

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PATO BRANCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANOROSVAL PEDRO LEIRIAS DA SILVA JUNIOR

**MONITORAMENTO ESTRUTURAL BASEADO NA TÉCNICA DE
ONDAS *LAMB* PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS
METÁLICAS PARAFUSADAS**

DISSERTAÇÃO

Pato Branco

2018

ANOROSVAL PEDRO LEIRIAS DA SILVA JUNIOR

**MONITORAMENTO ESTRUTURAL BASEADO NA TÉCNICA DE
ONDAS *LAMB* PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS
METÁLICAS PARAFUSADAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Análise de Estruturas

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Rogerio Novak

Pato Branco

2018

P586m Silva Junior, Anorosval Pedro Leirias da.
Monitoramento estrutural baseado na técnica de ondas *Lamb* para
detecção de falhas em estruturas metálicas parafusadas / Anorosval Pedro
Leirias da Silva Junior. -- 2018.
77 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Novak
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2018.
Bibliografia: f. 76 – 81.

1. Análise estrutural (Engenharia). 2. Dinâmica estrutural. 3. Construção
metálica. I. Novak, Paulo Rogério, orient. II. Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDD 22. ed.624



TERMO DE APROVAÇÃO Nº 17

Título da Dissertação

**"Monitoramento Estrutural Baseado Na Técnica De Ondas Lamb Para
Detecção De Falhas Em Estruturas Metálicas"**

Autor

Anorosval Pedro Leirias da Silva Junior

Esta dissertação foi apresentada às 14h do dia 22 de dezembro de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL– Linha de pesquisa em Materiais E Engenharia De Estruturas, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. O autor foi arguido pela Banca Examinadora abaixo assinada, a qual, após deliberação, considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Paulo Rogerio Novak

UTFPR/PB

Presidente

Prof. Dr. Giovani Alfredo Garnieri

UTFPR/PB

Examinador

Prof. Dr. Rodolfo André Kuche Sanches

USP/São Carlos

Examinador

Visto da Coordenação

Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Civil- PPGEC

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do PPGEC

Dedico este trabalho a minha mãe Carmens Marchioro e minha avó Maria Ferrari Marchioro (*in memoriam*), que sempre me colocaram no caminho do conhecimento e da descoberta.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, pela oportunidade de realização de trabalhos nesta área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEC, em especial à Erli, Rodrigo e Fabrício pelo coleguismo, amizade e auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

Ao Professor Dr Fabiano Ostapiv, pelas conversas no início desta etapa e o sempre franco companheirismo de anos.

Aos professores do curso, pela sua disposição e presteza em esclarecer, apresentar e ensinar além da matéria programada.

Ao Professor Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes, pela franqueza e pelo auxílio quando o tempo foi um dos problemas.

Em especial ao Professor orientador Dr. Paulo Rogério Novak, que enxergou em mim a possibilidade de levar este trabalho até o fim, e com calma e assertividade me conduziu. Obrigado pelo tempo que me cedeu, pela paciência, por compartilhar o conhecimento e pela simpatia.

Por fim, e mais importante, à minha esposa Carla, que compreendeu minha ausência em nossa família e com amor me apoiou em todas as fases. Sem você ao meu lado, este trabalho não seria possível.

O conhecimento torna a alma jovem e diminui a amargura da velhice.
Colhe, pois, a sabedoria. Armazena suavidade para o amanhã.

Leonardo Da Vinci

As coisas são mais belas quando vistas de cima.

Santos Dumont

RESUMO

SILVA JR, Anorosval Pedro Leirias da. MONITORAMENTO ESTRUTURAL BASEADO NA TÉCNICA DE ONDAS *LAMB* PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS PARAFUSADAS. 2018. 77f. Dissertação (Mestrado em Análise de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Este trabalho objetiva o estudo e a aplicação de um método de monitoramento da integridade de uma estrutura metálica baseado em ondas *Lamb*. Para o monitoramento são utilizadas pastilhas piezoelétricas, em função de seu baixo custo monetário. As pastilhas são utilizadas como atuadores e receptores empregando a propriedade dos materiais piezoelétricos que associa a impedância elétrica como impedância mecânica. O mecanismo da análise parte da criação de um sinal formado por um pulso elétrico no formato de ondas *Lamb* e sua aplicação em uma pastilha piezoelétrica fixada na estrutura em estudo, causando uma vibração que se propaga ao longo do elemento estrutural. Segue na captação dessa vibração por outra pastilha piezoelétrica também acoplada à estrutura que a converte em um sinal e finaliza na interpretação desse sinal. A onda *Lamb* que gera o pulso de excitação enviado ao elemento piezoelétrico é uma função *Wavelet*. A estrutura é monitorada em seu estado íntegro e em seu estado danificado. Com base nos estudos de vibração e uso da Transformada de *Wavelet* Contínua, comparam-se as leituras de sinais obtidos em ensaios realizados na estrutura íntegra em seguida na estrutura danificada. Utilizando uma métrica que correlaciona essas leituras, definida como Índice de Dano, verifica-se se o método detecta a existência de dano na estrutura. São executados três experimentos consistindo em uma estrutura formada por uma única viga metálica onde são fixados atuadores e receptores em posições variadas. Insere-se um parafuso em sua constituição, com a função de simular o dano. A estrutura contendo o parafuso configura seu estado íntegro e quando o parafuso é retirado da estrutura, tem-se o estado danificado. Os resultados dos ensaios permitem a avaliação qualitativa da detecção, em função da distância relativa à posição do dano. Também se utiliza um acelerômetro como receptor, visando obter um fator de comparação para os resultados obtidos. Decorrente da quantidade de dados observados se utiliza um tratamento estatístico com medidas resumo e dispersões para a análise. Conclui-se que a metodologia apresentada utilizando a técnica das ondas *Lamb* em conjunto com a aplicação do Índice de Dano produz resultados satisfatórios e pode ser utilizada como uma alternativa na interpretação de sinais onde o objetivo é a detecção de danos, visto que a metodologia foi capaz indicar a existência do dano independente da sua posição na estrutura proposta.

