

LEONARDO DE FREITAS LEUCAS

**UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE IMPEDÂNCIA
ELETROMECÂNICA E ONDAS DE LAMB PARA
IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS COM
REBITES**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2009

LEONARDO DE FREITAS LEUCAS

**UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA
E ONDAS DE LAMB PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM
ESTRUTURAS COM REBITES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Valder Steffen Jr.

UBERLÂNDIA –MG

2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L652u Leucas, Leonardo de Freitas, 1983-
Utilização das técnicas de impedância eletromecânica e ondas de Lamb
para identificação de dano em estruturas com rebites / Leonardo de Freitas
Leucas. - 2009.
58 f. : il.

Orientador: Valder Steffen Jr.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Localização de falhas (Engenharia) -
Teses. I. Steffen Junior, Valder. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 624.014

*Dedico este trabalho a Maurício (in memmorian),
meu amado pai que sempre me incentivou e deu suporte aos meus estudos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre se mostrar presente em minha vida.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao meu orientador, Valder Steffen Jr., pelo exemplo de pesquisador e por todo o auxílio neste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro na realização desta pesquisa.

Agradeço ao apoio do *INCT de Estruturas Inteligentes*, apoiado pela FAPEMIG e pelo CNPq, que forneceu o contexto científico dentro do qual este trabalho foi realizado.

A minha família, Patrícia e Ivone, que me deram todo o suporte necessário para que eu pudesse me manter nos estudos.

À Karina Mayumi Tsuruta, Lizeth Vargas e ao José dos Reis Vieira de Moura Jr. pela ajuda e contribuições neste trabalho.

Aos colegas do Laboratório LMest pela amizade.

À Thaís que, neste pouco tempo de convivência, me fez sempre sentir querido.

Leucas, L. F. **Utilização das Técnicas de Impedância Eletromecânica e Ondas de Lamb para Identificação de Dano em Estruturas com Rebites**. 2009. 68 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo o estudo do desempenho de duas técnicas já conhecidas de monitoramento de integridade estrutural (SHM – *Structural Health Monitoring*) aplicadas à detecção de danos em estruturas metálicas rebitadas, como vigas e painéis aeronáuticos. Ambas as técnicas se servem de materiais piezelétricos para a excitação mecânica (efeito atuador) e coleta de sinais (efeito sensor) na estrutura. Na técnica de impedância eletromecânica, a impedância elétrica do elemento piezelétrico é associada diretamente à impedância mecânica da estrutura analisada. Desta forma, ao se verificar a variação deste parâmetro, consegue-se verificar a presença do dano pela comparação das assinaturas dos sinais de impedância para os casos com e sem dano. Métricas especialmente desenvolvidas são capazes de quantificar estas duas situações. Já na abordagem por ondas de Lamb, são observados os fenômenos de propagação de ondas mecânicas (como reflexão e atenuação) em meios sólidos. Ao se verificar uma mudança nos padrões correspondentes, consegue-se identificar a presença de dano na estrutura por meio da metodologia avaliativa conhecida como *DI (Damage Index)*. Primeiramente foi estudada uma estrutura simples – uma viga de alumínio com um único rebite – buscando validar ambas as técnicas para identificação do dano caracterizado pela retirada (perda) deste rebite. Foi estudada também, numa etapa posterior, a perda sistemática de rebites em um painel aeronáutico de alumínio. Esta configuração apresenta características bem mais complexas do ponto de vista estrutural do que a primeira estrutura estudada. Foram aplicadas técnicas de análise baseadas em testes de hipóteses estatísticas nos resultados obtidos, buscando verificar a presença de dano, porém dentro de certa margem de confiança. Além disso, foi apresentada uma abordagem alternativa para classificação de padrões baseada em redes neurais artificiais aplicadas na detecção dos diferentes estágios de dano do painel aeronáutico. Ambas as metodologias estudadas se mostraram eficazes na identificação de danos associados à perda de rebites.

Palavras chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Ondas de Lamb, Estruturas Rebitadas.

Leucas, L. F. **On The Use of the Electromechanical Impedance and Lamb Waves techniques for Damage Detection on Riveted Structures**. 2009. 68 p. MSc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The present work is devoted to studying the performance of two well-known structural health monitoring (*SHM*) techniques to detect damage in typical metallic riveted structures, such as beams and panels found in various types of industry. Both techniques use piezoelectric materials for mechanical excitation (actuator effect) and dynamic response analysis (sensor effect) of the structure. The first approach used is known as electromechanical impedance technique, in which the electrical impedance of the piezoelectric patch is directly associated with the mechanical impedance of the structure. By this way, the detection of damage can be made by observing the variation of this parameter and comparing the signals' patterns (signatures) of the healthy and damaged states of the structure. There are several damage metrics aiming at quantifying the damage for SHM analysis. Another approach uses the so-called Lamb waves, which propagate along solid materials. Information is collected from the structure under healthy conditions by using wave propagation phenomena (such reflection and attenuation) along the structure. The evolution of the damage can be observed by using a specially defined Damage Metrics that is able to quantify damage in this case – the Damage Index (D.I.). The first studied structure was an aluminium beam containing a single rivet, which was used to test both techniques for damage (rivet loss) identification purposes. After this first validation procedure, the identification of a systematic loss of rivets on an aeronautic aluminium panel containing various rivets was studied. This configuration presents a more complex structure as compared with the aluminium beam, from the structural view point. Statistical techniques based on hypothesis tests were applied, aiming at identifying damage with a certain confidence interval. Finally, this work presents an alternative approach using artificial neural networks applied to pattern recognition associated to different damage states of the structure. All techniques presented in this dissertation showed to be useful for damage detection, as far as rivet losses are concerned.

Keywords: Structural Health Monitoring, Electromechanical Impedance, Lamb Waves, Riveted Structures.

LISTA DE SÍMBOLOS

α	: Nível de significância dos testes;
δ	: Fator de perda dielétrica do PZT;
ε	: Tensor dielétrico do material;
$\bar{\varepsilon}_{33}^T$	: Constante dielétrica com deformação nula;
σ	: Tensão mecânica;
$\psi(t)$	: Função <i>wavelet</i> mãe;
σ	: Desvio padrão amostral;
μ	: Média amostral;
a	: Constante geométrica do PZT;
a_0	: Fator de escala da TWC;
C_m	: Flexibilidade Mecânica;
D	: Deslocamento da pastilha piezoeétrica;
d	: Tensor de tensão piezoeétrica;
DI	: Métrica para dano (<i>Damage Index</i>);
d_{ij}	: Módulo piezoeétrico na direção $i j$;
d_{3x}	: Constante de acoplamento do PZT em uma direção x com deformação nula;
E	: Campo Elétrico na pastilha piezoeétrica;
F	: Força aplicada;
f	: Frequência ;
H_0	: Hipótese estatística forte;
H_1	: Hipótese estatística fraca;
I	: Corrente elétrica;
IQR	: Intervalo Inter-quartil;
K	: Rigidez Mecânica;
L	: Indutância;
M_m	: Massa Mecânica;
n	: Número total de pontos frequenciais amostrados;
PZT	: Abreviação para pastilha piezoeétrica;
R1	: Condição da estrutura sem o rebite 1;
R2	: Condição da estrutura sem os rebite 1 e 2;

R_3 : Condição da estrutura sem os rebites 1, 2 e 3;

$\text{Re}(\)$: Parte real da impedância;

R_m : Amortecimento Mecânico;

RMSD: Métrica para dano (*Root Mean Square Deviation*);

s : Complacência mecânica;

V : Tensão elétrica alternada;

v : Velocidade;

$x(t)$: Sinal temporal;

X_L : Reatância Indutiva;

X_C : Reatância Capacitiva;

Y : Admitância elétrica;

$\hat{Y}_{xx}^E$: Módulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo;

Z : Impedância elétrica;

Z_a : Impedância mecânica do PZT;

Z_m : Impedância mecânica;

Z_s : Impedância mecânica da estrutura;

SUMARIO

CAPÍTULO I-INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos e Metodologia Empregados	6
1.2. Estrutura da Dissertação.....	7
CAPÍTULO II-FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
2.1. Impedância Mecânica	8
2.2. Impedância Elétrica.....	9
2.3. Materiais Piezelétricos	10
2.4. Metodologia de Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM) Baseado em Impedância.....	13
2.5. Transformada Wavelet Contínua	16
2.6. Metodologia de SHM Baseada em Ondas de Lamb	18
2.7. Redes Neurais Artificiais	22
2.8. Estatística Aplicada em SHM	24
2.8.1. Distribuição Normal de Probabilidades	25
2.8.2. Gráfico de caixas ou BOXPLOT.....	26
2.8.3. Testes de Hipóteses Estatísticas	27
CAPÍTULO III – SHM BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA E NAS ONDAS DE LAMB PARA IDENTIFICAÇÃO DE PERDAS DE REBITES	29
3.1. Monitoramento de Uma Estrutura Simples: Viga de Alumínio	29
3.1.1. Parâmetros do Experimento	29
3.1.2. Apresentação e Análise dos Resultados	31
3.2. Estrutura Aeronáutica: Componente de Fuselagem.....	36
3.2.1. Parâmetros do Experimento	36
3.2.2. Resultados Obtidos Pela Técnica de Impedância Eletromecânica	39
3.2.3. Resultados Obtidos Pela Técnica das Ondas de Lamb	41
CAPÍTULO IV – REDES NEURAS APLICADAS AO RECONHECIMENTO DE PADRÕES EM SHM	45
4.1. Construção da Rede Neural	46

4.2. Resultados Obtidos	49
CAPÍTULO IV – CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1. Conclusões	51
5.2. Perspectivas Futuras	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Sistemas mecânicos em geral estão sujeitos a regimes de trabalho que podem levar ao aparecimento de falhas e danos. Estes, por sua vez, comprometem sua operação, além de representar risco à segurança dos indivíduos que lidam diretamente com tais equipamentos. Desta forma, uma das grandes áreas de interesse da engenharia aplicada é a manutenção.

Assim, mesmo antes do conceito atual de manutenção ser construído, ações corretivas a estes sistemas eram executadas buscando garantir seu funcionamento. Conseqüentemente, o conceito de manutenção foi sendo elaborado partindo de primitivos programas de substituição de peças danificadas pelo uso, até atualmente abordar sofisticadas técnicas de predição da vida-útil ou confiabilidade destas peças (MOURA, 2008).

Segundo Farrar; Lieven e Bement (2005), o dano em um sistema estrutural pode ser definido como sendo modificações intencionais ou não intencionais das propriedades físicas e/ou geométricas do sistema, podendo incluir modificações nas condições de contorno e na conectividade, as quais podem comprometer o funcionamento atual ou futuro do sistema. Sua influência pode ser observada imediatamente ou a partir de certo instante posterior à sua ocorrência, e implicitamente a esta definição de dano existe o conceito de que o dano não tem sentido sem a devida comparação entre dois estados diferentes do sistema.

Neste contexto se enquadra o processo de monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring - SHM*), que se apresenta como sendo o processo de detecção de dano para estruturas de engenharia (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005). A premissa básica para a maioria dos métodos de detecção de dano é a de que a presença deste altera os parâmetros de rigidez, massa ou padrões de dissipação de energia no sistema, e que irá

influir na resposta dinâmica observada na estrutura (SOHN *et al*, 2003). Para se alcançar isto, é necessária a observação do sistema ao longo do tempo, buscando extrair características sensíveis ao dano e processá-las através de métodos estatísticos para uma maior confiabilidade nas informações adquiridas.

Tsuruta (2008) ainda subdivide o monitoramento de integridade estrutural em duas sub-etapas:

- Detecção da presença de dano estrutural, entendida como a identificação da ocorrência de um evento discreto ou o início de um evento contínuo associado ao dano;
- Quantificação da magnitude do dano visando avaliar a intensidade da modificação estrutural associada ao dano e possível tomada de decisão com base nestes dados.

Além disso, outro processo interessante é o uso do monitoramento da integridade estrutural em conjunto com modelos preditivos de acumulo de dano, visando se estimar a vida útil de determinada estrutura numa condição de dano (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005). Tal processo é conhecido como prognóstico de dano (*Damage Prognosis*) e pode representar uma ferramenta bastante útil na tomada de decisões por parte dos operadores destes sistemas mecânicos.

Sohn (2005) aborda o paradigma de reconhecimento estatístico de padrões aplicado ao monitoramento da integridade estrutural. Para isto, o descreve como sendo um processo de quatro etapas: (1) avaliação operacional; (2) aquisição, fusão e depuração de dados; (3) extração de características e condensação de informações; (4) desenvolvimento de modelos estatísticos. Tais etapas são detalhadas a seguir:

- **Avaliação Operacional**

Define a viabilidade da implementação do monitoramento do dano de vários pontos de vista, como o técnico e o econômico. Para isto, são propostas algumas perguntas a serem respondidas nesta etapa:

- 1) Quais são os motivos (de natureza econômica ou de segurança) que justificam a realização do monitoramento?
- 2) Como é definido o dano para o sistema a ser monitorado?
- 3) Quais são as condições operacionais e ambientais sob as quais o sistema a ser monitorado irá funcionar?
- 4) Quais são as limitações da aquisição de dados durante a operação do sistema?

- **Aquisição, fusão e depuração dos dados**

Envolve a seleção das grandezas a serem mensuradas, bem como as técnicas envolvidas em todo o processo. Assim, nesta etapa, são definidos os tipos de sensores, resolução destes sensores, tempo de aquisição e armazenamento destes dados, etc. Aspectos econômicos são levados em consideração nesta etapa.

A fusão de dados visa integrar as medições realizadas através de vários sensores para aumentar o grau de confiabilidade nas decisões que serão tomadas a partir destas medições. Já a depuração de dados consiste na aceitação ou rejeição de medidas a serem utilizadas no processo de monitoramento de integridade estrutural, pelo fato de uma aquisição errônea poder comprometer todo o processo.

- **Extração das características**

Esta é a área que recebe maior atenção por parte de toda a literatura de SHM por se buscar definir quais características são mais representativas e de que forma estas podem ser extraídas. A eficiência de uma característica extraída é mensurada na forma da sensibilidade ao dano.

Também é realizada a condensação dos dados, visando reduzir as informações e a retirada de dados redundantes para facilitar a tomada de decisão no processo de monitoramento.

- **Desenvolvimento de modelos estatísticos**

Tem a ver com a implementação de algoritmos numéricos que operam sobre as características extraídas na etapa anterior buscando quantificar o dano na estrutura.

Os algoritmos aplicados aqui ainda podem ser divididos em: *i)* problemas de classificação geral por aprendizado supervisionado, quando se possui dados da estrutura saudável e danificada; *ii)* problemas de classificação por aprendizado não-supervisionado, quando tem-se disponível apenas dados referentes à estrutura danificada sendo necessária geralmente a utilização de técnicas apropriadas para inferir a condição da estrutura.

Ao paradigma estatístico de reconhecimento de padrões podem ser aplicadas várias técnicas de monitoramento da ocorrência e propagação de danos estruturais, que podem ser baseadas em diferentes princípios, desde a inspeção visual ao uso de raios-X e ultra-

som (TSURUTA, 2008). Contudo, muitas destas técnicas não são viáveis por serem técnicas onerosas e possuir característica de análise localizada.

Recentemente, uma série de métodos foi desenvolvida com base no uso de materiais ditos inteligentes ou adaptativos aplicados ao monitoramento estrutural (GIURGIUTIU E ZAGRAI, 2000).

Materiais Inteligentes (*Smart Materials*) são definidos como sendo aqueles que conseguem responder a estímulos e mudanças ambientais, sendo capazes de modificar suas propriedades (AKHRAS, 2000) para se adaptarem a requisitos específicos. Como exemplo de materiais inteligentes encontra-se os materiais piezelétricos, ligas de memória de forma e determinadas fibras ópticas.

Assim, existe hoje um conjunto de técnicas que utilizam transdutores piezelétricos para a excitação da estrutura e captura de respostas dinâmicas que vêm sendo utilizadas com sucesso. As características mais significativas destas técnicas podem ser listadas a seguir:

1) Os transdutores piezelétricos são pouco intrusivos, podendo ser confeccionados em diferentes formatos e tamanhos, podendo ainda ser colados nas superfícies ou mesmo inseridos no volume de componentes estruturais. Portanto oferecem uma grande flexibilidade de projeto do sistema de transdução;

2) Possibilitam excitação e medições em amplas faixas de frequência, abrangendo ordens de grandeza de poucos Hz (hertz) até MHz (Megahertz), permitindo a excitação da estrutura em um grande número de modos de vibrar, em particular envolvendo movimentos com pequenos comprimentos de onda. Como a extensão do dano mínimo reconhecido pela técnica está intimamente ligada ao comprimento de onda da excitação da estrutura, esta característica possibilita a identificação de danos de pequena extensão (incipientes);

3) Apresentam relativa insensibilidade a fatores ambientais, tais como temperatura e umidade.

Especialmente no uso de transdutores piezelétricos, duas técnicas têm se destacado por apresentar resultados satisfatórios e terem perspectivas promissoras dentro dessa área (SU; YE e LU, 2006). São elas a técnica baseada em impedância eletromecânica e a baseada em ondas de Lamb. Ambas as técnicas são descritas detalhadamente no Capítulo 2.

Dentre os tipos de sistemas estruturais e materiais aos quais as técnicas de Monitoramento de Integridade Estrutural podem ser aplicadas, encontram-se variados tipos de sistemas estruturais de engenharia que envolvem altos riscos e custos de manutenção,

notadamente: estruturas de construção civil (pontes, edifícios, torres), estruturas aeronáuticas, estruturas *off-shore*, tubulações da indústria petroquímica e veículos de entretenimento (montanhas russas, por exemplo).

De acordo com Farrar; Lieven e Bement (2005) são os aspectos econômicos e os de segurança que impulsionam o desenvolvimento da tecnologia de monitoramento de integridade estrutural. Desta forma, as necessidades da indústria aeronáutica tem sido uma das principais motivadoras da incorporação de dispositivos de *SHM*, devido aos elevados custos de manutenção envolvidos e aos estritos requisitos de segurança que caracterizam este setor.

