentes situações, mudando os valores dos parâmetros do PZT e/ou do tubo, em função da temperatura, através de modelagem usando elementos finitos. Segundo, propôs-se um novo método para compensar o efeito da variação de temperatura.

Foi verificado que mudando apenas os parâmetros do tubo de aço e da placa de alumínio em função da temperatura, existe um deslocamento em frequência da impedância para a esquerda à medida em que a temperatura aumenta e praticamente não existe variação na magnitude. No entanto, mudando os parâmetros do PZT, verificou-se que existem alterações nas amplitudes das assinaturas da EMI e também no deslocamento em frequência. Por fim, mudando os parâmetros do conjunto, tubo/PZT, os efeitos se somam.

Numa etapa seguinte, desenvolveu-se um novo método para compensar o efeito da temperatura em SHM, com aplicações planas e tubulares, usando-se dois algoritmos computacionais. O primeiro algoritmo foi usado para compensar os deslocamentos de frequência, que variam linearmente em relação à frequência e à temperatura. O segundo algoritmo foi usado para compensar o deslocamento de amplitude, que varia linearmente com a temperatura. Os dois algoritmos podem facilmente ser implementados por qualquer sistema de SHM, seja embarcado ou não. O método foi testado com sucesso, monitorando o estado estrutural de dois tubos de aço e uma placa de alumínio, com dano e sem dano, para temperaturas que variam na faixa de -40°C a 80°C e para a faixa de frequência de 5 kHz a 120 kHz.

Por fim, para validar o método proposto por meio do SHM, foram realizados experimentos com tubos de aço e placa de alumínio reais, simulando danos e com variações de temperatura. Através de métricas baseadas nos índices CCDDM e RMSD, mostrou-se que o modelo de compensação proposto compensa variações de temperatura em uma ampla faixa de frequência e de temperatura.

Concluindo, tem-se neste trabalho um estudo completo de variação de temperatura em sistemas SHM baseados na EMI e modelos originais e eficientes para compensar estas variações

em aplicações práticas. Apesar de os testes terem sido realizados em somente duas estruturas, designadamente, a plana e a cilíndrica, é possível afirmar que o método proposto pode ser usado em qualquer sistema SHM baseado na EMI, independentemente do tipo de estrutura.

Para trabalhos futuros, com esta pesquisa tem-se os subsídios necessários para propor outros modelos, utilizando análise numérica, para avaliar o efeito da temperatura, danos destrutivos e não destrutivos através das assinaturas de impedância elétrica. Investigar comportamento com mais de um atuador/sensores de PZT analisando o comportamento das assinaturas à medida que mudamos a distância do dano em relação ao PZT.

REFERÊNCIAS

- ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos primeiros passos**. 2. ed. Campinas: Editora Unicamp, 2003. 304 p.
- BANKS, H. T.; SMITH, R. C.; WANG, Y. **Smart materials structures: modeling estimation and control**. Paris: John Wiley & Sons, 1996.
- BAPTISTA, F. G. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica**. 2010. 90 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2010.
- BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D. E.; ALMEIDA, V. A. D.; ULSON, J. A. C. An Experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. **Sensors**, Basel, v. 14, n. 1 p. 1208–1227, 2014.
- BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. A new impedance measurement system for PZT-based structural health monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 58, n. 10, p. 3602-3608, 2009.
- BHALLA, S.; NAIDU, A.; SOH, C. K. A influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART MATERIALS STRUCTURES AND SYSTEMS, 4., 2003, Bangalore. **Conference....** Bangalore: , 2003. p. 263–269.. doi:10.1117/12.514762.
- BUTLER, J. L.; SHERMAN, C. H. **Transducers and arrays for underwater sound**. Massachusetts: Springer, 2016. p. 637-676.
- CHAN, K. **Pzflex beginner’s guide**. [S.l.]: Weidlinger Associates, 2011. 763 p.
- CORTEZ, N. E. **Desenvolvimento de um sistema de SHM sem fio e com compensação automática de temperatura**. 2015. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2015.
- CORTEZ, N. E. **Desenvolvimento e implementação de um sistema para detecção de falhas em estruturas usando microcontrolador**. 2012. 90 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2012.
- DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. [S.l.]: Cengage Learning, 2006. p. 432—433.
- DJEMANA, M.; HRAIRI, M. 2016 Modelling and simulation of impedance-based damage monitoring of structures. **International Journal of Simulation Modelling**, Malaysia, v. 15, n. 3, p. 395-408.
- FARRAR, C.; WORDEN, K. **Structural health monitoring: a machine learning perspective**. Vienna: Wiley, 2012.
- GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, London, v. 22, n. 10, p. 804-816, 1989. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0022-3735/22/10/001>. Acesso em: 11 dez. 2010.