Palavras chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Ondas *Lamb*, Estruturas Metálicas.

ABSTRACT

SILVA JR, Anorosval Pedro Leirias da. MONITORAMENTO ESTRUTURAL BASEADO NA TÉCNICA DE ONDAS LAMB PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS PARAFUSADAS. 2018. 77f. Dissertação (Mestrado em Análise de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

This work aims at the study and application of a method of monitoring the integrity of a metal structure based on Lamb waves. For monitoring piezoelectric pads are used, in function on your low monetary cost. The pellets are used as actuators and receivers using the property of piezoelectric materials that associates the electrical impedance with mechanical impedance. The analysis part of the creation of a sign consisting of an electrical pulse in the Lamb waves and your format application in a piezoelectric structure mounted insert in study, causing a vibration that propagate along the structural element. Follows on the uptake of this vibration for piezoelectric other pad also coupled to the structure that converts it into a signal and terminates in the interpretation of this signal. The Lamb wave that generates the excitation pulse sent to the piezoelectric element is a Wavelet function. The structure is monitored in your healthy state and in your damaged state. Based on studies of vibration and use of Continuous Wavelet transform, compare the readings of signals obtained in trials conducted in full structure then the structure damaged. Using a metric that correlates these readings, defined as Damage index, the method detects the existence of damage to the structure. Three experiments are performed. The experiments consisting in the analysis of a structure formed by a single metal beam where actuators and receptors are disposed in various positions. Was inserted a screw in your Constitution, with the function to simulate the damage. The structure containing the screw configures your healthy state and when the bolt is removed from the structure, has been damaged. The results of the tests allow the qualitative evaluation of the discovery, on the basis of distance on the position of the damage. Also uses an accelerometer as a receiver, in order to obtain a comparison factor to the results obtained. Due to the amount of observed data was using a statistical summary measures treatment and dispersions for the analysis. It is concluded that the methodology presented using Lamb wave technique in conjunction with the application of the index of damage produces satisfactory results, and can be used as an alternative in the interpretation of signs where the goal is the detection of damage, Since the methodology was able to indicate the existence of damage regardless of your position in the proposed structure.

Keywords: Structural Integrity Monitoring, Lamb Waves, Steel Structures

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – (a) pastilhas com PZT; (b) membranas PVDF.	16
Figura 2 – (a) PZT abaixo da temperatura de Curie; (b) acima da temperatura de Curie e sob forte campo elétrico; (c) finalização do processo.	26
Figura 3– Esquema mostrando a direção de propagação das LW.	27
Figura 4– Modos de propagação de LW. (a) Ondas <i>Lamb</i> propagando em uma placa de espessura <i>d</i> ; (b)modos simétricos;(c) modos assimétricos.....	28
Figura 5 – Técnicas para detecção de danos por ondas <i>Lamb</i>	31
Figura 6 – (a) Ilustração de dilatação e translação de uma função <i>Wavelet</i> para valores dos parâmetros <i>a</i> e <i>b</i> . (b) Transformada de <i>Fourier</i> (espectro na frequência) para as <i>Wavelets</i> ilustradas em (a).....	36
Figura 7 – (a) Série temporal; (b) FFT aplicada em cada segmento da série temporal.	37
Figura 8 – Escalograma da série temporal mostrada no gráfico da Figura 7(a).....	38
Figura 9 – Construção de um típico <i>boxplot</i> e sua dispersão de dados.	41
Figura 10 – Vigas de alumínio V1, V2 e parafuso utilizados no experimento.	42
Figura 11–Esquema dimensional e de furação das vigas V1 e V2.....	43
Figura 12 – Pastilhas de PZT utilizadas nos experimentos.....	43
Figura 13–Esquema de posicionamento das pastilhas PZT nas vigas V1 e V2.	44
Figura 14 – Configuração <i>Pitch-Catch</i>	44
Figura 15 – Experimento 01 - Viga V2 com PZT's aplicados em pares relativos ao furo. Na posição 185 mm; posição 92 mm e posição 185 mm.	45
Figura 16 – Plotagem da função <i>Wavelet</i> de <i>Morlet</i>	46
Figura 17 – FFT do Pulso enviado para a pastilha PZT atuadora.....	46
Figura 18– Sinal emitido para as vigas V1 e V2	47
Figura 19 – Fluxograma do experimento.	48
Figura 20 – <i>Setup</i> do ensaio do Caso 01.....	49
Figura 21 – <i>Setup</i> do ensaio do Caso 02.....	51
Figura 22 – esquema de posicionamento do Caso 3 na viga B.	52
Figura 23 – <i>Setup</i> do ensaio do Caso 03.....	53
Figura 24 – Sinal recebido – Domínio do tempo – Viga V1. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.....	55
Figura 25 – Sinal recebido – Domínio da frequência – Vigas V1 (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.....	56

Figura 26 – Sinal recebido – Domínio do tempo – Viga V2. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.	57
Figura 27 – Sinal recebido – Domínio da frequência – Viga V2. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.	58
Figura 28 – CWT – Vigas V1. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.	59
Figura 29 – CWT – Vigas V2. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.	60
Figura 30 – <i>Boxplot</i> do DI na posição A 1 (185 mm).	61
Figura 31 – <i>Boxplot</i> do DI na posição B 2 (92 mm).	62
Figura 32 – <i>Boxplot</i> do DI na posição C 3 (50 mm).	62
Figura 33 – Sinal recebido – Domínio do tempo e no Domínio da Frequência – (a) Emissão posição A recepção posição 1; (b) Emissão posição B recepção posição 2; (b) Emissão posição C recepção posição 3.	64
Figura 34 – CWT – (a) Emissão posição A recepção posição 1; (b) Emissão posição B recepção posição 2; (b) Emissão posição C recepção posição 3.	65
Figura 35 – <i>Boxplot</i> do DI na posição do emissor em A (185 mm).	66
Figura 36 – <i>Boxplot</i> do DI na posição do emissor em B (92 mm).	66
Figura 37 – <i>Boxplot</i> do DI na posição do emissor em C (50 mm).	67