Falhas em estruturas aeronáuticas podem ter conseqüências catastróficas, levando a grandes prejuízos não só financeiros, mas também a perdas de vidas humanas. Um caso de estudo que vale ser lembrado é o acidente aéreo ocorrido no dia 28 de abril de 1988, com a aeronave da *Aloha Airlines*, Modelo Boeing 737-297. O voo saiu do aeroporto de Halo para o aeroporto Internacional de Honolulu com 86 passageiros e seis tripulantes, quando, em pleno voo, uma parte da fuselagem se separou da estrutura da aeronave provocando uma aterrissagem de emergência (vide Fig.1.1).



Figura 1.1 - Separação da fuselagem do avião da *Aloha Airlines* em 1988, (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005).

A perda de rebites de fixação de componentes estruturais pode levar a conseqüências extremas em dinâmica estrutural. Desta forma, após o incidente ocorrido em 1988 com o voo da *Aloha Airlines*, as entidades regulatórias internacionais procuraram estabelecer uma maior garantia da disponibilidade dos equipamentos e aparelhos dentro de suas respectivas vidas-úteis através da utilização de Inspeções Não-Destrutivas.

1.1 OBJETIVOS E METODOLOGIA EMPREGADOS

Buscando atender as necessidades da indústria aeronáutica, e estando inserido no contexto das técnicas de monitoramento de integridade estrutural baseadas no uso de transdutores piezelétricos, o trabalho de pesquisa reportado nesta Dissertação tem por objetivo geral a avaliação de duas técnicas distintas (Impedância eletromecânica e ondas de Lamb) para a identificação de danos causados por perdas de rebites em estruturas metálicas.

Neste sentido, este trabalho apresenta um estudo de duas diferentes técnicas propostas na literatura, avaliando-as em medições de danos simulados pela perda de rebites, em duas estruturas diferentes: o primeiro caso é o de uma viga esbelta de alumínio contendo um único rebite; o segundo caso trata da perda de vários rebites de uma peça de fuselagem de uma estrutura aeronáutica.

Ainda como objetivo deste trabalho foram utilizadas técnicas estatísticas nos dois casos considerados acima, especialmente os testes de hipóteses estatísticas, para verificar a validade do diagnóstico das estruturas aeronáutica à vista da perda de rebites. Além disso, buscando uma abordagem alternativa às métricas propostas pela literatura, é apresentada uma abordagem de *SHM* utilizando redes neurais na identificação de padrões.

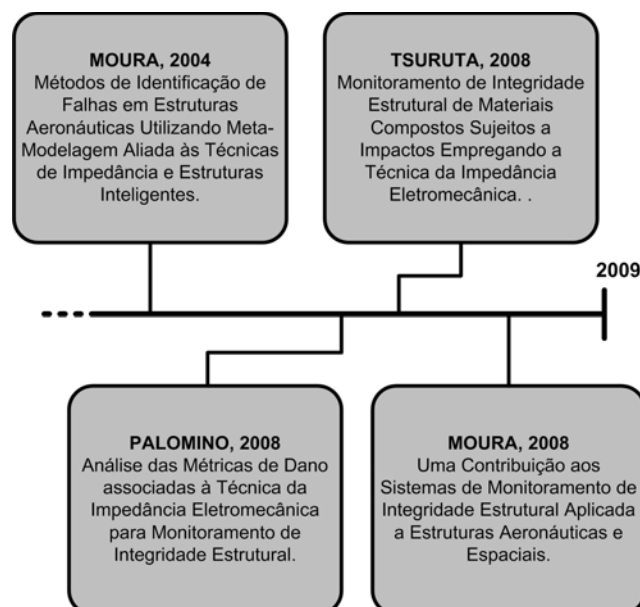


Figura 1.2 – Histórico de trabalhos sobre *SHM* no âmbito da *FEMEC-UFU*.

Todo o trabalho foi realizado no Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis - LMEst, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU (*FEMEC*). Este constitui uma extensão da experiência prévia do grupo de pesquisa do LMEst iniciada

por Moura (2004, 2008) e seguida dos trabalhos feitos por Palomino (2008) e Tsuruta (2008) conforme o histórico mostrado na Figura 1.2.

No trabalho de Moura (2004), enfoca-se a utilização de técnicas estatísticas acoplas ao método da impedância eletromecânica no monitoramento de falhas em estruturas. Já o trabalho de Palomino (2008) aborda principalmente as diferentes métricas que podem ser utilizadas para quantificar as medições de impedância eletromecânica, particularmente em estruturas rebitadas. Moura (2008) apresenta um estudo bastante extenso da utilização de técnicas de SHM, incluindo técnicas de classificação de falhas (*clustering*), sendo mostradas várias aplicações em engenharia aeronáutica e aeroespacial. Além do uso da Impedância eletromecânica, o trabalho relata ainda uma primeira aplicação das ondas de Lamb na identificação de falhas causadas por corrosão metálica, no contexto da Universidade Federal de Uberlândia. O trabalho de Tsuruta (2008) volta-se para materiais compostos, em particular sob influência de impacto, onde técnicas de SHM foram utilizadas para monitorar situações de risco.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema Monitoramento de Integridade Estrutural e é apresentada, de forma geral, a contextualização do trabalho segundo a literatura.

No capítulo 2 são abordados os conceitos fundamentais dos métodos utilizados nesta dissertação. Neste sentido, além de toda a fundamentação teórica, é realizada também uma revisão bibliográfica do estado da arte de ambas as técnicas utilizadas (impedância eletromecânica e ondas de Lamb).

O capítulo 3 apresenta as estruturas utilizadas nos ensaios, bem como os resultados obtidos. Ao longo do capítulo, estudos envolvendo métodos estatísticos verificam a capacidade destas técnicas em detectar falha.

No capítulo 4 é proposta uma abordagem alternativa ao problema de reconhecimento de padrões, aplicando redes neurais artificiais ao invés das métricas de dano utilizadas anteriormente no trabalho.

O capítulo 5 encerra a dissertação, apresentando as principais idéias e conclusões obtidas. São também apresentadas algumas perspectivas futuras para trabalhos posteriores dentro da área de Monitoramento da Integridade Estrutural.

CAPÍTULO II

Fundamentos Teóricos

Ao longo deste capítulo serão abordados os aspectos teóricos necessários à compreensão e ao desenvolvimento do presente trabalho. Assim, o desenvolvimento de cada uma das técnicas utilizadas nos capítulos que seguem é apresentada, bem como os conceitos básicos à compreensão das mesmas.

2.1 IMPEDÂNCIA MECÂNICA

Pode-se definir a impedância mecânica pontual como sendo o quociente entre a força harmônica aplicada num dado ponto e a velocidade desenvolvida por este mesmo ponto. Assim, tem-se a Eq. (2.1) (MASSOUD,1985).

$$Z_m = \frac{F}{v}, \quad (2.1)$$

onde Z_m representa a impedância mecânica, F a força aplicada e v a velocidade.

Fisicamente, esta grandeza representa o quanto uma estrutura resiste ao movimento quando lhe é aplicada uma dada força. Trata-se de uma grandeza complexa, uma vez que tanto a força quanto a velocidade são grandezas vetoriais (com módulo e ângulo de fase).

A impedância mecânica está intimamente relacionada com vários parâmetros do sistema mecânico, sendo a frequência uma importante variável a ser analisada. Outros elementos relacionados com a impedância estão relacionados a seguir (MASSOUD,1985):

- Amortecimento Mecânico (R_m): parâmetro associado à parte real do valor da impedância mecânica, representando o agente que dissipa a energia mecânica entregue ao sistema. Um dispositivo mecânico age como amortecedor mecânico quando obedece a Eq (2.2).

$$F(t) = R_m v(t) . \quad (2.2)$$

Além disso, no Sistema Internacional de Unidades (SI), o amortecimento mecânico é dado por N.s/m.

- Massa Mecânica (M_m): parâmetro associado com a parte imaginária positiva da impedância complexa. Assim, para um dispositivo mecânico ser considerado uma massa mecânica, uma força submetida a este dispositivo resultará numa aceleração diretamente proporcional à força aplicada, Eq. (2.3).

$$F(t) = M_m \frac{dv(t)}{dt} . \quad (2.3)$$

a unidade correspondente, no SI, é o kg.

- Flexibilidade Mecânica (C_m): associado com a parte imaginária negativa da impedância complexa. Um dispositivo mecânico se comporta como uma flexibilidade mecânica quando, ao ser acionado por uma força, se desloca proporcionalmente à força, Eq. (2.4).

$$x(t) = C_m F(t) . \quad (2.4)$$

Por convenção, entretanto, prefere-se não trabalhar com a flexibilidade, usando-se então o seu inverso, denominado como rigidez. Assim, define-se rigidez como sendo o inverso da flexibilidade mecânica, conforme expressa pela Eq. (2.5).

$$K = \frac{1}{C_m} . \quad (2.5)$$

2.2 IMPEDANCIA ELÉTRICA

A impedância elétrica pode ser definida como sendo a oposição que um elemento de circuito elétrico oferece à passagem da corrente elétrica alternada, conforme a Eq. (2.6):

$$Z = \frac{V}{I} , \quad (2.6)$$

sendo Z a impedância elétrica, V a tensão elétrica alternada e I a corrente resultante.

Esta grandeza é de natureza complexa, e, portanto, representa não apenas valores de magnitude, como também valores de fase relativa entre a tensão elétrica e a corrente resultante. A impedância elétrica é expressa em Ohms (Ω).

O valor complexo da impedância elétrica pode ser separado em duas partes distintas: parte real (também chamada de resistência elétrica) e a parte imaginária (conhecida como reatância elétrica).

A resistência elétrica se comporta de maneira similar tanto em circuitos de corrente alternada quanto de corrente contínua, assumindo sempre valores positivos em Ohms. Para um circuito elétrico puramente resistivo, a corrente elétrica aumenta à medida que a resistência presente no circuito diminui, obedecendo assim a conhecida Lei de Ohm (IRWIN,2003).

Já a reatância, que existe somente em circuitos de corrente alternada, pode assumir tanto valores positivos quanto negativos. Por convenção, é chamada reatância indutiva os valores não-negativos encontrados na parte imaginária da impedância elétrica, e reatância capacitiva os valores não-positivos correspondentes (IRWIN,2003).

Assim, as reatâncias indutivas (X_L) e capacitivas (X_C) podem ser expressas em ohms pelas Eq.(2.7) e (2.8), respectivamente:

$$X_L = 2\pi fL , \quad (2.7)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} , \quad (2.8)$$

onde L é a Indutância expressa em Henries , C é a capacitância dada em Farads e f a frequência de excitação em Hertz do circuito de corrente alternada considerado.

Finalmente, quando se obtém valores nulos de reatância, chama-se a impedância de “puramente resistiva”, e o valor inverso da Impedância Elétrica é chamado de Admitância Elétrica, cuja unidade de medida é Siemens.

2.3 MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

A piezeletricidade, uma palavra derivada do radical grego *piezen* que significa pressionar, pode ser definida como a capacidade que alguns materiais têm de relacionar

potenciais elétricos e esforços mecânicos a eles aplicados (ADRIAENS; KONING E BANNING, 2000). Chama-se de efeito piezelétrico direto quando um material desenvolve eletricidade (sob a forma da diferença de potencial elétrico) ao sofrer esforço mecânico, e efeito piezelétrico inverso quando um esforço mecânico é produzido através da imposição de um potencial elétrico no material (TSURUTA, 2008). Estas características fazem com que os materiais piezelétricos possam ser utilizados na construção tanto de sensores (efeito direto) quanto de atuadores mecânicos (efeito inverso). Em muitas aplicações ambos os efeitos se manifestam simultaneamente.

Muitos materiais exibem piezeletricidade, sendo que alguns deles são naturalmente encontrados na natureza como é o caso do Quartzo, do Sal de Rochelle e o Topázio. Ossos humanos e a própria pele também revelam tal característica. Em materiais piezelétricos naturais como o Quartzo, o efeito piezelétrico é considerado pequeno, o que inviabiliza a sua utilização em aplicações de engenharia (ADRIAENS; KONING E BANNING, 2000). Desta forma, existem os materiais piezelétricos artificiais produzidos pelo homem como, por exemplo, as cerâmicas titanato de Bário (BaTiO_3) e titanato-zirconato de chumbo (também conhecido por PZT ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$)), além do polímero conhecido como fluoreto de polivinildileno (PVDF).

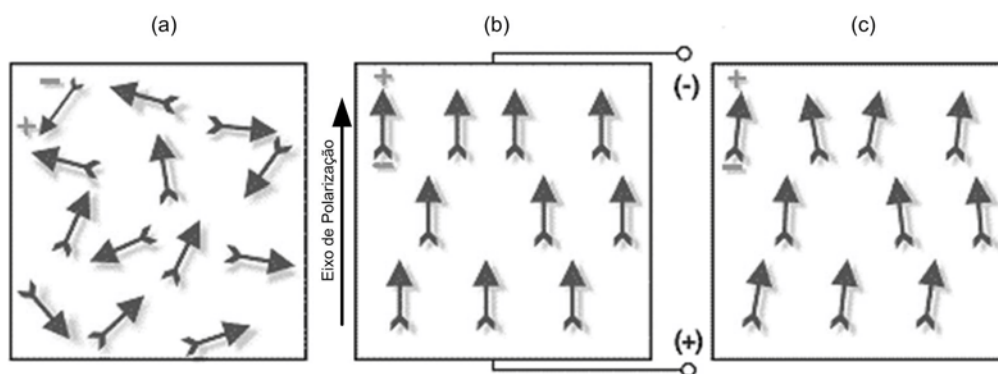


Figura 2.1 – Exemplo do processo de polarização do elemento piezelétrico.

Todos estes materiais essencialmente possuem estruturas despolarizadas ou mal polarizadas (Fig 2.1a), fazendo com que o material se deforme de forma desigual e não-controlada. Assim, para o uso em aplicações de engenharia, faz-se necessária a polarização dos mesmos para se controlar a direção de deformação da estrutura. Para isso, o material é submetido a temperaturas superiores à temperatura de Curie – que é a temperatura na qual o material perde espontaneamente sua polarização inicial e, conseqüentemente, sua propriedade piezelétrica – para então ser submetido a um campo elétrico controlado a fim de

ser polarizado corretamente (Fig. 2.1b), sendo resfriado em seguida e obtendo uma polarização residual do material conforme a Figura 2.1c. Assim, pode ser estabelecida a faixa de temperaturas em que um material piezelétrico pode operar, tendo como seu limite superior a temperatura de Curie. Este valor varia de material para material, sendo que o PZT possui temperatura de Curie em torno de 300°C; já o PVDF exibe uma temperatura de Curie abaixo de 200°C, por exemplo (TSURUTA, 2008).

Desta forma, consegue-se produzir sensores e atuadores funcionais (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Assim, quando o material piezelétrico é usado numa temperatura inferior à temperatura de Curie e lhe é aplicado um pequeno campo elétrico, pode-se observar uma expansão macroscópica ao longo do eixo de polarização e uma contração perpendicular a esta. Um dos efeitos da polarização do material piezelétrico é a definição da direção de expansão piezelétrica da estrutura. Assim consegue-se, dentro dos limites de operação, uma relação de linearidade entre a tensão elétrica e a deformação nesta direção (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

Pode-se relacionar o campo elétrico aplicado no elemento piezelétrico com a deformação resultante deste através do módulo piezelétrico d_{ij} , onde i representa a direção do campo elétrico aplicado e j a direção da força resultante da deformação normal, conforme a Eq. (2.9):

$$\varepsilon_{ij} = d_{ij} \frac{V}{th} , \quad (2.9)$$

onde V expressa a tensão elétrica aplicada na direção i e th a espessura da pastilha piezelétrica.

Para se compreender as relações fenomenológicas que envolvem os efeitos piezelétricos direto e inverso, pode-se utilizar o formalismo termodinâmico proposto por Devonshire em 1954 segundo Bank; Smith E Wang (1996), encontrando assim as relações constitutivas da energia total do sistema. Embora a resposta em aplicações típicas seja muito próxima da resposta linear, ao se utilizar níveis de excitação elevados os elementos piezelétricos revelam não-linearidade através de um efeito de histerese. Assim, os trabalhos desenvolvidos são restritos às leis de linearidade formuladas por Voigt em 1910 e citados por Bank; Smith E Wang (1996), demonstradas nas Eqs. (2.10) e (2.11), representando os efeitos direto e inverso, respectivamente.

$$D_m = \varepsilon_{mn}^T E_n + d_{mkl} \sigma_{kl} , \quad (2.10)$$

$$e_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl} + d_{mij} E_m , \quad (2.11)$$

Onde D e E representam, respectivamente, o deslocamento e o campo elétrico, ε e d denotam o tensor dielétrico do material e o tensor de tensão piezoelétrica, enquanto a deformação no material é relacionada à tensão σ através da complacência s . Os índices subscritos decorrem da notação indicial.

Do ponto de vista construtivo, atuadores são projetados a partir do efeito piezoelétrico inverso; já os sensores são aplicações do efeito piezoelétrico direto. Além disso, os materiais piezoelétricos apresentam relativa insensibilidade a variações térmicas, desde que estejam operando abaixo da temperatura de Curie. (BANK; SMITH; WANG, 1996).

Ao se analisar a pastilha de PZT utilizada no presente trabalho, verifica-se que, por se tratar de um elemento cerâmico, sua rigidez é geralmente superior à da estrutura na qual está colada (ou inserida), resultando numa conversão eletromecânica eficiente e adequada ao uso com atuadores (BANK; SMITH; WANG, 1996). O PZT ainda é recomendado como atuador auto-sensível, particularmente no controle e identificação de falhas (BANK; SMITH; WANG, 1996).

2.4 METODOLOGIA DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL (SHM) BASEADA EM IMPEDÂNCIA

O método de monitoramento de integridade estrutural, baseado em impedância, tem sido desenvolvido como uma ferramenta promissora para identificação de falhas estruturais e é considerado um novo método para avaliação não-destrutiva (PARK *et al*, 2003).

Esta técnica se baseia na propriedade piezoelétrica dos materiais para se obter uma impedância elétrica, cujo valor está diretamente relacionado à impedância mecânica da estrutura na qual a pastilha de PZT esteja colada ou inserida (PARK *et al*, 2003). Por esta razão é chamada de impedância eletromecânica. Particularmente, o valor da impedância eletromecânica é de mais fácil obtenção que o valor da impedância mecânica propriamente dita, por requerer apenas um equipamento capaz de medir simplesmente a impedância elétrica. Assim, monitora-se a variação dos valores de impedância causada por possíveis danos provocados na estrutura. Evidentemente, considera-se que o elemento piezoelétrico utilizado como sensor de impedância, bem como a cola utilizada permanecem íntegros durante todo o período de observação.