GIURGIUTIU, V; ROGERS, C. A . Electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and nondestructive evaluation. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING- IWSHM, 1997, Stanford. **Proceedings...** Stanford: California, 1997. p. 433–444.

HANSELKA, H.; NUFFER, J. **Intelligent materials: technology guide**. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 48-51. DOI. 10.1007/978-3-540-88546-7_10

HAVRÁNEK, Z.; BENEŠ, P.; FIALKA, J.; KLUSÁČEK, S. Numerical and experimental determination of impedance characteristics of PZT elements for acoustic emission sensors. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION - ICSV, 22., 2015, Florence. **Congress...** Florence: [s.n.], 2015. p. 1-8.

HINKLE, D. E.; WIERSMA, W.; JURIS, S. G. **Applied statistics for the behavioral sciences**. 5. ed. Boston: Houghton Mifflin., 2003.

HOOKER, M. W. **Properties of PZT-based piezoelectric ceramics between -150 and 250°C**. Hampton: Langley Research Center, 1998. 25 p. Technical Report NASA/CR-1998-208708 NASA.

JAFFE, B. **Piezoelectric ceramics**. London: Academic Press, 1971. 302 p.

KABEYA, K. **Structural health monitoring using multiple piezoelectric sensors and actuators**. 1998. 83 f. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) - Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, 1998.

KOO, K. Y.; PARK, S.; LEE, J. J.; YUN, C. B. Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects. **J. Intell. Matls. Sys. & Struct**, Michigan, v. 20, n. 4, p. 367-377, 2009.

KRISHNAMURTHY, K.; LALANDE, F.; ROGERS, C. A. Effects of temperature on the electrical impedance of piezoelectric sensors. In: SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 1996, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 1996. v. 2717, p. 302 - 310.

LIANG, C.; SUN, F.; ROGERS, C. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Thousand Oaks, v. 5, n. 1, p. 12-20, 1994.

LIFSHITZ, J. M.; ROTEM, A. Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique. **Journal of Composite Materials**, California, v. 3, n. 3, p. 412–423, 1969.

LIM, Y. Y.; SOH, C. K. **Fatigue damage diagnosis and prognosis using EMI technique Structural Health Monitoring (SHM) in aerospace structures**. Philadelphia: Elsevier Woodhead Publishing, 2016. 514p. ISBN: 9780081001486.

LOTTI, R. S. *et al.* Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **R Dental Press Ortodon Ortop Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, 2006.

MEITZLER, A. H; BERLINCOURT, D.; COQUIN, G. A.; WELSH, F. S; TIERSTEN, H. F.; WARNER, A. W. **IEEE standard on piezoelectricity: an american national standard**. New York: IEEE-ANSI, 1987. 66 p. (Std, 176).

MITRA, M.; GOPALAKRISHNAN, S. Guided wave based structural health monitoring: a review. **Smart Materials and Structures**. United Kingdom, v. 25, n. 5, p. 479-495, 2016.

MURATA. **Piezoelectric ceramics (PIEZOTITE®) sensors**. Tokyo: Manufacturing, 2008. Disponível em: <http://application-notes.digchip.com/102/102-44570.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2018.

NASCIMENTO, V. M. **Simulação do campo acústico de transdutores ultrassônicos de alta frequência do tipo array anular com e sem espaçamento entre anéis**. 2013. 238 f. Tese (Doutorado) - Faculdade Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

NOKES, J. P.; CLOUD, G. L. The application of interferometric techniques to the nondestructive inspection of fiber-reinforced materials. **Experimental Mechanics**, Heidelberg, v. 33, n. 4, p. 314-319, 1993.

OLIVEIRA, G. H.; GUIMARÃES, A.; BOTELHO, E. C. Influência da Temperatura no desempenho mecânico de compósitos PEI/fibras de vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 305-312, 2009.

PARK, G.; FARRAR, C. Piezoelectric impedance methods for damage detection and sensor validation. In: BOLLER, C.; CHANG, F.-K.; FUJINO, Y. (Ed.). **Encyclopedia of structural health monitoring**. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. cap. 18, p. 1-14.