LISTA DE ABREVIATURAS

- CCDM - Coeficiente de Desvio de Correlação (*Correlation Coefficient Deviation Mean*)
- CM - Condição de acompanhamento (*Condition Monitoring*)
- COMAC - Coeficiente de correlação modal coordenado (*Coordinate Modal Assurance Criterion*)
- CWT - Transformada *Wavelet* Contínua (*Continuous Wavelet Transform*)
- DI - Índice de Dano (*Damage Index*)
- DP - Prognóstico de danos (*Damage Prognosis*)
- FEM - Método dos elementos finitos (*Finite Elements Method*)
- FFT - Transformada Rápida de *Fourier* (*Fast Fourier Transform*)
- FRF - Função de Resposta em Frequência
- HUMS - Monitoramento e uso da integridade do sistema (*Health and Usage Monitoring system*)
- IFM - Índice de Falha Métrica
- IRQ - Intervalo interquartil (*interquartile range*)
- LW - Ondas *Lamb* (*Lamb Wave*)
- MAC - Coeficiente de correlação modal (*Modal Assurance Criterion*)
- NDE - Avaliação não destrutiva (*Non destructive Evaluation*)
- NDT - Ensaio não destrutivo (*Non destructive Testing*)
- PVDF - Fluoreto de polivinilideno (*Polyvinylidene Flouride*)
- PZTs – Titanato zirconato de chumbo (*Lead Zirconate Titanate*)
- RMSD - Desvio Quadrático Médio (*Root-Means-Square Deviation*),
- SPC - Controle estatístico de processo (*Statistical Process Control*)
- WT - Transformada *Wavelet* (*Wavelet Transform*)
- SHM - monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring*)

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Relação tempo-frequência
$\psi(t)$	Função <i>Wavelet</i> -mãe
d_n	Índice de dano do concreto
D	Índice de dano baseado em energia
t	Tempo
a	Parâmetro ou coeficiente de dilatação
b	Parâmetro ou coeficiente de translação
ω_0	Frequência central da onda <i>Wavelet</i> de <i>Morlet</i>
S_n	Área de seção transversal original
\bar{S}_n	Área de resistência efetiva após a quebra do elemento
U	Energia no estado íntegro
\bar{U}	Energia no estado danificado
DI	Índice de dano
$Q_{1/4}$	Primeiro quartil
$Q_{2/4}$	Segundo quartil
$Q_{3/4}$	Terceiro quartil
c	Velocidade de propagação da onda
ω	Frequência angular
ϕ	Potencial Longitudinal
φ	Potencial Transversal
k_l	Número de onda longitudinal
k_t	Número de onda transversal
σ_{xx}	Tensão no plano xx
σ_{zz}	Tensão no plano zz
σ_{xz}	Tensão no plano xz

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	OBJETIVOS	20
1.1.1.	Objetivo Geral	20
1.1.2.	Objetivos Específicos	20
1.2.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	22
2.1.	MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL	22
2.1.1.	Definição de dano	22
2.1.2.	Processo SHM	23
2.2.	MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS.....	25
2.3.	ONDAS <i>LAMB</i> (LW – <i>LAMB WAVE</i>)	26
2.3.1.	Teoria das LW	26
2.3.2.	LW aplicadas a problemas de SHM	30
2.4.	ONDAS <i>WAVELET</i>	32
2.4.1.	<i>Wavelet Morlet</i>	33
2.5.	TRANSFORMADA <i>WAVELET</i>	33
2.5.1.	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua	34
2.6.	IDENTIFICAÇÃO DO DANO	38
2.7.	ESTATÍSTICA	39
2.7.1.	Medidas Resumo	40
2.7.2.	Medidas de Dispersão.....	40
3.	SHM BASEADO NAS ONDAS <i>LAMB</i>	42
3.1.	CASO 01.....	49
3.2.	CASO 02.....	50
3.3.	CASO 03.....	52
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54

4.1.	CASO 01.....	54
4.2.	CASO 02.....	64
4.2.1.	Medição cruzada com o acelerômetro	67
4.3.	CASO 03.....	69
5.	CONCLUSÕES	70
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, os estudos de soluções estruturais na elaboração de projetos estruturais de construção civil exigem concepções cada vez mais apuradas em função da diminuição e afastamento dos apoios disponíveis em conjunto com o aumento da altura dos pórticos condicionados aos partidos arquitetônicos contemporâneos. A decorrência disso é o aumento sensível dos efeitos patológicos em edificações, principalmente nas constituídas por pórticos visto que as peças, em menor número, assumem responsabilidades de maior monta quando comparadas a estruturas antigas. Assim se torna necessária a análise da estrutura no decorrer de sua utilização verificando sua integridade.

Nesse ponto, a detecção de danos estruturais de forma não destrutiva tem ganho crescente atenção da comunidade científica visto que pode indicar a necessidade de correção em situações de desgaste ou promover manutenções com antecedência a acidentes ou até em situações de maior perigo que possam envolver perdas humanas. Aspectos de segurança e economia também são motivações importantes para aumentar os estudos sobre monitoramento de integridade estrutural.

A detecção de dano é geralmente realizada mais estreitamente no contexto de uma ou mais disciplinas relacionadas, que incluem: monitoramento da integridade estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*), condição de monitoramento (CM – *Condition Monitoring*), avaliação não destrutiva (NDE – *Non destructive Evaluation*) – também denominado de ensaio não destrutivo (NDT – *Non destructive Testing*), monitoramento e uso da integridade do sistema (HUMS - *Health and Usage Monitoring system*), controle estatístico de processo (SPC – *Statistical Process Control*) e prognóstico de danos (DP – *Damage Prognosis*), conforme observado por Farrar e Worden (2013). O mesmo autor também descreve que o processo tem uma multidisciplinaridade, o termo monitoramento de integridade estrutural ou sua sigla SHM geralmente se refere ao processo de implementação de uma estratégia de detecção de danos para a indústria aeroespacial, civil ou infraestrutura de engenharia mecânica.