O desenvolvimento teórico que propôs o uso da impedância como técnica para monitoramento estrutural foi inicialmente apresentado por Liang *et al* (1994) e posteriormente ampliado por Chaudhry *et al* (1995, 1996), Sun *et al* (1995), Park *et al* (1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2001, 2003), Giurgiutiu e Zagari (2000, 2002), Giurgiutiu *et al*

(2002, 2003), Soh *et al* (2000), Bhalla *et al* (2002a, 2002b), Moura e Steffen (2004), Peairs (2006) e Moura (2008).

As freqüências de excitação utilizadas no método se encontram geralmente acima dos 30 kHz, sendo assim consideradas elevadas do ponto de vista dos sistemas mecânicos (particularmente as freqüências consideradas na análise modal). Além disso, a diferença de potencial utilizada é muito baixa, menor que 1V (PARK *et al*, 2003). Apesar disso, de acordo com Raju (1997), o valor de 1V de excitação apresenta bons resultados para a identificação de danos estruturais. Além disso, quanto à identificação da banda de freqüências de excitação a ser monitorada na estrutura, geralmente se adota um procedimento de tentativa e erro. Moura e Steffen (2004) utilizaram técnicas de planejamento experimental para escolher as melhores condições de ensaio. Sun *et al* (1995) sugerem que faixas cujos limites se situam acima de 200 kHz são favoráveis à identificação de falhas localizadas, enquanto bandas em freqüências menores que 70 kHz são mais indicadas para uma área mais ampla de observação.

Para ilustrar o processo de medição, é apresentado na Fig 2.2 um modelo para um sistema de 1 grau de liberdade (adaptado de RAJU, 1997), onde foi considerado que o atuador PZT axial está posicionado em uma das extremidades do sistema, enquanto a outra está fixa.

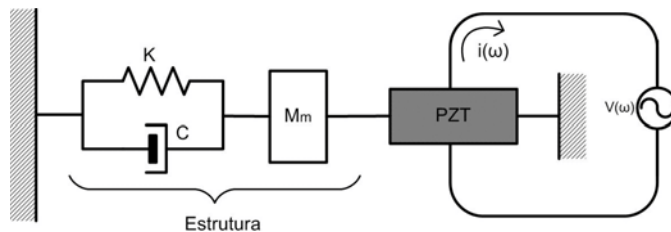


Figura 2.2 – Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método da impedância.

Desta forma, Liang *et al* (1994) demonstraram que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT pode ser escrita como uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$, e da estrutura, $Z_s(\omega)$, assim como mostra a Eq. (2.12):

$$Y(\omega) = i\omega a \left(\bar{\varepsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right), \quad (2.12)$$

onde:

Y é a admitância elétrica;

Z_a é a impedância mecânica do PZT;

Z_s é a impedância mecânica da estrutura;

$\hat{Y}_{xx}^E$ é o módulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo;

d_{3x} é a constante de acoplamento do PZT em uma direção x com deformação nula;

$\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica com deformação nula;

δ é o fator de perda dielétrica do PZT;

a é uma constante geométrica do PZT;

Supondo que as características eletromecânicas do PZT não variam ao longo do tempo de monitoramento, a Eq. (2.12) mostra que a impedância elétrica do PZT (ou seu inverso, a admitância) é diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura, podendo ser levada em consideração para o monitoramento da integridade estrutural da estrutura em questão através da análise dos sinais da impedância elétrica do PZT.

A impedância do elemento de PZT é predominantemente capacitiva, mostrado pela parte complexa do sinal de impedância. Sendo assim, este termo é muito mais sensível a variações de temperatura se comparado com a parte real do sinal. Portanto, a parte real do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações (RAJU, 1997).

Desta forma, a técnica consiste basicamente na obtenção de curvas representando a impedância ao longo de uma banda de frequências previamente escolhida, e da posterior avaliação da modificação desses sinais, observada periodicamente. Uma modificação desta curva pode indicar uma modificação estrutural, e, por conseguinte, uma falha (RAJU, 1997).

Estas curvas obtidas fornecem informações qualitativas a respeito da integridade estrutural, enquanto para a tomada de decisões é necessária uma informação quantitativa, na forma de uma grandeza escalar. Além disso, os sinais medidos podem ter variações associadas ao meio ambiente e não propriamente devido a um dano. Sendo assim, faz-se necessário um tratamento estatístico para avaliar a medida da impedância, cujo resultado é chamado de métrica de dano (PALOMINO, 2008).

Visando estabelecer-se uma metodologia capaz de quantificar as alterações estruturais estudadas, deve-se fixar uma referência para a métrica de dano correspondente à estrutura sem falha. Desta forma, podem ser realizadas comparações envolvendo os valores da métrica para a estrutura com e sem dano. Estas comparações são capazes de apontar se existe ou não dano na estrutura. Assim, a métrica de dano consegue quantificar a diferença entre medições da impedância quando comparadas com os dados obtidos para a estrutura sem dano (também chamada de *baseline*).

Existem várias propostas para a composição da métrica de dano, sendo que a mais usada é o desvio médio da raiz quadrada (ou RMSD, do inglês *Root Mean Square Deviation*), sendo sua definição formal descrita pela Eq.(2.13)

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(\text{Re}(Z_{1,i})^2 - \text{Re}(Z_{2,i}))^2}{n} \right)},$$

(2.13)

onde $\text{Re}(Z_{1,i})$ é a parte real da impedância da medição sem dano (*baseline*) em uma dada frequência i , $\text{Re}(Z_{2,i})$ é a parte real da impedância em uma frequência i para uma nova configuração da estrutura, e n é o numero total de pontos frequenciais amostrados e usados na comparação. Desta forma, o cálculo é feito dentro de uma faixa de frequência previamente definida, conforme explicitado anteriormente.

Dentre as várias alternativas a essa métrica de dano, pode-se citar a métrica de dano referente ao desvio do coeficiente de correlação proposta por GIURGIUTIU et al (2005), a diferença média quadrada utilizada por RAJU (1997), e o desvio percentual da média absoluta (TSENG et al, 2002). No trabalho realizado por PALOMINO (2008) são encontradas várias métricas de dano, de forma comparativa. O presente trabalho utiliza somente a métrica de dano conhecida como RMSD por ser a mais utilizada na literatura e por apresentar resultados satisfatórios (PALOMINO, 2008 e TSURUTA, 2008).

A respeito da região sensível à identificação das mudanças estruturais, Park *et al* (2003) argumentam que, para uma simples pastilha PZT, a mesma pode identificar falhas a uma distância radial de 0,4m em estruturas de material composto e de até 2 metros em estruturas contínuas de um único metal.

2.5 TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA

A Transformada *Wavelet* Contínua (*TWC*) tem se mostrado um método bastante útil para a análise de sinais não-periódicos, ruidosos e transitórios. Sua habilidade de examinar o sinal tanto no domínio do tempo quanto no da frequência de uma forma mais eficiente que a da Transformada de Fourier fez com que seu uso se espalhasse nas mais diversas aplicações, dentre elas a identificação de falhas em estruturas mecânicas (SOHN *et al*, 2003).

Muitas idéias por trás da *TWC* já existiam há muito tempo. Porém, sua formulação, na forma com que a conhecemos hoje, começou a encontrar aplicações práticas em meados da década de 1980 na análise de sinais sísmicos (ADDISON, 2002), porém de forma ainda muito limitada. A partir da década de 1990, entretanto, numerosas áreas do conhecimento passaram a se valer da *TWC* como uma valiosa ferramenta de análise.

Toda a análise da *TWC* se baseia em formas de ondas chamadas *wavelets* mãe (daí o nome da transformada), que podem ser compreendidas como sendo a resposta de um filtro passa-banda de referência a um sinal impulsivo (LEMISTRE *et al.*, 1999). Existem várias *wavelets* mãe, e algumas das mais utilizadas são exibidas na Fig 2.3. Em geral, a *wavelet* mãe utilizada em aplicações de SHM é a de *Morlet* complexa (LEMISTRE *et al.*, 1999) por fornecer informações tanto da amplitude quanto da fase, possibilitando a visualização das possíveis discontinuidades do sinal.

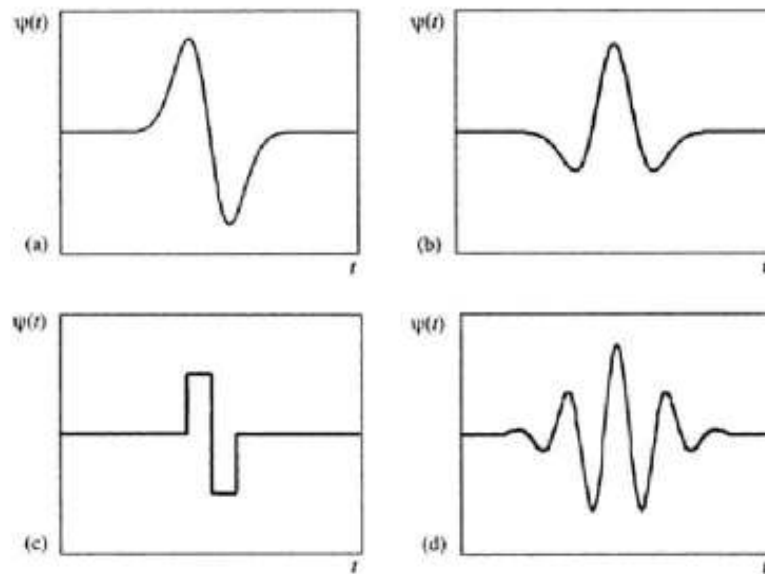


Figura 2.3 – Quatro das *wavelets* mãe mais comuns: (a) Gaussiana; (b) Chapéu Mexicano; (c) Haar; (d) Morlet.

Escolhida a *wavelet* mãe, o sinal $x(t)$ é então decomposto por convolução no tempo em um conjunto de funções base que são obtidas através da dilatação e translação desta *wavelet* mãe, $\psi(t)$, conforme a Eq. 2.14.

$$TWC_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (2.14)$$

onde as variáveis contínuas a e b são os parâmetros de escala e translação respectivamente, de forma que a escala se relaciona com a frequência e a translação se relaciona com o tempo.

Desta forma, o sistema de referência bidimensional do sinal analisado passa de um plano Amplitude-Tempo para um plano Escala-Tempo (chamados Escalogramas). Esta mudança é muito útil na análise de sinais não-estacionários e transitórios (Lemistre et al, 1999), por representarem o comportamento do sinal em diferentes bandas de frequência com suas respectivas contribuições à energia completa do sinal.

Desta forma, os aspectos acima apresentados para a *TWC* sugerem uma boa opção para a extração de características dos sinais, podendo modelar comportamentos de inserção de falhas em estruturas que estejam sendo monitoradas pela metodologia de Ondas de Lamb descritas a seguir.

2.6 METODOLOGIA DE SHM BASEADA EM ONDAS DE LAMB

Outra metodologia, tão amplamente utilizada em SHM quanto a que é fundamentada na impedância eletromecânica, é a que utiliza as chamadas ondas de Lamb (*Lamb waves*). Esta técnica tem provado ser um método confiável para estimar a existência de dano numa estrutura em termos de localização, severidade e tipo de dano (RAGHAVAN e CESNIK, 2005).

As ondas de Lamb foram previstas matematicamente por Horace Lamb em 1917 (RAGHAVAN e CESNIK, 2005), todavia este pesquisador não foi capaz de produzi-las experimentalmente devido às limitações técnicas próprias da época. Basicamente, ondas Lamb são ondas elásticas que se propagam por meios sólidos, e desta forma, estão sujeitas às atenuações e reflexões impostas por este meio de propagação. Ao se considerar uma estrutura como sendo o meio de propagação, quando se insere um dano nesta estrutura, também é alterado o meio de propagação e, desta forma, pode-se identificar o dano.

Raghavan e Cesnik (2005) definem dois métodos principais para o diagnóstico usando ondas Lamb: *pitch-catch* e *pulse-echo* (Fig. 2.4).

No primeiro método de diagnóstico propõe o uso de pares de sensores e atuadores localizados nas extremidades da estrutura. Desta forma, um sinal pulsado é enviado de uma extremidade à outra da estrutura, acumulando informações sobre a estrutura na forma da propagação neste meio. Ao se instalar o dano, a propagação por este meio é alterada, tornando possível a determinação do dano.

No método *Pulse-Echo*, um único elemento de PZT age como atuador e sensor excitando a estrutura e, logo em seguida, é adquirido o sinal ecoado por reflexões no meio de propagação. Quando um dano se localiza na estrutura, este altera o padrão anterior de reflexão, tornando possível a sua identificação.

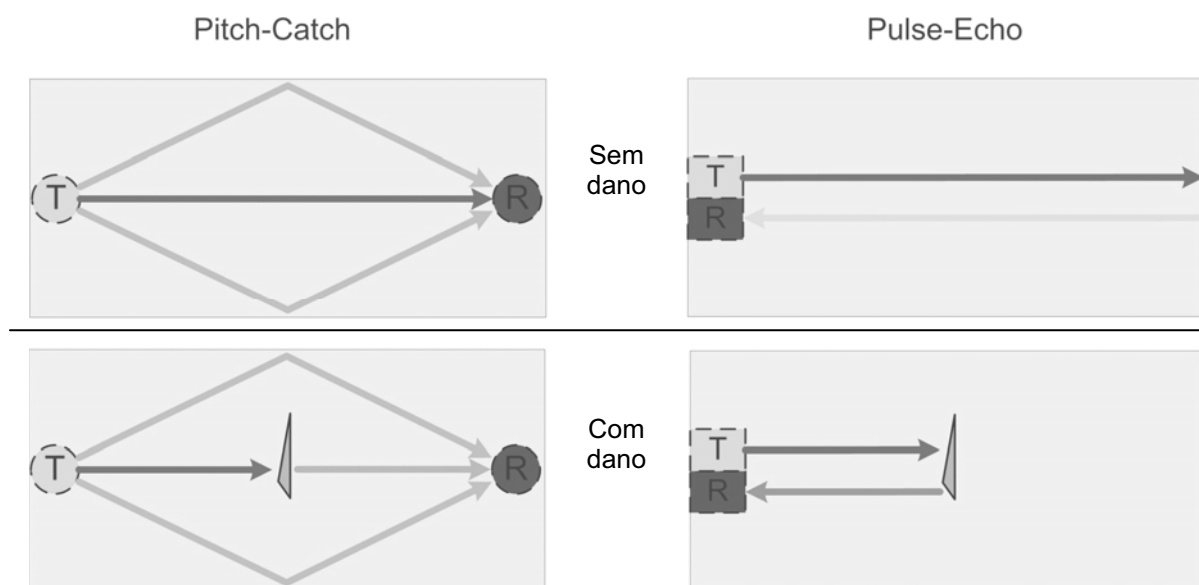


Figura 2.4 – Principais técnicas para o diagnóstico por ondas Lamb.

Ambas as metodologias, *pitch-catch* e *pulse-echo*, fazem o uso de algoritmos de processamento digital de sinais a fim de se extrair características referentes ao meio de propagação do sinal adquirido. Sendo assim, pode-se, por exemplo, utilizar a Transformada Rápida de Fourier visando detectar frequências características (LEMISTRE *et al*, 1999), ou ainda utilizar a Transformada Wavelet Contínua para se extrair as características (SOHN, 2005), dentre outras. O presente trabalho utiliza *TWC* para extração das características do sinal (DEBNATH, 2001), sendo que o método de diagnóstico aqui utilizado é o *pitch-catch*. Esta metodologia tem sido aplicada com sucesso aos casos de identificação de delaminações e rupturas de fibras em estruturas compostas com fibras de carbono/epóxi (LEMISTRE *et al*, 1999). Acrescenta-se que esta técnica pode ser igualmente aplicada a estruturas metálicas, como falhas em trilhos de ferrovia (PARK, 2006) ou ainda em placas metálicas (HUYNH, 2005).

Desta forma, a Fig. 2.5 esquematiza a metodologia utilizada no presente trabalho, partindo de uma excitação pulsada em uma dada frequência, até a decomposição do sinal em frequências através da *TWC*.