PARK, G.; INMAN, D. **Impedance based structural health monitoring: damage prognosis for aerospace, civil and mechanical system**. Rio de Janeiro: Wiley, 2005. cap. 1, p. 1-12. 2005.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance based structural health monitoring for temperature varying applications. **JSME International Journal**, Blacksburg, v. 42, n. 2, p. 249-258, 1999.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C.; INMAN, Daniel. Overview of piezoelectric impedance based health monitoring and path forward. **The Shock and Vibration Digest**, Thousands Oaks, v. 35, n. 6, p. 451-463, 2003.

PEAIRS, D.; PARK, G.; INMAN, A. D. J. Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Michigan, v. 2, n. 15, p. 129-139, 2004.

PIEZO SYSTEMS. **Piezoelectric application data**. Woburn: Piezo Systems, 2011. 64 p. Disponível em: <http://www.piezo.com/catalog8.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2018.

PIOLA, B. V.; WRUBLESKI, J.; NUNES, M. V. V.; SILVA, W. R.; OUBA, A. K. O. Estudo da taxa de condutividade térmica em blocos de motor de alumínio e de ferro fundido por meio de modelagem 3D assistida por computador. In: ENCONTRO DE PESQUISA, 4.; ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA FATEB, 8., 2017, Paraná. **Simpósio...** Paraná: FATEB, 2017.

PITA, J. L.; TURRA, A. E.; VIEIRA FILHO, J. Detecção de dano em tubulações usando a técnica baseada na Impedância Eletromecânica (EMI). In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE- SBAI, 11., 2013, Fortaleza. **Simpósio...** Fortaleza: [s.n.], 2013.

RABELO, D. S. **Monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da Impedância eletromecânica incorporando compensação do efeito da variação da temperatura**. 2014. 103 f. Dissertação (mestrado)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia., Minas Gerais, 2014.

SABAT, R. G.; MUKHERJEE, B. K. Temperature dependence of the complete material coefficients matrix of soft and hard doped piezoelectric lead zirconate titanate ceramics. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 101, n. 6 p. 064111, 2007.

SEPEHRY, N.; SHAMSHIRSAZ, M.; ABDOLLAHI, F. Temperature variation effect compensation in impedance-based structural health monitoring using neural networks. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Thousand Oaks, v. 22, n. 17, p. 1975-1982. set. 2011.

SEPEHRY, N.; SHAMSHIRSAZ, M.; BASTANI, A. Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature. **Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 6, p. 573-585, 2010.

SHERIT, S.; YANG, G.; WIEDERICK, H. D.; MUKHERJEE, B. K. Temperature dependence of the dielectric, elastic and piezoelectric material constants of lead zirconate titanate ceramics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART MATERIALS, STRUCTURES AND SYSTEMS, 9., 1999, Bangalore. **Proceedings...** New Delhi: Allied Publishers, 1999. p. 121-126.

SOHN, H.; FARRAR, C.; HEMEZ, F.; SHUNK, D.; STINEMATES, D.; NADLER, B.; CZARNECKI, J. **A review of structural health monitoring literature**. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory Report, 2004. 7 p.

SONG, G.; GU, H.; MO, Y. L. Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures: a tutorial and a review. **Smart Materials and Structures**. United Kingdom, v. 17, n. 3, não pag., 2008.

SORIANO, H. L. **Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2009. v. 1, 411 p.

STEIN, S. C. Power consumption of piezoelectric actuators driving a simply supported beam considering fluid coupling. **The Journal of the Acoustic Society of America**, v. 96, n., 1994, p. 1598-1604.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z. A.; ROGERS, C. A.; MAJMUNDAR, M.; LIANG, C. Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 95., 1995, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 1995. v. 2443, p. 236 - 247.

THE ENGINEERING TOOLBOX. **Young's modulus of elasticity for metals and alloys**. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html. Acesso em: 3 dez 2018.

WEIDLINGER ASSOCIATES. **Manual do usuário v. 2.2**. Mountain View: Weidlinger Associates, 2009. 204 p.

YI, T. H.; HUANG, H. B.; LI, H. N. Development of sensor validation methodologies for structural health monitoring: a comprehensive review. **Measurement**, Italy, v. 109, n. 22, p. 200–214, 2017.

ZHANG, Q. M.; ZHAO, J. Electromechanical properties of lead zirconate titanate piezoceramics under the influence of mechanical stresses. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, New York, v. 46, n. 6, p. 1518-1526, 1999.