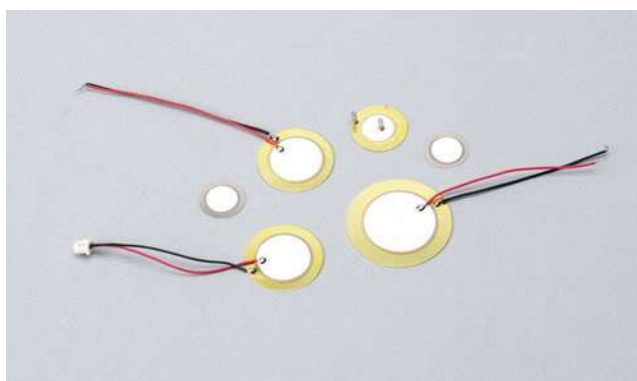
De acordo com Pandey & Biswas (1991), as estruturas danificadas sofrem alterações em suas características dinâmicas. As principais alterações ocorrem nas frequências naturais, no amortecimento e no modo de vibrar da estrutura, onde a análise modal experimental pode ser empregada. Tal afirmação traz à luz o entendimento das estruturas civis para além da Estática. No campo do SHM aplicam-se os conceitos da

Dinâmica, de análise de vibrações ou interpretação de sinais e materiais inteligentes dentre outros.

Materiais inteligentes possuem características de resposta a estímulos externos ou tem desempenho diferenciado em função de mudanças no meio em que estão inseridos exibindo um acoplamento entre vários domínios físicos, tais como mecânico, elétrico, térmico ou magnético. Como um exemplo, podemos citar os materiais piezoelétricos que possuem a propriedade de converter um sinal elétrico em tensão mecânica, também podendo converter no sentido contrário. O uso dos referidos materiais surge como uma proposta interessante a ser investigada em conjunto com a análise modal experimental e a interpretação de sinais.

Os materiais piezoelétricos têm destaque na área de sensores de medição, tendo como principal propriedade a sua capacidade de medir ou ser utilizado como sensor, entretanto caso seja a necessidade, pode funcionar satisfatoriamente como atuador. Dentre os materiais piezoelétricos mais comuns estão o PZT (*Lead Zirconate Titanate*) e o PVDF (*Polyvinylidene Flouride*), que podem, como dito anteriormente, funcionar como sensores ou atuadores em função do efeito de que se o sensor sofrer uma deformação ele produz uma diferença de potencial elétrico que pode ser mensurada e no outro caso, se ele receber uma diferença de potencial elétrico responderá com uma deformação. A Figura01 ilustra alguns dispositivos piezoelétricos do tipo PZT e membranas do tipo PVDF.

Figura 1 – (a) pastilhas com PZT; (b) membranas PVDF.



(a)



(b)

Fonte: *Websites* de internet ^{1e2}

¹<http://www.hardware.com.br/comunidade/sensores-piezoelétricos/984664/>

²<https://pt.aliexpress.com/item/0-45um-Millipore-Filter-Microporous-Membrane-Filter-Organic-Film-Diameter-50mm-PVDF-Microporous-Membrane-0-22um/32774988001.html>

No trabalho de Liang, Sun e Rogers (1996), observamos o uso de materiais inteligentes na análise modal experimental. Também é demonstrado que o equacionamento é tanto mais complexo quanto for o tipo de estrutura. Por outro lado, os trabalhos de Chen e Wang (2004), Wang, Chen e Chen (2006) e Wang e Wang (1997) apresentam uma abordagem do equacionamento diferente da citada por Liang, Sun e Rogers (1996). Nela são apresentadas equações genéricas para a formulação de uma função que relaciona a saída ou resposta da estrutura frente a uma frequência de excitação a ela aplicada, ou seja, a Função de Resposta em Frequência (FRF), utilizando materiais piezoelétricos. Também afirmam que a forma dos modos de vibrar de cada estrutura é dependente do tipo de sensor ou atuador utilizado no experimento. Nesses trabalhos há a discussão dos resultados de alguns testes de análise modal experimental utilizando primeiramente sensores do tipo PZT.

Com o objetivo de analisar a integridade estrutural de forma não destrutiva, a avaliação da diferença entre os sinais emitidos através de um atuador e detectados por um receptor tem um vasto campo de estudo, sendo necessária a definição do tipo do sinal a ser produzido para que possa ser captado e avaliado.

Observa-se que as ondas ultrassônicas conhecidas como ondas *Lamb* se caracterizam por se serem elásticas, se propagam em placas sólidas e cujo movimento de partículas está no plano que contém a direção da propagação da onda. Conforme descrito por Farias et al. (2011) e S. Javid e Farhang (2011) tem como vantagem a propagação a longas distâncias através de toda a espessura de estruturas em forma de placas. Farias et al. (2011) também citam que as ondas *Lamb* possuem percurso linear entre os transdutores, sendo o sinal recebido e suas características afetadas pelas alterações nas propriedades do material ao longo deste percurso. O que é de grande interesse no SHM, visto a necessidade de trazer alterações características da estrutura analisada.

Em contrapartida, o sinal detectado a partir do pulso emitido necessita de tratamento para ser interpretado devido ao caráter multimodo e características dispersivas dessas ondas. Para tal, são utilizadas transformações matemáticas que transcrevem funções de um domínio para outro. As transformações são particularmente importantes em processamento e análise de sinais porque no domínio transformado algumas propriedades relevantes do sinal ficam mais evidentes.

Pode-se citar a Transformada de *Fourier*, que representa no domínio da frequência um sinal temporal, propiciando a análise das frequências envolvidas e a Transformada *Wavelet*, que permite decompor um sinal em componentes que são

localizados em tempo via translação e escala via dilatação ou contração, possibilitando a análise tempo-escala.