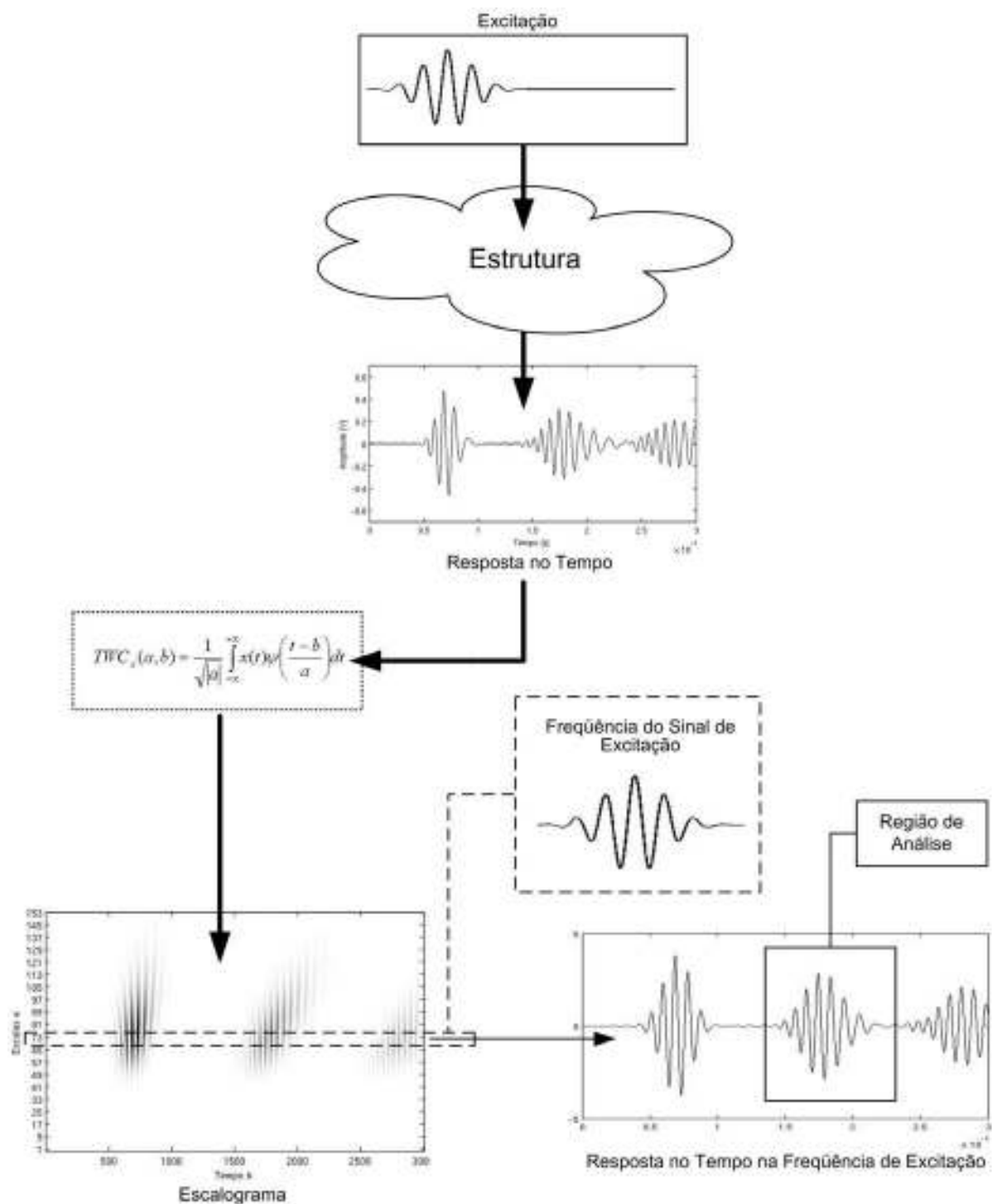


Figura 2.5 – Procedimento para extração de características de dano através da análise por *TWC* (Adaptado de SOHN, 2005).

Partindo de uma estrutura que possua um par sensor-atuador devidamente instalado, o procedimento inicia-se com a determinação do sinal a ser utilizado para excitar a estrutura. A forma de onda utilizada é um sinal pulsante do tipo rajada, semelhante à *wavelet morlet* (SOHN, 2005). Três parâmetros precisam ser definidos para a geração deste sinal:

amplitude, frequência e duração. Primeiramente, sua amplitude é definida de tal forma que seja capaz de inserir energia mecânica na estrutura o suficiente para que a onda consiga trafegar ao longo da mesma, sem que todo o sinal seja atenuado antes mesmo de ser adquirido. Vale ressaltar que é importante atentar para o limite de linearidade da pastilha de PZT. Tipicamente o sinal não excede 5 V de tensão de pico. Já os outros dois parâmetros são usualmente determinados por tentativa e erro, tendo em vista, porém, que a duração da rajada não deve ser muito longa para não descaracterizar a natureza do sinal.

Definido o sinal de entrada e após se excitar a estrutura, o sinal então adquirido é processado através da TWC, levando à obtenção de um *escalograma* que representa o sinal no plano escala-tempo. Seleciona-se então a escala correspondente à frequência de excitação e obtém-se o sinal filtrado que carrega as características de propagação do meio físico. Partindo agora deste sinal, define-se a região de análise, que neste trabalho corresponde ao segundo lóbulo temporal. Esta escolha foi feita com base em ensaios preliminares, e também pela consideração de que este lóbulo é proveniente de reflexões internas do sinal no meio de propagação, carregando assim informação sobre este meio.

Da região de análise, consegue-se obter, por exemplo, informações sobre a energia do sinal, ou ainda os valores máximos de pico. Assim, é estabelecida uma referência de valores coletados nos moldes da análise apresentada por impedância eletromecânica, com *baselines* a serem comparados com valores previamente escolhidos. Além disso, pode-se estabelecer uma métrica de dano visando obter valores quantitativos desta comparação. A métrica mais usual é o chamado Índice de Dano (*DI*, do inglês *Damage Index*) apresentado pela Eq. 2.15 e que relaciona a variação da energia dos sinais comparados (SOHN, 2005).

$$DI = 1 - \frac{\int_{b1}^{b2} TWC_{teste}(b, a_0) db}{\int_{b1}^{b2} TWC_{baseline}(b, a_0) db}, \quad (2.15)$$

onde a_0 é a escala da TWC que corresponde à frequência de excitação e os sub-índices *teste* e *baseline* denotam o sinal a ser testado e o sinal de referência, respectivamente. Desta forma, o valor da métrica se encontrará sempre no intervalo $0 \leq |DI| \leq 1$ e representa a variação da energia entre os diferentes estados da estrutura.

2.7 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Redes Neurais Artificiais (RNAs) são sistemas de processamento de informações que compartilham algumas características com as Redes Neurais Biológicas (FAUSETT, 1993), porém com algumas restrições, como sua limitada capacidade de processamento, por exemplo (KOVÁCS, 1996). Estas redes artificiais têm sido desenvolvidas como uma generalização dos modelos matemáticos da cognição humana baseadas nos seguintes conceitos observados por Fausett (1993):

- O processamento das informações acontece em várias estruturas simples chamadas Neurônios;
- Sinais são trocados entre os diferentes neurônios através de ligações;
- Cada ligação possui um peso associado a ela que multiplica o sinal transmitido;
- Cada neurônio aplica uma função de ativação, geralmente não-linear, para a tomada de decisão e conseqüente obtenção da resposta;

Embora pareçam muito simples, estes modelos neuronais tem se mostrado úteis num grande conjunto de aplicações, tais como no reconhecimento de imagens e padrões, na predição de eventos, na redução ou cancelamento de ruídos, e muitos outros (FAUSETT, 1993).

Numa forma simples de interpretação das RNAs, o neurônio – também chamado de nó – é a entidade básica e recebe dados de várias entradas, processando-os através da variável peso e de uma função simples como a função soma. Feito isso, o neurônio envia um sinal à sua saída através da função de uma função de transferência, como indica a Fig. 2.6.

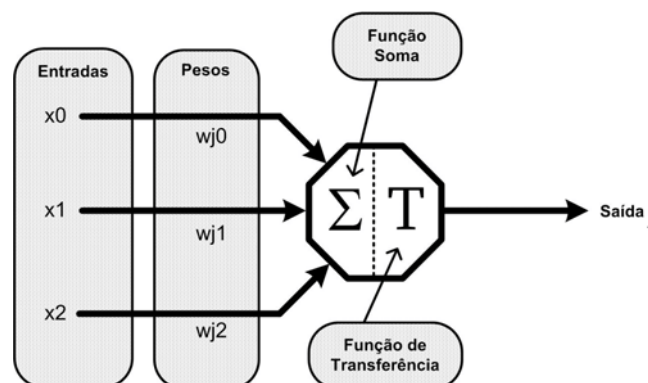


Figura 2.6 – Exemplo de um neurônio artificial (TAFNER, 2002).

Aqui se explicita apenas um neurônio, sendo que uma RNA é composta de vários neurônios que atuam de forma conjunta sobre os dados e podem explorar várias hipóteses simultaneamente (FAUSETT, 1993). Percebe-se então que as Redes Neurais não são uma espécie de algoritmo cuja estrutura é rígida. Nelas podem ser exploradas diferentes topologias de rede, funções de transferência e uma infinidade de outras variações que, em conjunto, compõem o estado-da-arte das Redes Neurais Artificiais.

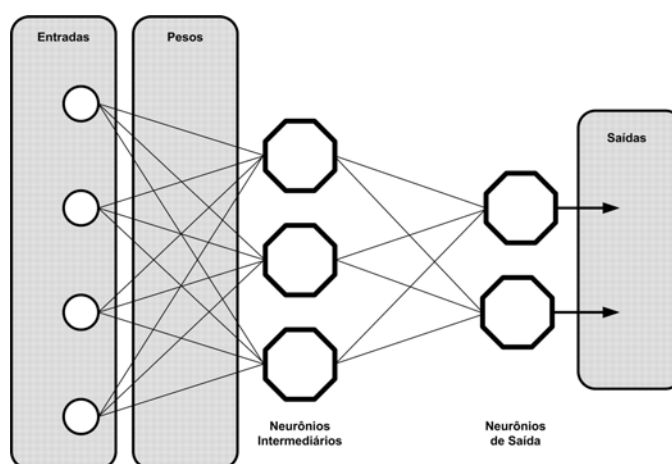


Figura 2.7 – Modelo de RNA multicamada (TAFNER, 2002).

Além disso, é possível interconectar várias RNAs organizadas em diferentes camadas, conforme ilustra a Fig 2.7, fazendo a comunicação entre os neurônios de forma ainda mais similar aos modelos orgânicos. Evidentemente, para uma rede neural ser completamente funcional, faz-se necessário um processo de aprendizado chamado de treinamento, onde essencialmente entradas de aprendizado são inseridas na RNA e os valores de saída são impostos. Desta forma, consegue-se através de varias técnicas que compõem o treinamento, que a RNA tenha o ajuste de seus pesos associados a cada ligação (FAUSETT, 1993).

Evidentemente, topologias de RNAs mais complexas conseguem resolver problemas mais sofisticados, contudo exigem um esforço maior de treinamento e requisitos de *hardware* que possam tornar sua aplicação inviável em alguns casos (KOVÁCS, 1996). Porém, existem boas justificativas para a utilização de RNAs atualmente, como, por exemplo, a possibilidade de construção de processadores e *hardware* dedicados e relativamente simples para a execução de tarefas específicas, e ainda a seu excelente desempenho na identificação de padrões e classificação de entradas (FAUSETT, 1993).

Em 1958, o fisiologista Frank Rosenblatt, desenvolveu na Universidade de Cornell o primeiro modelo de RNA chamado *Perceptron* tendo publicado o trabalho chamado: “O *Perceptron*: Um modelo probabilístico para o armazenamento de informação e organização

no cérebro” (*“The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”*). Este modelo causou um grande impacto na comunidade científica, pois mostrava um real aprendizado da máquina. Desde então, muitos modelos mais complexos foram feitos baseados em extensões do modelo *Perceptron* (KOVÁCS, 1996).

O *Perceptron* é capaz de aprender conceitos e responder a vetores de entrada baseando-se em treinamentos realizados através de entradas similares. O treinamento é feito apresentando à rede vetores de treinamento e calibrando-se os valores dos pesos internos até se chegar a valores desejados. O nome dado ao processamento completo de um vetor de treinamento é “época”, e a cada época busca-se a diminuição do erro entre a entrada de treinamento e a saída desejada. Dos critérios para concluir o treinamento pode-se citar a obtenção de um erro menor que um limiar estabelecido pelo usuário, ou ainda o desenvolvimento de um número máximo de épocas.

O modelo *Perceptron* original possuía algumas sérias limitações, como, por exemplo, o fato de que sua saída era binária, ou seja, somente “verdadeiro” ou “falso” e ainda a incapacidade de separar conjuntos não-linearmente separáveis. Esta última limitação chegou a provocar certa estagnação no uso de RNAs em aplicações práticas, uma vez que grande parte dos problemas cotidianos não são linearmente separáveis (KOVÁCS, 1996).

Posteriormente, com o avanço dos estudos em RNAs, conseguiu-se superar grande parte das limitações através do uso da topologia Multicamadas (já citada anteriormente), e também com a evolução das técnicas de treinamento destas camadas.

O algoritmo de treinamento mais popular para RNAs é conhecido como *Backpropagation*. Apesar de ser confundido com um modelo de redes, vale ressaltar que se trata apenas de um método de treinamento de redes bastante usado em redes *Perceptron* multicamadas. Este algoritmo apresenta várias formas, sendo que a mais utilizada é uma versão simplificada, difundida por Rumelhart, Hinton e Williams em 1986, para resolver problemas no treinamento de redes complexas. Esta versão do algoritmo de *backpropagation* aplica o algoritmo para resolver problemas de supervisão, aprendendo e identificando padrões (KOVÁCS, 1996).

2.8 ESTATÍSTICA APLICADA EM SHM

Para uma maior compreensão da metodologia utilizada no presente trabalho, faz-se necessária uma breve revisão dos conceitos estatísticos envolvidos na análise da integridade estrutural.

Montgomery (2003) descreve variabilidade como sendo o fato de que sucessivas observações de um sistema ou um fenômeno não produzirem exatamente o mesmo resultado. A esta variação observada é chamada erro.

Caso este erro seja fruto de algum procedimento equivocado do experimentador, ele é então denominado de erro sistemático e não é tratado de forma estatística. Já se este erro possui uma natureza que varia ao acaso, este é chamado de erro aleatório e é necessária a utilização de métodos estatísticos para melhor se entender, identificar e quantificar este tipo de erro.

O conjunto total de ocorrências de um dado tipo de informação é conhecido como população. É sobre esta que se deseja inferir respostas. Porém, em algumas situações, é impossível utilizar o conjunto total de observações, seja por limitação técnica ou temporal. Assim, é utilizada uma parte do conjunto total – chamada amostra – sobre a qual, com as devidas considerações, tais como intervalos de confiança, consegue-se generalizar estas respostas para toda a população. Além disso, no processo de amostragem deve-se garantir que esta seja rigorosamente aleatória, ou seja, que cada membro da população tenha a mesma probabilidade de ser escolhido (MOURA, 2008).

2.8.1 Distribuição Normal de Probabilidades

A distribuição dos dados de uma amostra aleatória é definida como sendo a função que descreve a probabilidade de ocorrência destes dados em um determinado evento, sendo uma de suas formas a Função Densidade de Probabilidade (*PDF – Probability Density Function*) (MOURA, 2008). Esta função pode assumir diversas formas, tais como: Discreta, Normal ou Gaussiana, Distribuição F, dentre muitas outras. Todas são muito bem conhecidas e estudadas sendo aplicadas em diversos processos. Sem dúvida, o modelo mais amplamente utilizado para a distribuição de probabilidades de variáveis aleatórias é a *PDF* normal ou também chamada de gaussiana, exemplificada na Fig.(2.8).

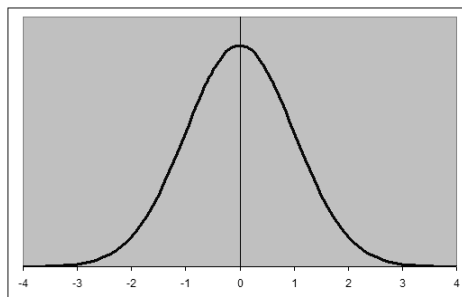


Figura 2.8 – Exemplo de *PDF* Normal de média nula.

De forma simplificada, a *PDF* Normal pode ser descrita pela Eq. (2.8).

$$f(x) = \left[1/(2\pi)^{1/2} \sigma\right] e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2.16)$$

Para valores de x dentro do intervalo $-\infty < x < \infty$, o parâmetro σ é chamado de desvio-padrão, seu valor quadrático σ^2 é conhecido como variância e μ é a média. Pode-se também indicar esta função na seguinte forma: $N(\mu, \sigma^2)$ (MONTGOMERY, 2003).

O parâmetro de desvio-padrão é uma característica bastante útil na análise de dados com a distribuição normal, pois este representa a variabilidade ou a dispersão dos valores em torno da média. A Fig.(2.9) ilustra a porcentagem de concentração dos dados em torno da média em função do desvio-padrão da média.

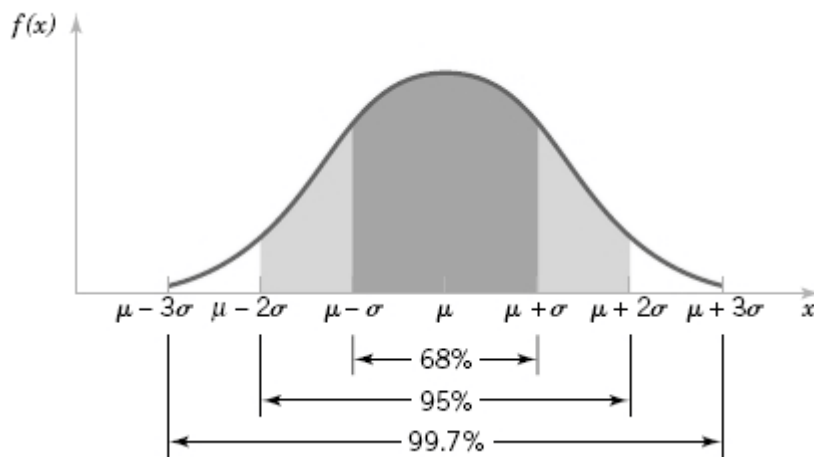


Figura 2.9 – Dispersão dos valores em torno da média μ e do desvio-padrão σ (MONTGOMERY, 2003).

2.8.2 Gráfico de caixas ou BOXPLOT

Os gráficos de caixas, também conhecidos como *BOXPLOTS* são ferramentas úteis na estatística descritiva por se apresentarem como uma forma conveniente de representar diferenças entre os dados de cada amostra e dos experimentos como um todo.

Para se compreender o gráfico, é necessário antes se compreender o que é um quartil. Quartil pode ser definido como sendo um dos três valores que divide a amostra em quatro intervalos de igual tamanho em número de pontos, de tal forma que cada intervalo contém 25% dos dados observados. Temos assim, o primeiro quartil (Q1), o segundo quartil (chamado também de mediana) e o terceiro quartil (Q3). A diferença entre Q1 e Q3 é chamada de Intervalo interquartil (*IQR*).

O gráfico é composto de uma caixa central definida pelos primeiro e terceiro quartis e que engloba a mediana em destaque; além disso, o gráfico possui os chamados “bigodes” que são definidos a uma distância de 1,5 vezes o intervalo interquartil desta caixa central. O gráfico pode ainda apresentar os chamados “outliers” que são dados fora destes intervalos e que usualmente são representados por asteriscos.

A Fig.2.10 apresenta a construção de um gráfico *BOXPLOT* típico, bem como os desvio-padrão envolvidos nesta divisão de dados.

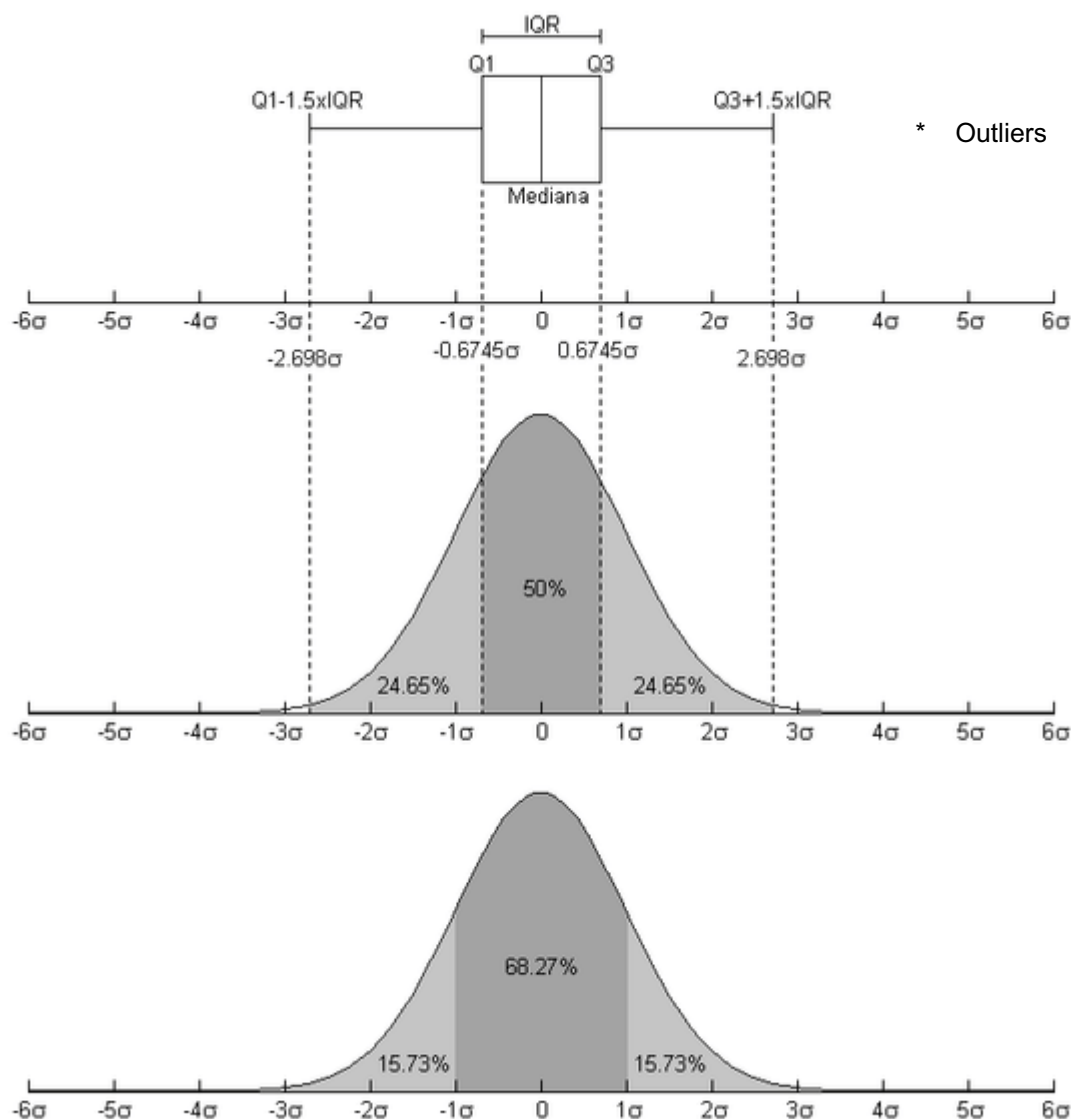


Figura 2.10 – Construção de um *BOXPLOT* típico e sua dispersão de dados.

2.8.3 Testes de Hipóteses Estatísticas

Através do processo de amostragem e análise estatística de dados consegue-se então obter informações a respeito de um conjunto de dados que pode ser, com determinados

níveis de confiança, representantes de uma população como um todo. Porém, ao comparar vários conjuntos provenientes de populações distintas se faz necessária a aceitação ou negação de alguma hipótese envolvendo os parâmetros de interesse.

Desta forma, os Testes de Hipóteses Estatísticas preenchem esta lacuna, provendo uma ferramenta essencial no processo de tomada de decisões envolvendo dados estatísticos (MONTGOMERY, 2003).

Formalmente, Montgomery (2003) define uma hipótese estatística como sendo uma afirmação acerca dos parâmetros de uma ou mais populações. Assim, pelo fato de que estes parâmetros podem ser representados por funções distribuição de probabilidade, a hipótese estatística também pode ser tratada em termos desta distribuição de probabilidade.

Então o teste de hipóteses é formalizado tomando uma hipótese H_0 – chamada também de hipótese nula – ao qual se deseja testar sua veracidade dentro de um certo nível de confiança. A sua rejeição sempre implica na aceitação da hipótese alternativa, também chamada de H_1 . Ambas são antagônicas entre si e englobam todas as possibilidades envolvendo os parâmetros avaliados.

Ao longo deste trabalho, vários testes de hipóteses estatísticas serão realizados buscando conferir significância estatística às afirmações feitas. Em cada um dos testes de hipóteses realizado serão descritas as afirmativas consideradas, bem como a sua aceitação ou rejeição. Assim, o único objetivo desta seção inicial é apenas o de contextualizar o procedimento utilizado na metodologia.

CAPÍTULO III

SHM BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA E NAS ONDAS DE LAMB PARA IDENTIFICAÇÃO DE PERDA DE REBITES

O objetivo deste capítulo é o de apresentar duas abordagens distintas para o monitoramento de estruturas rebitadas. Para isso, foram utilizadas duas técnicas bastante aplicáveis para esse fim, que são a que se baseia em sinais de impedância eletromecânica e a que utiliza as chamadas ondas de Lamb.

Numa primeira etapa, foi analisada uma estrutura mecânica simples – uma viga de alumínio – buscando obter os parâmetros necessários para a reprodução das técnicas mencionadas, conforme instrui a literatura. A partir daí foi estudada uma estrutura aeronáutica, comparativamente mais complexa, a fim de se testar ambas as técnicas na identificação de falhas envolvendo perda de rebites.

3.1 MONITORAMENTO DE UMA ESTRUTURA SIMPLES: VIGA DE ALUMÍNIO

O objetivo principal dos experimentos realizados na viga de alumínio é o de poder evidenciar a perda do rebite num contexto simplificado, através das duas técnicas abordadas neste trabalho.

3.1.1. Parâmetros do Experimento

Foi utilizada nesta seção uma viga de alumínio, montada conforme mostra a Fig. 3.1, com 4mm de espessura, e geometria conforme a Fig. 3.2, onde também são coladas duas

pastilhas de PZT nas duas extremidades da peça. Ao centro da viga foi inserido um rebite-pop de 3mm de diâmetro. A estrutura foi então mantida suspensa por elásticos, a fim de se configurar as condições de contorno do tipo livre-livre.

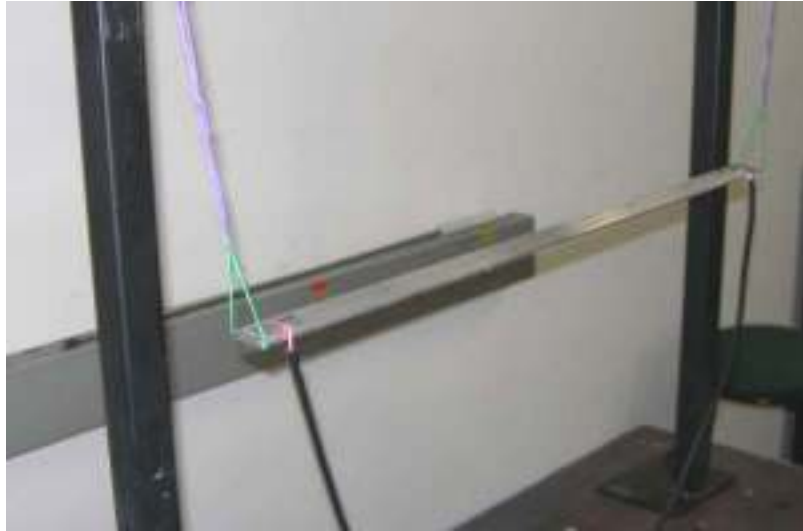


Figura 3.1- Viga utilizada.

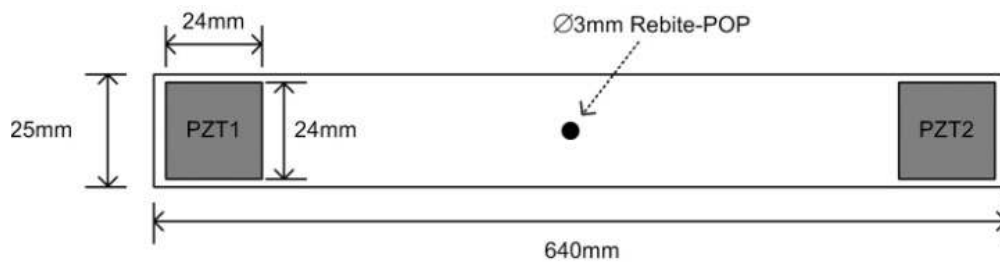


Figura 3.2- Geometria da estrutura.

Como a estrutura possui apenas um rebite, este será removido para caracterizar a simulação de dano na estrutura. Além disso, o procedimento experimental foi dividido em duas etapas para acomodar as duas técnicas implementadas (impedância eletromecânica e ondas de Lamb). Entretanto, os ensaios foram realizados e analisados de forma independente entre si.

Para a etapa de análise da impedância eletromecânica foi utilizado o analisador de impedância HP4194A configurado para uma faixa de observação da impedância de ambos os PZTs entre 40 kHz e 50 kHz, nível do oscilador em 1V e oito médias para cada dado adquirido. Ambas as pastilhas de PZT foram utilizadas, porém, pelo fato do PZT2 ter apresentado problemas na colagem logo ao final da série de experimentos, os dados correspondentes não serão apresentados.

Já para a análise por ondas de Lamb, foi utilizada a excitação na frequência de 10 kHz. Além disso, foi empregada uma excitação *morlet* com 3 períodos e amplitude de 3 V, onde o

método de diagnóstico *pitch-catch* foi aplicado em ambos os PZTs, com sinal adquirido através de uma placa de captura USB e do *software LABVIEW®*.

Além disso, buscando maior confiabilidade para os dados obtidos, foram realizadas 20 repetições na etapa da impedância eletromecânica e 50 na etapa com as ondas de Lamb. Esta quantidade de repetições foi definida ao se considerar o tempo dedicado para o experimento e também a necessidade de uma quantidade significativa de amostras para os testes estatísticos realizados. Vale ressaltar que toda a coleta de dados da experimentação realizada nas etapas da impedância eletromecânica ocorreu de forma manual e diretamente no aparelho utilizado (HP4194A). Já na coleta de dados das etapas de ondas de Lamb, como dito anteriormente, foi utilizado o *software LABVIEW®* que propicia uma substancial automação na coleta de dados para o experimentador.

3.1.2. Apresentação e Análise dos Resultados

Assim, os dados foram obtidos conforme explicado anteriormente, representando um conjunto de amostras a ser analisado estatisticamente nesta seção.

Buscando ilustrar a variação do sinal adquirido com ambas as técnicas, as Figs. 3.3 e 3.4 exibem os dados adquiridos para a condição com rebite (*baseline*) e com dano provocado pela perda do rebite nas diferentes técnicas. Nota-se uma diferença significativa entre os sinais correspondentes às duas situações, principalmente na análise por ondas de Lamb. Tal diferença pode ser justificada pela relativa severidade do dano, uma vez que a massa do rebite retirado e o diâmetro do furo são bastante significativos comparados com a massa da viga e sua secção transversal respectivamente.

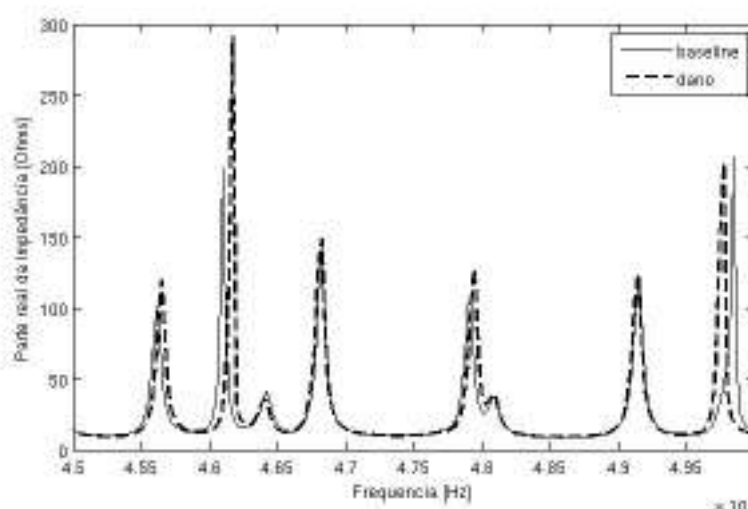


Figura 3.3. Exemplo da variação obtida pela impedância eletromecânica.

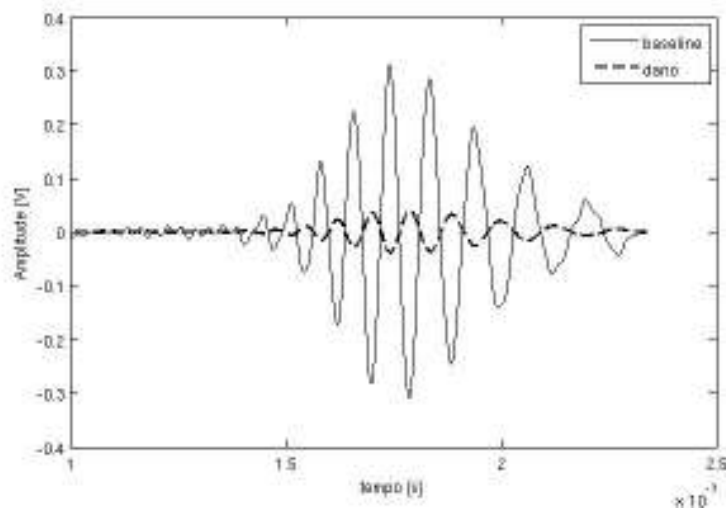


Figura 3.4. Exemplo da variação obtida pelas ondas Lamb.

Para quantificar os dados mostrados acima, foram calculadas as métricas de dano *RMSD* e *DI* (impedância eletromecânica e ondas de Lamb, respectivamente) a partir dos dados adquiridos, resultando assim os seguintes valores apresentados nas figuras seguintes.

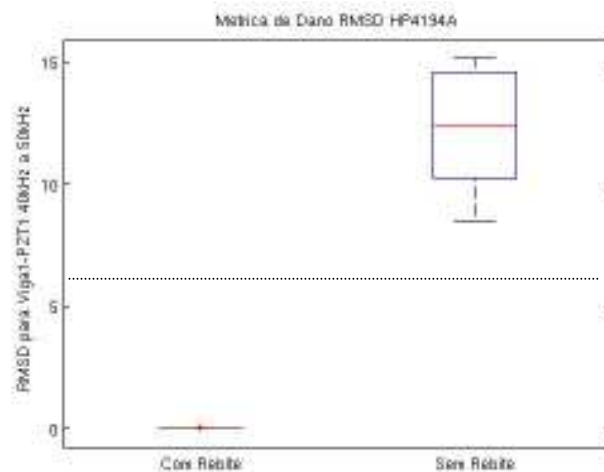


Figura 3.5. Média e desvio padrão para o *RMSD* tomado no PZT1.

Analisando os gráficos das Figuras 3.5 e 3.6, pode-se concluir que ambas as técnicas têm boa sensibilidade à falta do rebite, já que é evidente a diferença nos valores das métricas entre os estados saudáveis e o estado sem rebite, pois se consegue separar os dois conjuntos com uma reta imaginária. Contudo, mesmo esta diferença seja evidente, do ponto de vista estatístico faz-se necessária a realização de testes de hipóteses visando

verificar se para cada um dos pares de amostras (*baseline* - dano) se têm médias diferentes entre si, o que tornaria válida a observação do dano.

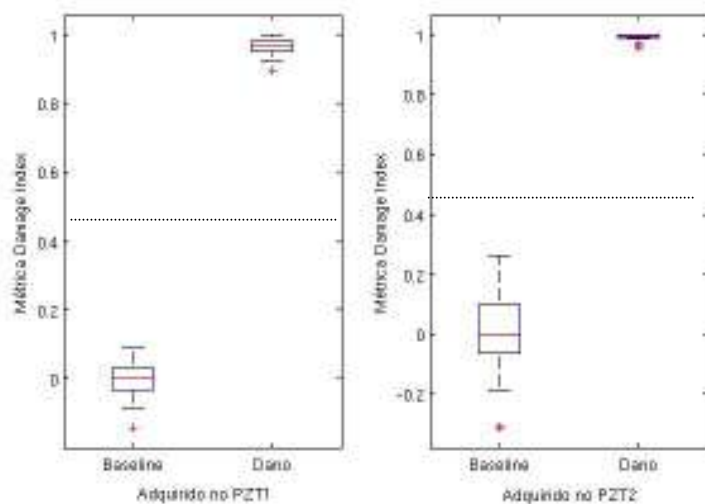


Figura 3.6. Média e desvio padrão para o *DI*.

Assim, primeiramente é necessário realizar um teste de normalidade visando verificar se o conjunto de dados colhidos em cada etapa obedece a uma função de distribuição de probabilidade do tipo Normal. Desta forma o primeiro teste de hipótese é proposto da seguinte forma:

- H_0 : O conjunto de dados obedece a uma distribuição normal;
- H_1 : O conjunto de dados não obedece a uma distribuição normal;

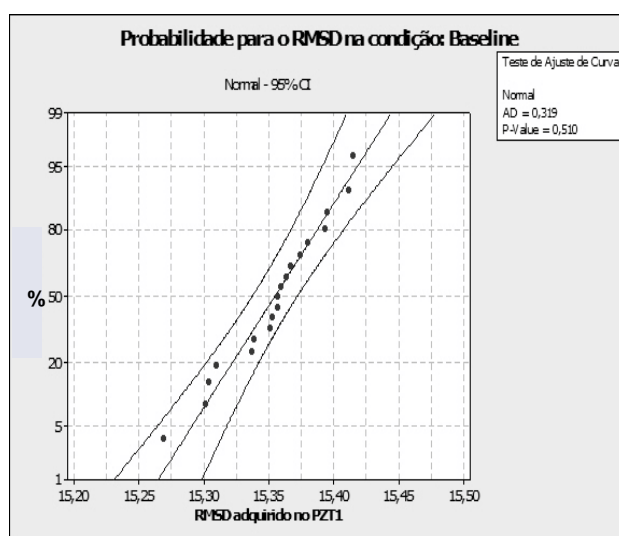


Figura 3.7. Teste de normalidade para as amostras de *RMSD* na condição de *baseline*.