Mais especificamente a Transformada *Wavelet* Contínua (CWT – *Continuous Wavelet Transform*) se mostra um método bastante útil para a análise de sinais não periódicos, ruidosos e transitórios. Conforme descrito por Sohn, et al. (2003) a habilidade da CWT em representar sinais tanto no domínio do tempo quanto no da frequência supera a desenvoltura da Transformada de *Fourier* que apenas representa sinais no domínio da frequência. Tal capacidade fez com que o uso da CWT se espalhasse nas mais diversas aplicações, dentre elas a identificação de falhas em estruturas mecânicas.

Em conjunto com a aplicação das transformadas matemáticas para a análise do sinal recebido, é necessária a aplicação de uma técnica ou métrica que relacione os dados coletados da estrutura em estudo, demonstrando de forma segura se existe a falha ou não na estrutura. Com base nisso, observa-se que o trabalho de Stubbs, et al. (1995) apresenta um esquema para localização de danos em estruturas de grande escala utilizando o conceito da energia de deformação, desenvolvendo um método denominado Incide de Dano (DI – *Damage Index*). Farrar e Worden (2013) apresentam um estudo baseado nessa técnica, onde as alterações nas distribuições das energias de deformação verificadas nos dados coletados em ensaios com estruturas em situações íntegras e as observadas nos dados dos ensaios nas estruturas danificadas podem ser utilizadas para detectar e localizar o dano.

Nesse campo, vários pesquisadores têm continuamente estudado o tema onde pode-se citar o trabalho de Villalba Morales (2012) que estudou a diferença das propriedades dinâmicas experimentais de estruturas danificadas comparando-as com modelos em elementos finitos das mesmas estruturas íntegras. Silva (2015), em um extenso trabalho contribui com uma metodologia de ensaios estáticos para detecção de danos em pontes, utilizando métodos baseados em transformadas de *Wavelet*. Já Prazzo (2011) traz a análise modal experimental utilizando tanto para leitura como para excitação elementos piezoelétricos, Santos et al. (2016) e Leucas (2009) tratam da localização de falhas com a utilização de materiais piezoelétricos e técnicas de ondas *Lamb*, diferenciando apenas o tipo de dado lido. Marqui (2007) estuda índices de falha métrica a partir da impedância elétrica gerada nos sensores e atuadores piezoelétricos. Igualmente utilizando sensores e atuadores piezoelétricos, Franco (2009) analisa a técnica das ondas *Lamb* com diferentes tipos de falhas estruturais abordando quatro índices de dano, sendo eles o Desvio Quadrático Médio (RMSD - *Root-Means-Square Deviation*), Índice de

Falha Métrica (IFM), Norma H2 e Coeficiente de Desvio de Correlação (CCDM – *Correlation Coefficient Deviation Mean*). Há nos citados Silva (2015), Santos et al. (2016) e Leucas (2009) estudos da métrica DI demonstrando a aplicabilidade da metodologia.

Este trabalho analisa uma estrutura metálica com um parafuso em sua constituição. Utiliza-se um método de SHM baseado em ondas *Lamb* (LW - *Lamb Wave*).

A estrutura em análise é inicialmente íntegra. É formado um sinal elétrico correspondente a uma função *Wavelet* no formato de LW que é aplicado em uma pastilha de PZT acoplada em um ponto da estrutura. A pastilha gera uma vibração, que se propaga pela estrutura. Essa excitação é captada por outra pastilha de PZT em outro ponto do elemento estrutural, a qual transforma a vibração em sinal e o transmite para um banco de dados. Em seguida, é imputada na mesma estrutura, um dano. Refaz-se a aplicação e leitura do sinal. Armazena-se os dados da estrutura danificada em outro banco de dados.

Em um segundo experimento, o sinal recebido foi lido por um acelerômetro posicionado na face oposta da estrutura donde está fixada a pastilha de PZT.

Os dados recebidos são analisados com a CWT e para a tomada de decisão sobre a existência do dano, utiliza-se a metodologia do DI.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o problema de detecção de falhas estruturais, apresentando suas teorias, equacionamentos e métodos de resolução. Visa, em uma estrutura metálica reduzida, o estudo de uma metodologia capaz de identificar a existência de falhas ou danos estruturais baseada na aplicação de ondas *Lamb*, as quais serão emitidas e detectadas por atuadores e receptores piezoelétricos acoplados na estrutura.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar estudos de caso de problemas de detecção de danos em estruturas;
- Realizar a aplicação e detecção de ondas ultrassônicas em estruturas metálicas utilizando sensores e atuadores de baixo custo;
- Realizar o tratamento matemático e estatístico dos dados detectados em leituras diretas da estrutura;
- Realizar uma análise de verificação de resultados aplicando o método de identificação de dano, DI.
- Avaliar a sensibilidade da detecção do dano estrutural em relação à distância dos sensores e atuadores.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2, apresenta-se a revisão de bibliografia. Inicia-se pela técnica de monitoramento de integridade estrutural. Logo após aborda-se a teoria dos materiais piezoelétricos, apresentando as suas características de relações entre os domínios mecânico e elétrico. Em seguida é descrito o processo baseado em LW, bem como a Transformada de *Wavelet* Contínua, ferramenta matemática essencial para este trabalho. Por fim, apresenta-se a formulação do Índice de Dano, onde sua proposição é demonstrada. Nos tópicos seguintes se aborda o sistema estatístico a ser utilizado para a compilação dos dados armazenados para a composição do trabalho.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para os procedimentos adotados nas simulações do problema de detecção de dano, bem como a instalação dos experimentos. É elencado o procedimento experimental para as três análises apresentadas neste trabalho que conta com vigas de alumínio utilizadas nos experimentos. Os resultados obtidos no estudo e nas simulações dos problemas de detecção de dano, bem como a discussão dos resultados são apresentados no capítulo 4. O estudo é finalizado com a explanação das principais conclusões deste trabalho, além de algumas sugestões para novas pesquisas no capítulo 5.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Aqui se apresenta o referencial teórico utilizado no trabalho. Estão reunidos textos de vários autores com os conceitos e críticas que servem de base para o trabalho.

2.1. MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Neste item, serão revisados temas relevantes do SHM fundamentais à proposta de estudo.