Considerando um nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$), a hipótese H_0 será aceita para um valor-p (*P-value*) maior que α . Assim, as figuras 3.7 a 3.10 exibem o teste de hipótese para cada um dos dados do experimento.

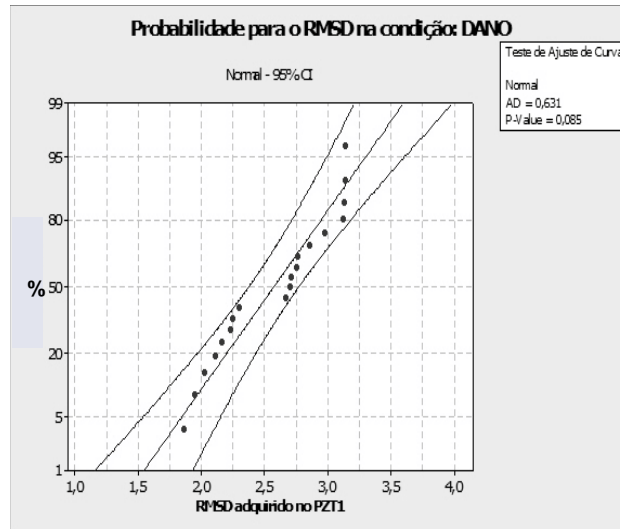


Figura 3.8. Teste de normalidade para as amostras de *RMSD* na condição de dano.

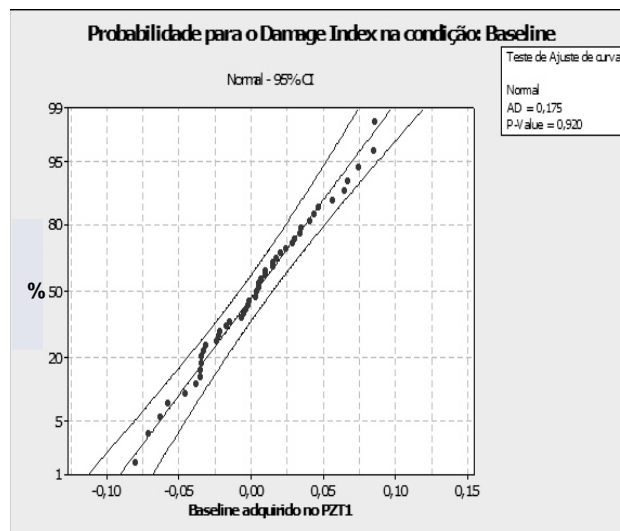


Figura 3.9. Teste de normalidade para as amostras de *DAMAGE INDEX* na condição de *baseline* adquirido no PZT1.

Este tipo de análise também se mostra útil na classificação de uma boa aquisição dos dados. Caso haja algum fator levando os dados se tornem tendenciosos (como por exemplo mal contato entre os cabos ou ainda efeitos na colagem da pastilha PZT), esta tendência pode ser observada nestes diagramas e conseqüentemente levar ao descarte de toda a série de experimentos.

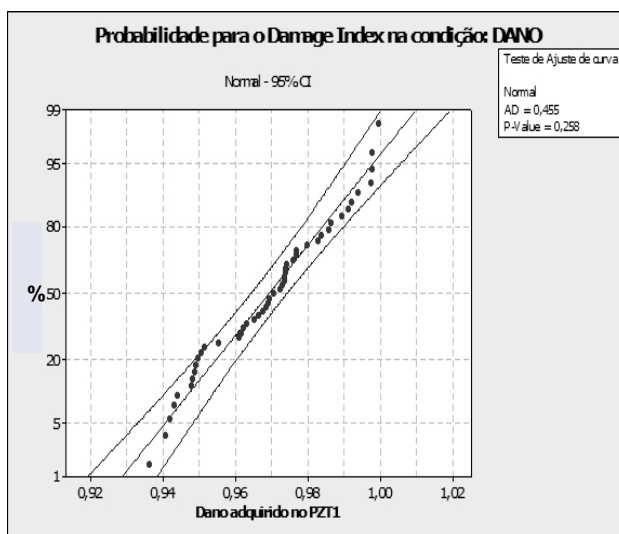


Figura 3.10. Teste de normalidade para as amostras de *DAMAGE INDEX* na condição de dano adquirido no PZT1.

Conclui-se então que todos os dados adquiridos obedecem a uma distribuição normal dentro das limitações estatísticas consideradas. Este fato valida as análises dos dados através de parâmetros como média e desvio padrão. Além disso, a variação observada no valor-P (*P-Value*) pode ser justificada por fatores que influenciam cada etapa de aquisição isoladamente, como a diferença na colagem das pastilhas de PZT ou, também, o nível de tensão elétrica do sinal de resposta. Porém estes não representaram uma variação tendenciosa, e desta forma não levaram a desconsideração do processo de amostragem.

Sendo assim, parte-se então para o último teste de hipóteses que busca verificar se para cada par de dados (*baseline* - dano) é possível afirmar que as médias são diferentes entre si com uma dada significância estatística. Assim, é proposto um teste-T de duas amostras, cada qual realizado com um destes pares, sendo as hipóteses correspondentes listadas abaixo:

- H_0 : As médias de cada amostra são iguais;
- H_1 : As médias de cada amostra são diferentes;

Novamente, foi considerado um nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$) e a hipótese H_0 será aceita para um valor-P maior que α . Foi possível também se estimar um intervalo de confiança para a diferença entre as duas médias. Pode-se então construir a Tabela 3.1, onde os resultados dos testes de hipóteses são apresentados de forma simplificada.

Tabela 3.1 – Sumário dos testes de hipóteses de diferenças de médias.

Par de dados	Valor-P	Diferença estimada.	Hipótese aceita
RMSD	0,000	(-13,271; -11,184)	H ₁
DI – PZT1	0,000	(-0,97758; -0,95122)	H ₁
DI – PZT2	0,000	(-1,0281; -0,9597)	H ₁

Com estes testes de hipótese ficou demonstrado estatisticamente que as métricas de dano para ambas as técnicas de *SHM* são capazes de reconhecer adequadamente a perda do rebite na viga estudada, validando assim o procedimento e atendendo ao objetivo proposto nesta etapa.

3.2 ESTRUTURA AERONÁUTICA: COMPONENTE DE FUSELAGEM

Após a seção 3.1, onde as técnicas abordadas neste trabalho foram aplicadas numa estrutura simples para um dano relativamente severo, parte-se então para esta nova seção que tem como objetivo principal verificar a capacidade de detecção de dano numa estrutura de maior complexidade. Esta estrutura possui uma maior quantidade de rebites e, assim sendo, a perda de um único rebite pode não representar um dano tão severo à integridade do painel em si, quanto a perda do único rebite da viga estudada na seção anterior.

3.2.1. Parâmetros do Experimento

Foi utilizada uma peça componente de fuselagem aeronáutica, conforme mostrado na Fig. 3.11(a). Trata-se de uma placa de alumínio medindo 810x810mm possuindo longarinas rebitadas à placa para fins de sustentação mecânica.

A região de interesse explorada nesta seção corresponde à porção direita da estrutura exibida na Fig. 3.11(a), que pode ser dividida basicamente em 3 seções rebitadas (Fig. 3.11(b)), onde o dano foi inserido na seção rebitada central (Fig. 3.11(c)). Foram então coladas pastilhas de PZT com medidas de 20x20 milímetros ao longo da estrutura conforme a Fig. 3.11(b). Buscou-se abranger amplamente toda a porção direita da estrutura colando 7 pastilhas de PZT, sendo 4 destas coladas à estrutura em si e 3 pastilhas foram coladas nas longarinas rebitadas. Porém, ao longo dos ensaios realizados, notou-se que os sinais adquiridos pela técnica de ondas Lamb provenientes destas 3 pastilhas de PZT coladas às longarinas apresentaram níveis de tensão elétrica muito baixos, devido possivelmente às atenuações da energia do sinal durante a propagação da onda mecânica através das duas

sub-estruturas (placa-longarina). Assim, os dados adquiridos por estes sensores piezelétricos foram descartados de toda a análise apresentada aqui, sendo, portanto, considerados apenas os sinais provenientes dos demais sensores.

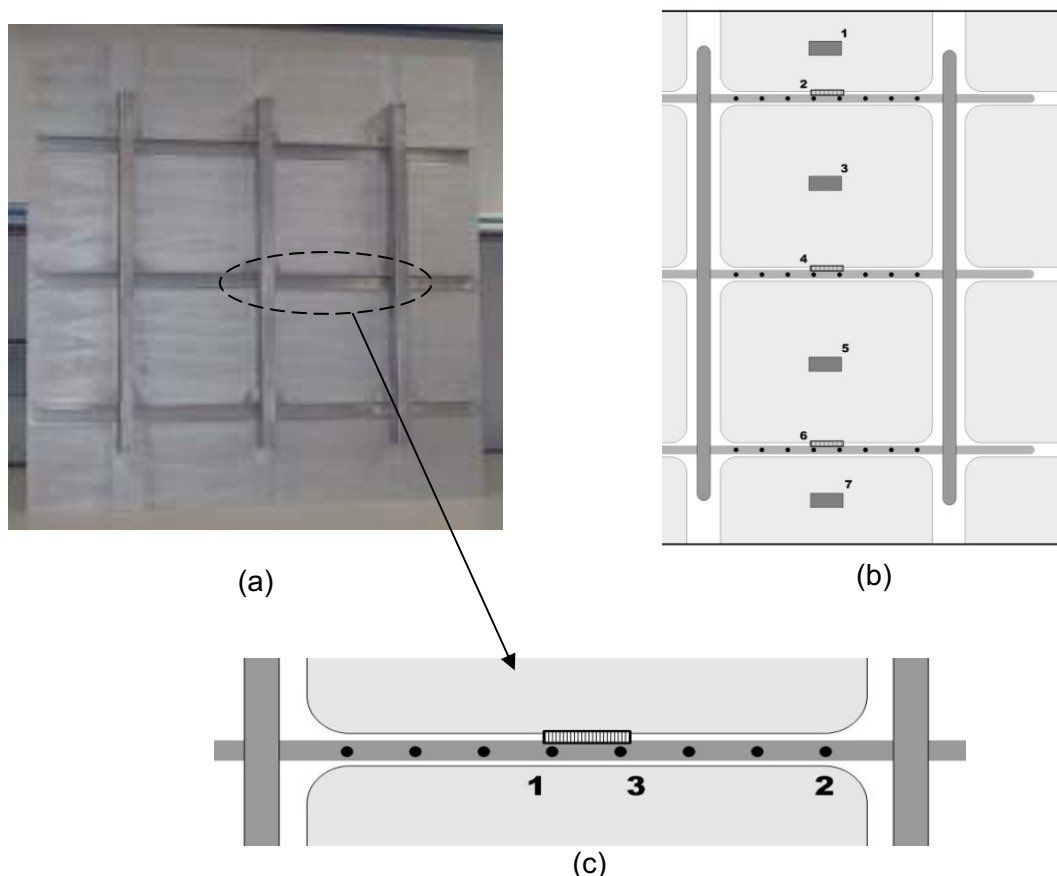


Figura 3.11: (a) Componente aeronáutico utilizado. (b) Posições dos PZTs colados à estrutura. (c) Vista detalhada dos rebites a serem retirados.

A região de dano é detalhada na Fig.3.11(c), onde são ilustradas as posições dos rebites a serem retirados, bem como a ordem de retirada dos mesmos. Além disso, a estrutura foi suspensa por cabos a fim de se obter uma condição de contorno próxima da livre-livre.

Desta forma, do ponto de vista da estrutura, foram analisados quatro pontos de observação e análise da sua integridade estrutural:

- *Baseline*, com a estrutura intacta.
- Dano na estrutura sem o rebite 1, condição chamada de R_1 .
- Dano na estrutura sem os rebites 1 e 2, condição chamada de R_2 .
- Dano na estrutura sem os rebites 1, 2 e 3, condição chamada de R_3 .

Para cada uma das condições acima, as duas técnicas (impedância eletromecânica e ondas de Lamb) foram aplicadas, sendo a impedância eletromecânica observada nos PZT3 e PZT5, e as ondas de Lamb adquiridas no PZT3 e PZT5, uma vez que foram excitadas pelos PZT7 e PZT1, respectivamente. Vale lembrar que nesta técnica o método de diagnóstico utilizado é o *pitch-catch*.

Para a análise pela técnica da impedância eletromecânica foi utilizado o analisador de impedância HP4194A, configurado para uma faixa de observação da impedância dos PZTs citados entre 35 kHz e 45 kHz, nível do oscilador em 1V, realizando internamente 16 médias para cada dado adquirido.

Tabela 3.2 – Sumário dos tipos de excitações *morlet* utilizados no experimento de ondas de Lamb.

Frequência	Amplitude	Número de Períodos
8.300 Hz	3V	6
11.100 Hz	3V	5
14.300 Hz	5V	10

Já para a análise pelas ondas de Lamb, foram utilizadas excitações *morlet* conforme detalhadas na Tabela 3.2. Os dados foram adquiridos através de uma placa de captura USB e *software* desenvolvido na plataforma *LABVIEW*[®].

Tabela 3.3 – Sumário da configuração geral dos experimentos realizados.

Técnica Utilizada	Frequência Analisada	Ponto de medição	Número de Amostras
Impedância Eletromecânica	De 35 kHz a 45 kHz	PZT3	50
		PZT5	50
Ondas de Lamb	8,3 kHz	PZT3	500
		PZT5	500
	11,1 kHz	PZT3	500
		PZT5	500
	14,3 kHz	PZT3	500
		PZT5	500

Mais uma vez, buscando maior confiabilidade para os dados obtidos, foram realizadas várias repetições em cada experimento. Devido à quantidade maior de repetições neste experimento, considera-se que, do ponto de vista estatístico, não há necessidade de se

realizar testes de normalidade. Sendo assim, a Tabela 3.3 exibe a configuração global dos experimentos a serem realizados envolvendo a estrutura.

A definição dos valores de frequência de excitação da estrutura (8.300 Hz, 11.100 Hz e 14.300 Hz) foi feita através de um ensaio prévio no corpo de prova, onde o dano foi simulado pela adição de massa à estrutura. Assim, foram testados valores de frequência que obedecessem aos critérios mencionados na Seção 2.6 e também às limitações físicas do equipamento de aquisição.

Desta forma, os dados obtidos em cada uma das etapas descritas do experimento são detalhados nas subseções 3.2.2 e 3.2.3.

3.2.2. Resultados obtidos pela técnica de Impedância Eletromecânica

Nesta etapa foram adquiridos sinais de impedância nos sensores PZT3 e PZT5 respectivamente, na faixa de frequência de 35 kHz a 45 kHz, adquirindo 50 dados em cada um. As Figuras 3.12 e 3.13 exibem estes sinais após tratamento com a métrica RMSD. Para ambas as métricas percebe-se um incremento no valor da métrica depois de ocorrido o dano, o que indiretamente indica uma alteração no valor da impedância da estrutura.

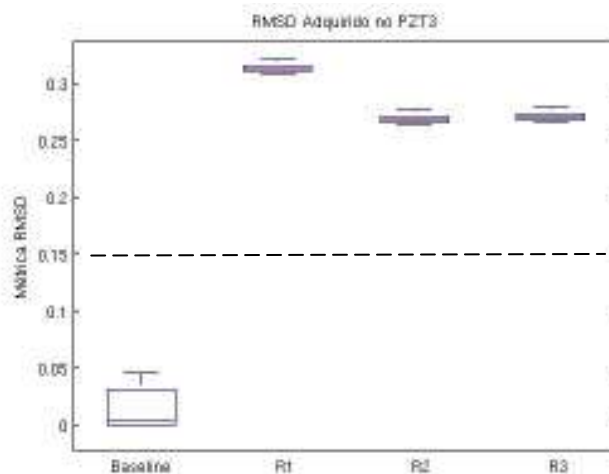


Figura 3.12. Gráfico *BOXPLOT* para o RMSD tomado no PZT3.

Claramente, este ensaio conseguiu evidenciar a perda dos rebites para todos os estados (R_1 , R_2 e R_3) considerados, especialmente os dados colhidos no PZT3 onde se consegue separar linearmente os valores das métricas nas diferentes condições. Já os dados coletados no PZT5 apresentaram um valor maior da métrica para os estados R_2 e R_3 , indicando uma maior sensibilidade para estes casos.

As diferentes variações entre as métricas apresentadas nos PZTs podem ser justificadas pelo fato de estarem colocados em locais diferentes da peça, o que pode implicar uma assinatura de impedância diferente em cada ponto. Além disso, pode haver diferenças na colagem de cada elemento piezelétrico à estrutura, o que influencia diretamente a eficiência com que o movimento da pastilha de PZT é transmitido para a estrutura.

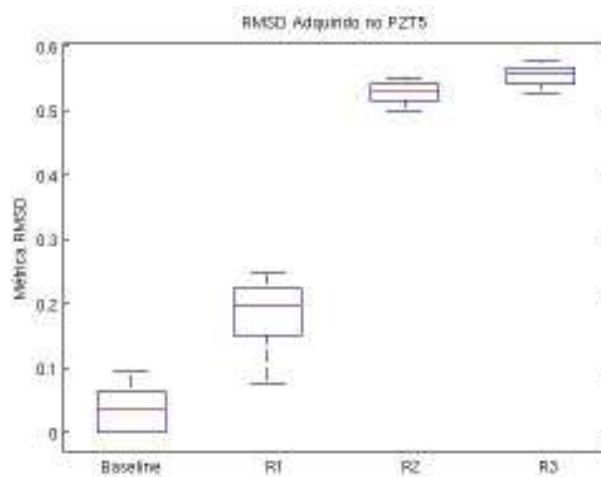


Figura 3.13. Gráfico *BOXPLOT* para o RMSD tomado no PZT5.