2.1.1. Definição de dano

Nos termos mais gerais, os danos podem ser definidos como mudanças introduzidas em um sistema que afeta negativamente seu desempenho atual ou futuro. Implícito nessa definição é o conceito de que o dano não é significativo sem uma comparação entre dois estados diferentes do sistema, um dos quais é assumido como representando o estado inicial e, muitas vezes, não danificado (Sohn, 2003).

Já para Farrar et al. (2005), as condições de carregamento que causam danos e a subsequente falha, se classificam em três categorias: A primeira categoria é o desgaste gradual, em que o dano se acumula lentamente ao nível do material ou componente, muitas vezes em escala microscópica. Um exemplo disso é a corrosão de componentes estruturais metálicos. A segunda categoria são eventos discretos previsíveis; embora os danos tipicamente ainda se originem na escala microscópica, se acumulam a taxas mais rápidas durante eventos repentinos que podem ser caracterizados a priori. A aterrissagem de uma aeronave é vista como um evento discreto previsível que pode vir a acumular danos no trem de pouso ou na estrutura. E por último, na terceira categoria se encontram os eventos discretos imprevisíveis, onde carregamentos severos e desconhecidos são aplicados no sistema em instantes de tempo também desconhecidos. Muitos fenômenos naturais, tais como terremotos, furacões ou explosões podem produzir tais eventos discretos imprevisíveis.

Também se define que o dano é contido em um sistema estrutural e limitado a mudanças nas propriedades dos materiais constituintes ou modificações geométricas da peça ou estrutura analisada. Seus parâmetros modais, baseados nas frequências naturais,

modos de vibração e amortecimentos modais, podem ser entendidos como funções das propriedades físicas (massa, amortecimento e rigidez) de uma estrutura. Dessa forma, quaisquer mudanças nas propriedades físicas implicam em alterações nos parâmetros modais.

Apesar dessa definição parecer simples, sua aplicação se mostra desafiadora, pois se vê que o dano é normalmente uma alteração localizada e dependendo de seu tamanho ou forma, pode não influenciar significativamente a resposta global de baixa frequência da estrutura, frequências essas que normalmente são medidas em testes de vibração. Outra dificuldade é possuir dados da situação íntegra para a comparação com a situação atual ou danificada. Assim, os desafios aumentam quando se incluem situações práticas como, por exemplo, onde realizar as medições, visto que o dano também pode estar relacionado com mudanças nas condições de contorno da estrutura.

2.1.2. Processo SHM

O processo SHM é utilizado de forma estratégica para a detecção de danos em estruturas. Sua implementação depende de um acompanhamento de uso, que retenha dados das respostas dinâmicas da estrutura antes da ocorrência de dano se ao longo do tempo, por meio de uma matriz de sensores. Assim, é possível definir um prognóstico pelo acompanhamento das informações vindas do monitoramento, que são base para a modelagem numérica que estima a vida útil remanescente do sistema estrutural. Depois de eventos danosos, o SHM é usado para o rastreamento da estrutura, tendo como objetivo fornecer, em tempo real, informações confiáveis sobre a integridade da estrutura.

Sohn, et al. (2003), revisaram vários documentos científicos acerca do processo evolutivo do SHM no período de 1996 a 2001, objetivando demonstrar as principais definições e contribuições de várias áreas do conhecimento. Descreve também que houve pouco avanço no campo da modelagem estatística até a finalização do seu estudo. Porém, o trabalho de Jain et al. (2000), traz uma revisão e comparação de métodos estatísticos de reconhecimentos de padrões aplicados à técnica de redes neurais e de aprendizagem estatística (*statistical learning*), demonstrando a possibilidade de seu uso nos estudos de SHM.

Nesse sentido Farrar e Worden (2013), contextualiza o SHM observando que se deseja associar os dados medidos da estrutura com algum estado danoso, e observa que o

problema mais simples e mais importante desse processo é distinguir entre os estados “saudável” e “danificado”. Pois a interpretação da estrutura sadia pode ser rotulada com base na comparação de inúmeras representações de estruturas sadias, bem como às relativas a estruturas danificadas, gerando um paradigma. Este se pautava nos limites da interpretação do que é sadio e do que é danificado podendo ser confundidos ou superpostos. Deste modo se faz necessário um reconhecimento de padrões estatísticos que demonstrem claramente quais são os dois estados, permitindo que os processos de análises estatísticas tais como *statistical learning* e redes neurais sejam aplicáveis.

Generalizando, um padrão de reconhecimento estatísticos (SPR – *Statistical Pattern Recognition*) para um sistema SHM pode ser definido através da integração de quatro procedimentos (Farrar, Doebling e Nix, 2001):

1. Avaliação operacional;
2. Aquisição de dados;
3. Seleção de recursos;
4. Modelagem estatística para discriminação de características.

Por fim, o processo SHM tem como objetivo, responder as seguintes questões, segundo Rytter (1993):

1. Existe algum dano no sistema (existência)?
2. Onde está o dano no sistema (localização)?
3. Que tipo de dano está presente (tipo)?
4. Quão grave é o dano (extensão)?
5. Qual é a vida útil (segura) (prognóstico)?

Assim verifica-se uma escala crescente no conhecimento do dano. Farrar e Worden (2013), afirmam que modelos estatísticos baseados em resumos e dispersões tais como médias e desvios-padrão são utilizados para verificar a existência do dano e em alguns casos verificar sua localização. Quando aplicada a técnica de *statistical learning* acoplada a modelos analíticos, os procedimentos estatísticos podem, em teoria, ser utilizados para determinar o tipo e a extensão do dano.