Sendo assim, foram realizados testes de hipóteses estatísticas para se estimar a diferença entre as médias dos diferentes conjuntos de dados. Dessa forma, o primeiro teste de hipótese é proposto da maneira especificada abaixo:

- H_0 : As médias de *baseline* e R_1 são iguais;
- H_1 : As médias de *baseline* e R_1 são diferentes;

A Tabela 3.4 exibe os valores obtidos neste teste de hipóteses.

Tabela 3.4 – Sumário dos testes de hipóteses de diferenças de médias entre o *baseline* e R_1 para o experimento referente à Impedância Eletromecânica.

DADOS	Valor-P	Diferença estimada (95%)	Hipótese aceita
PZT3	0,000	(-0,30456; -0,29336)	H_1
PZT5	0,000	(-0,1714; -0,1301)	H_1

Assim, consegue-se estabelecer o intervalo de confiança para a diferença entre os estados, sendo que esta se encontra dentro de níveis aceitáveis para se poder afirmar a detecção do dano. O PZT 5 obteve um desempenho inferior, expresso na menor diferença estimada quando comparado com o PZT 3. As razões possíveis foram mencionadas anteriormente. Além disso, pode-se evidenciar a detecção da perda dos demais rebites (estados R2 e R3) realizando testes de hipóteses adequados, mas estes casos não serão apresentados neste trabalho, evitando-se simples repetição de procedimentos semelhantes.

3.2.3. Resultados obtidos pela técnica das ondas de Lamb.

Já nesta subseção, são exibidos os resultados para o experimento com as três frequências escolhidas para a aplicação da técnica com as ondas de Lamb. Primeiramente, excita-se a estrutura através do PZT7 e o sinal é adquirido no PZT3; logo em seguida promove-se a excitação da estrutura através do PZT1 e a aquisição do sinal é feita no PZT5.

A Fig(3.14) exibe os valores da métrica *Damage Index* obtidos nestas condições.

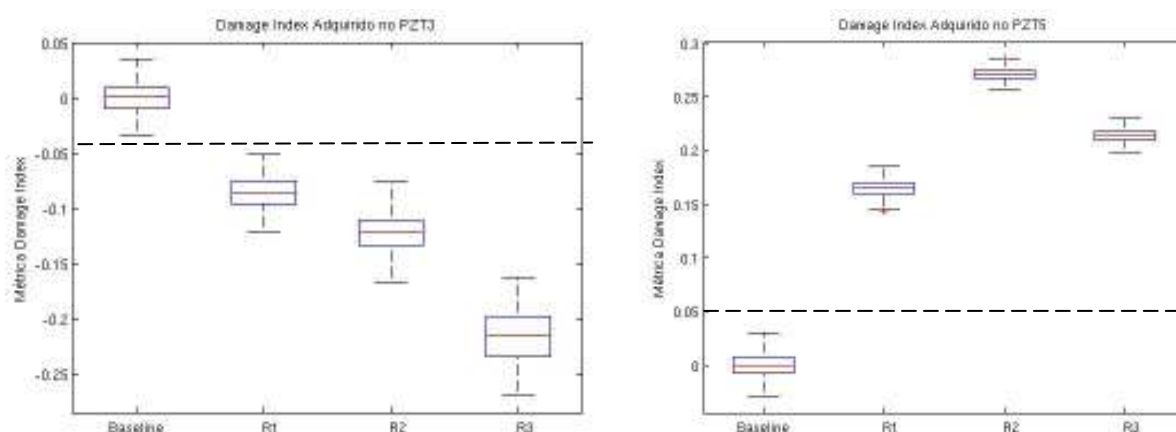


Figura 3.14a. Gráfico *BOXPLOT* para o *DI* tomado no PZT3 e PZT5 em 8.300 Hz.

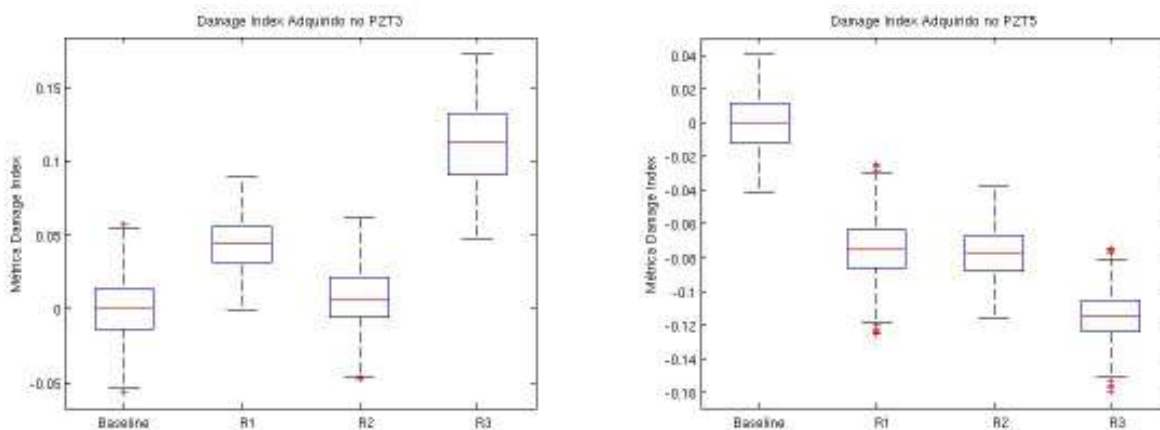


Figura 3.14b. Gráfico *BOXPLOT* para o *DI* tomado no PZT3 e PZT5 em 11.100 Hz.

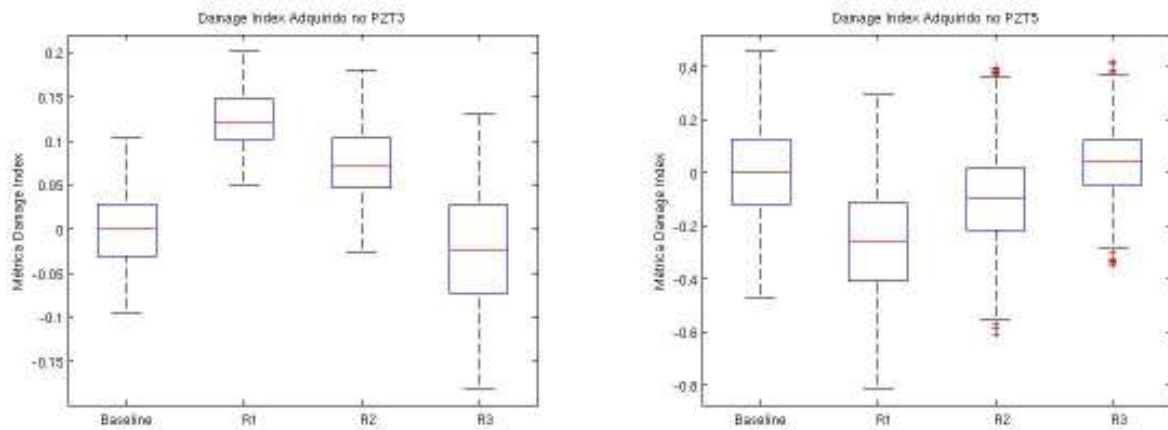


Figura 3.14c. Gráfico *BOXPLOT* para o *DI* tomado no PZT3 e PZT5 em 14.300 Hz.

Nota-se no experimento referente a 8.300 Hz que, enquanto no PZT3 houve um decréscimo da métrica (indicando o aumento da energia propagada após o dano), o PZT5 acusou um acréscimo no valor da métrica, indicando exatamente o oposto do ocorrido com o PZT3. Também nos demais experimentos (11.100 Hz e 14.300Hz) é observada a tendência de oposição do comportamento, mais acentuadamente no experimento de 14.300 Hz, observa-se a variação cuja concavidade é oposta em cada um dos sensores PZT.

Tais variações podem ser justificadas pelo efeito do rebite na propagação da onda mecânica ao longo da estrutura. Considerando que esta estrutura é relativamente complexa, o efeito da perda dos rebites na propagação da onda mecânica produziu uma variação positiva da energia incidente (ver, por exemplo, a frequência de 8.300 Hz no ponto em que o PZT3 foi colado); já no ponto em que se encontra o PZT5 verifica-se o contrário. Isto também pode indicar a transferência da concentração da energia entre os diferentes lados da região do dano na medida em que este vai se instalando na estrutura.

Assim, o ensaio de 8.300 Hz conseguiu visualmente detectar a evolução da perda dos rebites de uma forma evidente, conforme indicado pela reta imaginária traçada. Tal afirmativa pode ainda ser embasada estatisticamente através do teste de hipóteses proposto a seguir, e cujos valores obtidos são apresentados na Tabela 3.5:

- H_0 : As médias de *baseline* e R_1 são iguais;
- H_1 : As médias de *baseline* e R_1 são diferentes;

Ao analisar os dados obtidos, conclui-se que a frequência que melhor foi capaz de detectar o dano foi a de 8.300 Hz. Também é observada a queda no desempenho da técnica nas frequências superiores, e tal afirmativa pode ser embasada estatisticamente pelo intervalo de confiança da diferença entre as médias dos estados.

Tabela 3.5 – Sumário dos testes de hipóteses de diferenças de médias entre *baseline* e R_1 para o experimento com as ondas de Lamb.

DADOS	Valor-P	Diferença estimada (95%)	Hipótese aceita
PZT3 em 8,3 kHz	0,000	(0,21297; 0,21773)	H_1
PZT3 em 11,1 kHz	0,000	(-0,04656; -0,04169)	H_1
PZT3 em 14,3 kHz	0,000	(-0,12875; -0,11966)	H_1
PZT5 em 8,3 kHz	0,000	(-0,165812; -0,163289)	H_1
PZT5 em 11,1 kHz	0,000	(0,07237; 0,07690)	H_1
PZT5 em 14,3 kHz	0,000	(0,2386; 0,2895)	H_1

Já no caso especial do experimento com a frequência de 14.300 Hz, onde a diferença é maior que a aquela obtida na frequência de 8.300 Hz quando observado o PZT5, percebe-se que na medida em que os demais rebites são retirados da estrutura, esta diferença diminui. Tal fato pode ser evidenciado por uma nova série de testes de hipóteses, cuja formulação é dada a seguir e os dados correspondentes são apresentados na Tabela 3.6:

- H_0 : As médias de *baseline* e R_3 são iguais;
- H_1 : As médias de *baseline* e R_3 são diferentes.

Tabela 3.6 – Sumário dos testes de hipóteses de diferença de médias entre *baseline* e R_3 para o experimento com as ondas de Lamb.

DADOS	Valor-P	Diferença estimada (95%)	Hipótese aceita
PZT3 em 8,3 kHz	0,000	(0,21297; 0,21773)	H_1
PZT3 em 11,1 kHz	0,000	(0,113305; 0,117099)	H_1
PZT3 em 14,3 kHz	0,000	(0,01785; 0,03166)	H_1
PZT5 em 8,3 kHz	0,000	(-0,214990; -0,212647)	H_1
PZT5 em 11,1 kHz	0,000	(-0,11487; -0,10869)	H_1
PZT5 em 14,3 kHz	0,000	(-0,0612; -0,0210)	H_1

Assim, o experimento na frequência de 14.300 Hz usando o sensor PZT5 apresenta uma diferença contida no intervalo de (0,2386; 0,2895) para o estado R_1 , e logo decai para um intervalo inferior (-0,0612; -0,0210) quando ocorre o estado R_3 . Já o experimento de 8.300 Hz, também utilizando o PZT5, inicia o seu desempenho dentro do intervalo (-0,165812; -0,163289) para R_1 e segue no intervalo (-0,214990; -0,212647) para o estado R_3 ,

evidenciando mais ainda a instalação do dano à medida em que este aumenta sua severidade.

Desta forma conclui-se que, embora todas as frequências escolhidas tenham sido estatisticamente apropriadas para a identificação do dano, a frequência de 8.300 Hz se mostra a mais indicada sendo, portanto, a melhor escolha para qualquer tipo de análise envolvendo ondas de Lamb, dentro dos parâmetros estabelecidos no contexto aqui estudado.

CAPÍTULO IV

REDES NEURAIS APLICADAS AO RECONHECIMENTO DE PADRÕES EM SHM

Como visto no Capítulo 2, Redes Neurais são algoritmos computacionais capazes de serem treinados a executar alguma tarefa que envolva algum processo de generalização ou mesmo classificação de dados. Um bom exemplo de classificação de dados é o explorado por Fausett (1993), onde redes *perceptron-backpropagation* são utilizadas para o reconhecimento de códigos postais manuscritos.

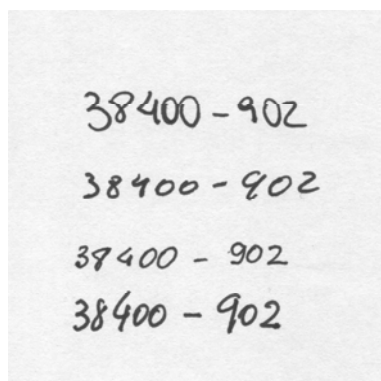


Figura 4.1 – Escrita de número CEP por quatro pessoas distintas.

Embora, para seres humanos, o reconhecimento de escrita possa ser algo natural para alguém alfabetizado, sob o ponto de vista computacional pode representar um desafio complexo.

A Figura 4.1 exibe o numero CEP escrito por quatro pessoas distintas, sendo uma boa representação da diversidade encontrada na escrita humana. Nota-se, por exemplo,

que o numeral “9” foi escrito completamente diferente por todas as pessoas, mas mesmo assim geralmente pessoas conseguem compreender que este símbolo representa o numeral “9”.

Já para um computador poder ter essa habilidade de classificar as diversas formas de um mesmo símbolo faz-se necessário que o algoritmo nele implementado possua capacidade de reconhecer padrões que nem sempre são explícitos. Desta forma, redes neurais podem ser aplicadas com sucesso neste processo (FAUSETT,1993).

A chave para toda a capacidade de generalização é o chamado processo de treinamento da rede neural, onde os diversos padrões conhecidos são impostos ao algoritmo, e o mesmo ajusta os seus pesos internos conforme detalhado no Capítulo 2.

Assim, de forma semelhante, busca-se neste capítulo a identificação de padrões utilizando redes neurais, uma vez que segundo Farrar; Lieven; Bement (2005) o problema de Monitoramento da Integridade Estrutural pode ser encarado como sendo essencialmente um problema de reconhecimento de padrões.

Buscou-se então elaborar uma metodologia alternativa de análise dos dados adquiridos nos experimentos relatados no Capítulo 3. Neste sentido, será implementada uma rede neural para se definir o estado de dano da estrutura, sendo o objetivo principal de se verificar a capacidade de detecção do dano por este método alternativo.

A grande vantagem, do ponto de vista prático, da utilização de redes neurais artificiais aplicadas a este caso específico é que, uma vez que a rede esteja treinada, muito pouco processamento computacional é requerido para se identificar o padrão. Não sendo necessário processar digitalmente o sinal para se obter a métrica, pois toda a análise por redes neurais é feita em cima dos dados como eles são coletados, ou seja, utilizam-se os dados brutos coletados automaticamente.

4.1 CONSTRUÇÃO DA REDE NEURAL

Antes de se construir a rede neural, faz-se necessário estabelecer alguns pontos chave para o seu funcionamento.

O primeiro deles é o de como será interpretada a resposta da rede neural, que está intimamente ligado a como que os dados podem ser classificados. Pelo fato da rede neural retornar uma saída numérica (um valor escalar real), definiu-se os estados a seguir:

- *Baseline*, com a estrutura intacta e representado pelo número inteiro 0.

- Dano na estrutura sem o rebite 1, estado chamado de R_1 e representado pelo número inteiro 1.
- Dano na estrutura sem os rebites 1 e 2, estado chamado de R_2 e representado pelo número inteiro 2.
- Dano na estrutura sem os rebites 1, 2 e 3, estado chamado de R_3 e representado pelo número inteiro 3.

Além disso, a região de dano é detalhada na Fig.3.11(c), onde são ilustradas as posições dos rebites a serem retirados, bem como a ordem de retirada dos mesmos. A estrutura foi suspensa por cabos a fim de se obter uma condição de contorno próxima da livre-livre.

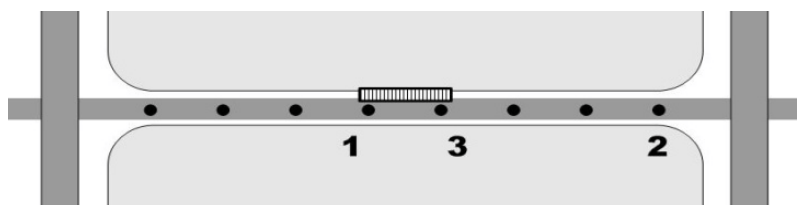


Figura 3.11(c) – Definição dos rebites a serem retirados da estrutura.

Já a saída da rede neural é um valor contínuo, por exemplo, poderia ser $0,21$. Este resultado mostra a capacidade de generalização da rede e mostra que a sua saída está muito mais próxima do padrão discreto representado pelo inteiro 0 do que do inteiro 1 , por exemplo. Assim, se de fato a entrada que levou a esta saída for uma pertencente ao padrão de valor 0 , pode-se medir o quão esta rede neural desviou-se do resultado esperado e, com isso, melhorar o seu treinamento ou quantificar a sua performance.

Outro ponto que é necessário se estabelecer são os parâmetros utilizados no treinamento da rede. Assim, selecionou-se uma das séries de experimentos realizados no capítulo anterior para utilizar os dados coletados no domínio do tempo pela pastilha de PZT nesta fase de treinamento. Foi escolhido o experimento realizado com as ondas de Lamb por ter se conseguido neste um maior número de medições pela funcionalidade da automatização da coleta dos dados conseguida por meio do sistema de aquisição implementado. Dentro desta série de experimentos foram escolhidas as medições feitas na frequência de 8300 Hz adquiridas pelo PZT5, por se considerar que estes foram os melhores resultados obtidos e pelo fato de que se deseja testar a capacidade de detecção do dano e não a robustez do método.

A título de ilustração, a Fig.4.1 exibe um exemplo de cada um dos sinais que a rede neural terá de classificar. Nota-se que os sinais são bastante similares entre si quando

analisados no domínio do tempo. A classificação destes sinais pode representar uma complexidade semelhante ao problema de identificação de dígitos manuscritos.

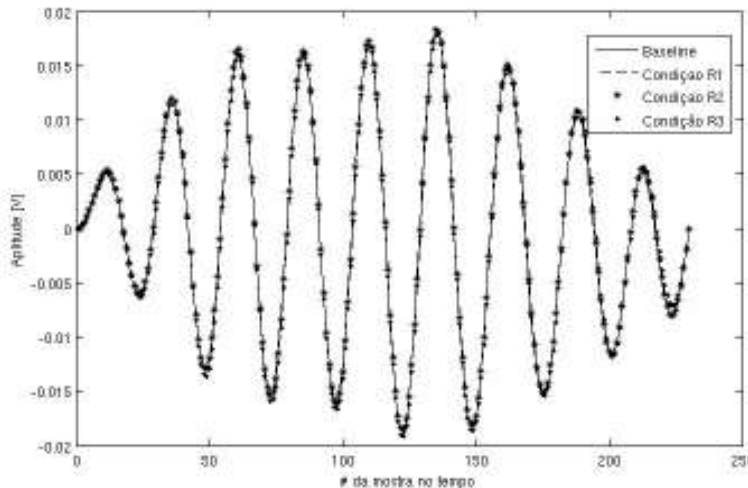


Figura 4.1 – Exemplo da variação entre os sinais no domínio do tempo.

Os mesmos dados utilizados para se treinar a rede neural não devem ser utilizados para testá-la. Desta forma, foram separadas 50 medições apenas para este fim. Assim, a rede neural contará, para cada um dos estados de dano da estrutura, com 500 medições para seu treinamento e 50 medições para teste e totalizando 200 testes no total.

As características adotadas para rede são as seguintes:

- Número de camadas: 3 (camada de apresentação, 1 camada oculta, camada de saída);
- Quantidades de Neurônios: {5,10,1} (10 neurônios na camada oculta);
- Função de Transferência da Camada Oculta: tangente sigmóide;
- Taxa de Aprendizagem: 10%;
- Número de épocas máximo: 50;
- Erro Tolerável mínimo: 10^{-5} ;
- O método de atualização dos pesos durante o treinamento foi o conhecido como *Backpropagation*.

Uma figura ilustrativa da topologia da rede neural aplicada ao reconhecimento da perda de rebites pode ser observada na Fig.4.2.

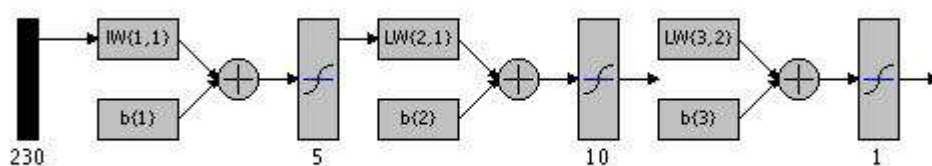


Figura 4.2 – Rede Neural para a identificação de perda de rebites.

O desempenho do treinamento é representado pela soma do erro absoluto de todas as entradas a cada época de treinamento. Como dito anteriormente, ela pode ser utilizada para se observar o quanto que esta rede desvia seus resultados do esperado.

Assim, o desempenho do treinamento realizado pode ser observado na Fig.4.3. Nota-se que o algoritmo convergiu, terminando o treinamento da rede neural em apenas 10 épocas, quando se alcançou a condição de erro mínimo aceitável. Isto significa que a topologia da rede neural se adaptou bem ao problema, já que 10 épocas representam um tempo de treinamento pequeno quando comparado com as demais tentativas sem sucesso.

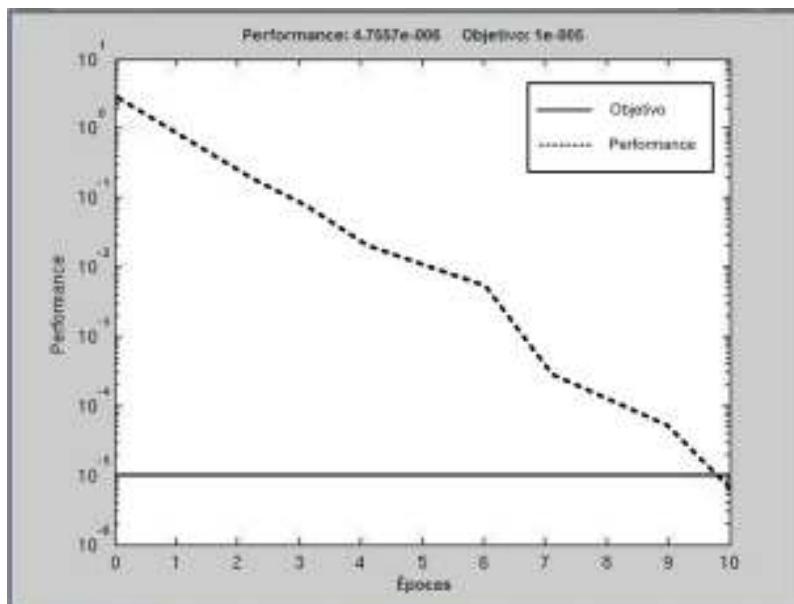


Figura 4.3 – Treinamento da Rede Neural para a identificação de perda de rebites.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS

Partindo da rede já treinada, pode-se então realizar um teste para evidenciar sua capacidade de classificação dos padrões. Nota-se na Fig.4.4 que o erro atingido na

classificação dos padrões permanece no entorno de 1% sobre o valor discreto nesta etapa, mostrando a capacidade da rede neural em classificar os sinais de dano.

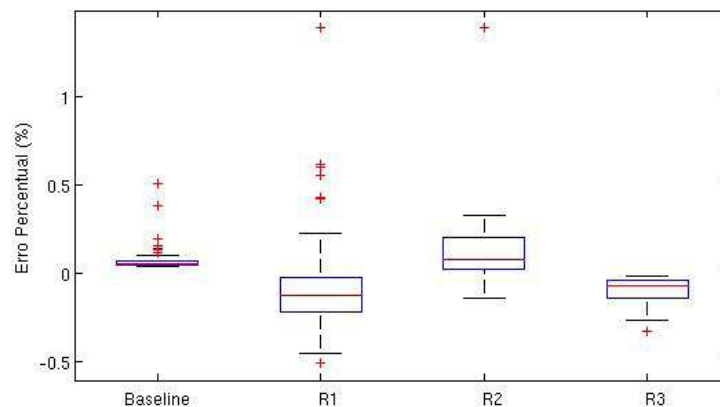


Figura 4.4 – Erros percentuais para a identificação da perda de rebites por redes neurais.

Este valor de erro quantifica a indecisão na classificação para cada dado inserido na rede. O erro percentual é calculado levando em consideração o valor esperado e o valor obtido. Considere, por exemplo, um valor esperado de 1,0 (para o caso R1) e o valor obtido de 1,0123. O erro percentual, neste caso, seria de +1,23%. A indefinição, neste caso, aponta entre os estados R1 e R2 (“1,0” e “2,0” respectivamente), mas por ser quantitativamente pequena, a rede classifica a saída como R1.

Assim, os valores obtidos a indicam uma baixa indecisão por parte da rede em classificar os padrões, e uma vez que estes diversos padrões não foram utilizados na etapa de treinamento, mostram também a capacidade de generalização da rede neural. Conseguiu-se classificar os 200 experimentos de teste nas quatro categorias definidas.

Vale ainda ressaltar que, um os fatores que mais influenciaram a capacidade da rede na classificação dos padrões foi a taxa de aprendizado. Assim, este pode ser considerado um fator determinante para a convergência da rede na etapa de treinamento.

CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as considerações finais do trabalho, bem como as perspectivas futuras de continuidade.

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma introdução ao tema Monitoramento de Integridade Estrutural e sua contextualização na engenharia atual. Assim, os conceitos fundamentais dos métodos utilizados nesta dissertação foram apresentados, juntamente com sua fundamentação teórica e o estado da arte, particularmente com relação a ambas as técnicas utilizadas (impedância eletromecânica e ondas de Lamb). Foram consideradas duas estruturas para os ensaios experimentais realizados: a primeira estrutura é uma viga de alumínio com um único rebite, configurando uma situação simples com uma falha importante (perda do único rebite); já a segunda estrutura é um painel de aplicação aeronáutica contendo vários rebites, representando uma situação mais próxima da realidade para aplicação de técnicas de SHM. Para o reconhecimento de padrões, foi feita uma proposta alternativa ao problema, aplicando redes neurais artificiais ao invés das métricas de dano utilizadas anteriormente ao longo do trabalho.

Ambos os métodos de monitoramento de integridade estrutural – o primeiro baseado na impedância eletromecânica e, o segundo, baseado nas ondas de Lamb – mostraram-se eficientes para a detecção de danos provocados por perda de rebites em estruturas

metálicas. Revelaram-se ainda bem adaptado às necessidades de segurança e manutenção da frota apresentadas pela indústria aeronáutica, que serviram de motivação para a realização deste trabalho.

Uma das grandes limitações encontradas nos ensaios foi a capacidade de reprodução dos experimentos, pois uma vez retirado o rebite (especialmente no caso da estrutura aeronáutica) o mesmo não poderia ser recolocado de forma idêntica devido às limitações técnicas do laboratório onde os ensaios foram feitos quanto a este procedimento. Assim, mesmo sendo consideradas ambas as técnicas de ensaio utilizadas como sendo não destrutivas, os ensaios acabaram apresentando um caráter destrutivo no sentido estrito, pois o rebite retirado não poderia ser novamente instalado em sua posição, reconstituindo fielmente a estrutura original.

Mas, apesar destas limitações técnicas, foi mostrado no capítulo 3 que ambas as técnicas se mostram sensíveis à identificação do dano imposto pela perda do rebite. Em especial no experimento com ondas de Lamb, foi mostrada a sensibilidade da técnica conforme a escolha da frequência de excitação, sendo esta um parâmetro-chave para sua implementação.

No capítulo 4 foi mostrada uma abordagem alternativa – redes neurais artificiais - que se mostrou eficiente para as configurações testadas e que pode representar uma opção interessante do ponto de vista computacional para a identificação dos padrões em *SHM*. Além disso, ao se considerar aplicações concretas de SHM, a utilização de redes neurais pode se uma alternativa bastante interessante devido à robustez do procedimento.

As contribuições mais importantes desta dissertação são as seguintes:

- Comprovação através de novos ensaios experimentais da eficiência do uso de materiais piezelétricos (pastilhas de PZT) como sensores-atuadores dedicados ao monitoramento da integridade estrutural;
- Aprofundamento da técnica de monitoramento de integridade estrutural usando ondas de Lamb;
- Comprovação do sucesso da metodologia na identificação de perda de rebite(s), apontando para aplicações concretas em engenharia;
- Processamento digital de sinais aplicados a SHM para obtenção das características da estrutura testada com ondas de Lamb;
- Desenvolvimento de técnicas de reconhecimento de padrões para SHM usando redes neurais artificiais;

5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Como perspectivas de trabalhos futuros, podem ser citadas:

- A utilização conjunta de ambas as técnicas utilizadas para detecção e localização de falhas em estruturas. No caso da aplicação da técnica de ondas de Lamb, investigar seu potencial para a localização do dano através do estudo do tempo de propagação da onda mecânica no meio físico considerado, de forma muito similar a um radar de pulsos;
- A utilização da técnica de redes neurais pode facilitar a implementação de soluções embarcadas, e de menor custo computacional. Pode-se assim disseminar a aplicação da técnica em ambientes com restrição de tamanho de equipamentos a serem transportados ou custos envolvidos para incorporação de técnicas de SHM;
- Finalmente, pode-se estudar o dano relacionado com a perda de rebites como sendo um processo de dano contínuo, onde há um afrouxamento do rebite e, posteriormente, sua perda completa. Desta forma, pode-se conseguir avaliar a evolução do dano na estrutura;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISON, P.S., 2002, **The Illustrated Wavelet Transform Handbook – Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance**, Taylor and Francis, 1st edition, USA.

AKHRAS, G., 2000, **"Smart Materials and Smart Systems for the Future"**, Canadian Military Journal, Vol.1 N° 3, pp 24-31.

BANKS, H.T.; SMITH, R.C.; WANG, Y. , 1996, **Smart Materials Structures – Modeling, Estimation and Control**. Paris: John Wiley & Sons.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. , 2002a, Influence of Structure– Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE. In: **Proceedings of ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems**, December 12–14 de 2002a, Bangalore, India (paper no ISSS-SA-502).

BHALLA, S.; NAIDU, A.S.K.; ONG, C.W.; SOH, C.K., 2002b, Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE. In **Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems**. December 16-18 de 2002b, Melbourne, Australia.

CHAUDHRY, Z., JOSEPH, T.; SUN, F.; ROGERS, C. . 1995, Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches. In: **Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference**. 1995. San Diego, CA. Proceedings of the SPIE. Vol.2443.

CHAUDHRY, Z.; LALANDE, F.; GANINO, A.; ROGERS, C., 1996, **Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors**. AIAA-1996-1074-CP.

DEBNATH, L., 2001, **Wavelet Transforms & Their Applications**, Boston, MA, USA, Birkhäuser Press.

FARRAR, C.R.; LIEVEN, N.A.J.; BEMENT, M.T., 2005, An Introduction to Damage Prognosis. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.1, pp. 1-12. 2005.

FAUSETT, L., 1993, **Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications**, Ed. Prentice Hall, 1993, ISBN 9780133341867.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A., 2002, Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for On-Line Structural Identification. **Journal of Vibration and Acoustics**. Vol. 124. p. 1-10. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A.; BAO, J.J., 2002, Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring. **International Journal of Structural Health Monitoring**. Vol. 1. p. 41–61. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N.; BAO, J.; REDMOND, J.; ROACH, D.; RACKOW, K., 2003, Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures. **International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management**. Vol. 6. NO. 1. p. 3–21. 2003.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A., 2005, Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structure with the Electro-Mechanical Impedance Method. **Structural Health Monitoring**. V. 4(2), p. 99-118, 2005.

HUYNH, D., HE, J., TRAN, D., 2005, **Damage Location Vector: A non-destructive Structural Damage Detection Technique**, Computers and Structures, N. 83.

IRWIN, J.D., 2003, **Introdução À Análise de Circuitos Elétricos**, Editora LTCE, ISBN: 8521614322, Brasil.

KOVÁCS, Z. L., 1996, “Redes Neurais Artificiais – Fundamentos e Aplicações”, Edição Acadêmica, São Paulo, Brasil.

LEMISTRE, M., GOUYON, R., KACZMAREK, H.; BALAGEAS, D., 1999, Damage Localization in Composite Plates Using Wavelet Transform Processing on Lamb Wave

Signals, **Second International Workshop on Structural Health Monitoring**, 1999, Stanford, USA.

LIANG, C., SUN, F.P., and ROGERS, C.A., 1994, Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. 1994. Vol. 5. p 12–20.

MASSOUD, M. , 1985, **Impedance Methods for Machine Analysis: Modal Parameters Extraction Techniques**. Université de Sherbrooke, Quebec, Canada, 1985. p. 4-14.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C., 2003, **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. ISBN: 8521613601

MOURA Jr, J. R. V.; STEFFEN Jr, V., 2004, **Impedance-Based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation**. XXII IMAC. Dearborn, MI, USA. 2004.

MOURA JR., J. R. V., 2004, **Métodos de Identificação de Falhas em Estruturas Aeronáuticas Utilizando Meta-Modelagem Aliada às Técnicas de Impedância e Estruturas Inteligentes**. 2004. 158 F. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOURA JR., J. R. V., 2008, **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais**. 2008. 264 F. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PALOMINO, L. V., 2008, **Análise das Métricas de Dano associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para Monitoramento de Integridade Estrutural**. 2008. 111 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J., 1999a, Impedance- Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications. **JSME International Journal**. Vol. 42. No. 2. p. 249–258.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., 1999b, Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures. In **Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials**. Proceedings of the SPIE. Vol. 3670. p. 461–469.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., 2000a, Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**. Vol. 6. No. 4. p. 153–160.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., 2000b, An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Vol. 11. No. 6. p. 448–455.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., 2001, Feasibility of Using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Systems. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**. Vol. 30. No. 10. p. 1463–1474.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R.; INMAN, D. J., 2003, Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward. **The Shock and Vibration Digest**. V.35, Issue 6. 2003. p. 85-92.

PARK, G.; INMAN, D. J., 2005, Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.1, pp. 1-12. 2005.

PEAIRS, D. M., 2006, **High Frequency Modeling and Experimental Analysis for Implementation of Impedance-based Structural Health Monitoring**. 2006. 150 f. Tese de Doutorado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C. E. S., 2005, Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.11, pp. 235-274. 2005.

RAJU, V., 1997, **Implementing Impedance – Based Health Monitoring**. 1997. 224 f. Tese de Mestrado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

SOH, C.K.; TSENG, K.; BHALLA, S.; GUPTA, A., 2000, Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge. **Smart Materials and Structures**. Vol. 9. p. 533–542.

SOHN, H., FARRAR, C. R., HEMEZ, F. M., SHUNK, D. D., STINEMATES, D. W., NADLER, B. R. A, 2003, **Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001**, Los Alamos National Laboratory, USA.

SOHN, H., 2005, **Statistical Pattern Recognition Paradigm Applied to Defect Detection in Composite Plates** in Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems, John Wiley & Sons Inc. Hoboken, NJ, USA.

SU, Z., YE, L., LU, Y., 2006 **Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: a review**. Journal of Sound and Vibration, vol. 295, p. 753-780.

SUN, F.P.; CHAUDHY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C.A., 1995, Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor–Actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Vol. 6. p134–139.

TAFNER, M.A., 2002, “**As Redes Neurais Artificiais: Aprendizado e Plasticidade**”. Campinas, SP, Brasil, <http://epub.org.br/cm/n05/tecnologia/plasticidade2.html>.

TSENG, K. K-H.; NAIDU, A. S. K., 2002, Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. **Journal Smart Material and Structures**. V.11, p. 317-329, maio.

TSURUTA, K. M., 2008, **Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica da Impedância Eletromecânica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.