2.2. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

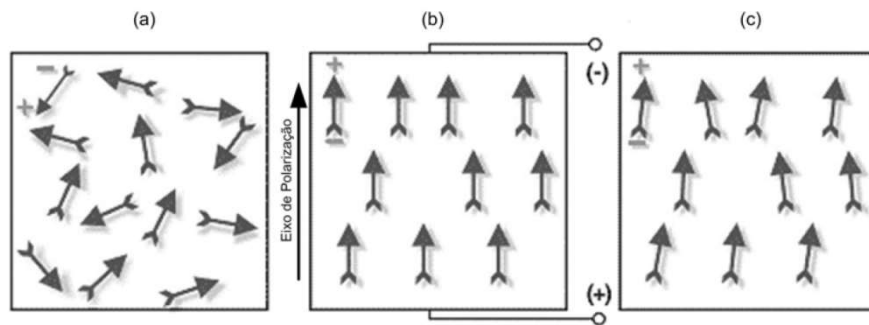
Os materiais piezoelétricos possuem uma história que se inicia em 1880, a partir das observações do físico francês Pierre Curie. Em Currie e Currie (1880) demonstra-se que quando se aplica de um esforço mecânico sobre um determinado material cristalino, há uma modificação na polarização elétrica do referido material, isto é, há uma diferença de potencial. Este efeito é conhecido como efeito direto. Já em Currie e Currie (1881), demonstra-se o inverso, consistindo na aplicação de um campo elétrico que produz uma deformação do material cristalino. Tal efeito, contrário ao efeito direto, denomina-se efeito inverso.

A palavra Piezo vem do grego “*piezein*” que significa pressionar. Dessa forma, Piezoeletricidade (“eletricidade de pressão”) define-se pela capacidade de alguns materiais se tornarem eletricamente polarizados quando sujeitos a algum tipo de pressão. Assim chamam-se de piezoelétricos os materiais que possuem propriedades de criar uma diferença de potencial quando pressionados. Lembrando que o efeito de piezoelétrico é reversível, pois os cristais piezoelétricos, quando sujeitos a uma tensão elétrica externa, podem sofrer variações de forma.

Um dos materiais mais utilizados e populares são as cerâmicas PZT, descoberto por Jaffet et al.(1954). Como sua abreviatura já induz, as cerâmicas são formadas por óxido de chumbo, zircônio e titânio. Possuem grande rigidez, em torno de 70 GPa, sendo normalmente utilizado como atuadores.

Os PZT's são produzidos alinhando seus dipolos elétricos em domínios microscópios, usando para isso um forte campo elétrico e temperaturas elevadas acima da temperatura de Curie, temperatura na qual o magnetismo permanente de um material se torna um magnetismo induzido. Esse aquecimento resulta em uma polarização macroscópica que favorece o acoplamento eletromecânico, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – (a) PZT abaixo da temperatura de Curie; (b) acima da temperatura de Curie e sob forte campo elétrico; (c) finalização do processo.



Fonte: Leucas (2009)

Como resultado desse acoplamento, o material se deformará em resposta a um campo elétrico externo, o que confere ao material a capacidade de atuação, ou seja, efeito inverso. A capacidade de sensoriamento resulta do efeito piezoelétrico direto, segundo o qual a aplicação de solicitações mecânicas externas ao material provoca rotações dos dipolos originalmente alinhados, provocando o surgimento de uma distribuição de cargas elétricas (Marqui, 2007).

A relação campo elétrico/deformação é aproximadamente linear para baixas intensidades do campo elétrico e, uma vez que em geral as aplicações práticas se limitam ao regime linear, a utilização do efeito piezoelétrico em sistemas de controle é vantajosa (Franco, 2009).

2.3. ONDAS *LAMB* (LW – *LAMB WAVE*)

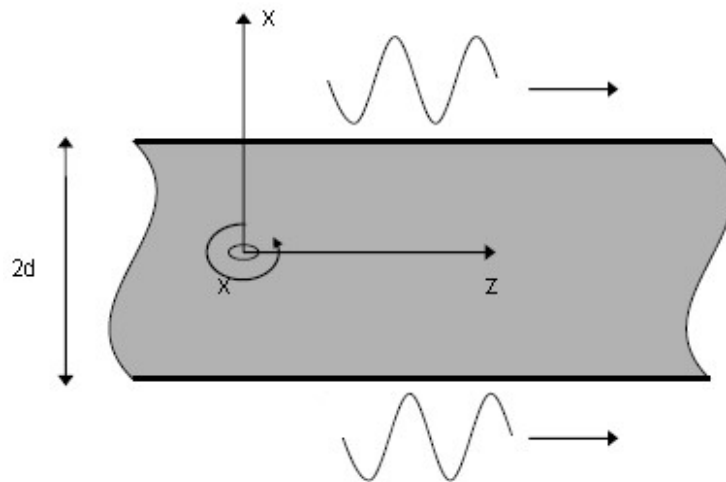
Idealizadas e apresentadas por *Lamb* (1917), as ondas *Lamb* estão associadas aos modos de propagação das estruturas, sendo também conhecidas como ondas de placas, e referem-se às perturbações elásticas que se propagam num material sólido (chapas, placas, etc.) com as interfaces ou contornos livres.

2.3.1. Teoria das LW

Nas LW, a movimentação da partícula ocorre tanto na direção de propagação quanto perpendicularmente ao comprimento do material e em uma superfície plana,

deslocamento de partículas de onda perpendiculares à superfície (eixo x) e paralelas à direção de propagação (eixo z) conforme a Figura 3.

Figura 3– Esquema mostrando a direção de propagação das LW.



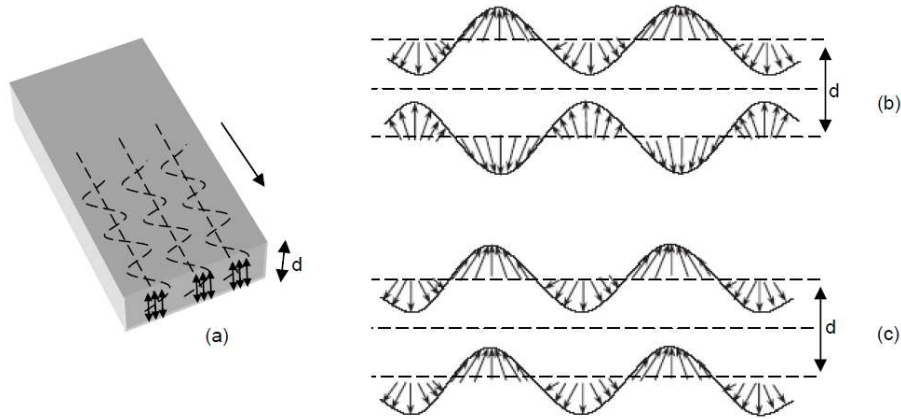
Fonte: Viktotov (1970)

A rigor, LW são uma forma de perturbação elástica que pode propagar entre duas superfícies paralelas livres, tais como as superfícies superior e inferior de uma placa, viga ou casca. Entretanto existe uma condicionante para as LW: a força de superfície associada deve ser nula nas superfícies superior e inferior da placa (superfícies livres de tensão).

As LW são constituídas de superposições de ondas longitudinais e transversais em uma chapa fina e as características da propagação dependem intensamente das condições de contorno, tais como ângulo de incidência, forma de excitação, frequência central do transdutor, largura de banda e geometria do material.

Há dois grupos de ondas *Lamb* que satisfazem as equações de onda e as suas condições limite: simétricas e antissimétricas. Cada um desses tipos pode se propagar de forma independente da outra, conforme a Figura 4.

Figura 4— Modos de propagação de LW.
 (a) Ondas *Lamb* propagando em uma placa de espessura d ;
 (b) modos simétricos; (c) modos assimétricos.



Fonte: Farias (2006)

O vetor potencial na direção do eixo transversal ao eixo de propagação tem amplitude nula. Os potenciais ϕ e φ , que descrevem ondas longitudinais e transversais, respectivamente, devem satisfazer as equações:

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t^2} = (\Lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t^2} = 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Definindo os números das ondas longitudinais e transversais, k_l e k_t respectivamente, tem-se:

$$k_l = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\Lambda + 2\mu}} \therefore k_1 = \omega v_l \quad (3)$$

$$k_t = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \therefore k_1 = \omega v_t \quad (4)$$

A partir destes potenciais, os componentes de deslocamento nas direções x e z (W e U):

$$W = \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$U = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (6)$$

Enquanto que, os componentes de tensão σ_{xx} , σ_{zz} , σ_{xz} são descritos pelas equações abaixo:

$$\sigma_{xx} = \Lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{zz} = \Lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

Os potenciais ϕ e φ são representados pelas equações:

$$\phi = A_s \cosh(qx) e^{ikz} + B_a \sinh(qx) e^{ikz} \quad (10)$$

$$\varphi = D_s \sinh(sx) e^{ikz} + C_a \cosh(sx) e^{ikz} \quad (11)$$

Visto que A_s , B_a , C_a e D_s são constantes arbitrárias, k é o número da onda, $q^2 = k^2 - k_l^2$ e $s^2 = k^2 - k_t^2$. Assim satisfazendo as equações 03 e 04 além disso as tensões nos planos $x = \pm d$ devem ser nulas. Substituindo as equações 10 e 11 em 07, 08 e 09, chega-se a equações características e obtém-se a relações entre (S_s e A_s) e (C_a e B_a). Retornando essas relações para 10 e 11 tem-se:

$$\phi = A_s \cosh(q_s x) e^{ik_s z} + B_a \sinh(q_a x) e^{ik_a z} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \varphi = & \frac{2ik_s q_s \sinh(q_s d)}{(k_s^2 + s_s^2) \sinh(s_s d)} A_s \sinh(s_s x) e^{ik_s z} + \\ & + \frac{2ik_a q_a \sinh(q_a d)}{(k_a^2 + s_a^2) \sinh(s_a d)} B_a \cosh(s_a x) e^{ik_a z} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{Onde } q_{s,a}^2 = k_{s,a}^2 - k_l^2 \text{ e } s_{s,a}^2 = k_{s,a}^2 - k_t^2 .$$

Os deslocamentos das partículas seguem as equações:

$$W = W_s + W_a \quad (14)$$

e

$$U = U_s + U_a \quad (15)$$

Em que,

$$U_s = Ak_s \left(\frac{\cosh(q_s x)}{\sinh(q_s d)} - \frac{2q_s s_s \cosh(s_s x)}{k_s^2 + s_s^2 \sinh(s_s d)} \right) e^{i(k_s z - \omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (16)$$

$$W_s = Aq_s \left(\frac{\sinh(q_s x)}{\sinh(q_s d)} - \frac{2k_s^2 \sinh(s_s x)}{k_s^2 + s_s^2 \sinh(s_s d)} \right) e^{i(k_s z - \omega t)} \quad (17)$$

$$U_a = Bk_a \left(\frac{\sinh(q_a x)}{\cosh(q_a d)} - \frac{2q_a s_a \sinh(s_a x)}{k_a^2 + s_a^2 \cosh(s_a d)} \right) e^{i(k_a z - \omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (18)$$

$$W_a = Aq_a \left(\frac{\cosh(q_a x)}{\cosh(q_a d)} - \frac{2k_a^2 \cosh(s_a x)}{k_a^2 + s_a^2 \cosh(s_a d)} \right) e^{i(k_a z - \omega t)} \quad (19)$$

Visto que A e B são constantes arbitrárias.

As equações 16 a 19 descrevem dois grupos de modos de propagação das LW. As expressões 16 e 17, indicadas com índice “s” descrevem os modos de propagação das ondas simétricas (sinais iguais para deslocamento U e sinais opostos para deslocamento W nas metades superior e inferior da espessura – Figura 4(b)), enquanto que as expressões 18 e 19, com índice “a” descrevem ondas assimétricas (sinais opostos para deslocamento U e sinais iguais para deslocamento W nas metades superior e inferior da espessura – Figura 4(c)).

Dois fatos importantes devem ser mencionados. O primeiro é que a velocidade de propagação da onda c é função da frequência angular ω , o que significa que as LW são ondas dispersivas. O segundo fato é que existem infinitos números de ondas que correspondem a diferentes velocidades de onda, os chamados modos de propagação (Franco, 2009).

2.3.2. LW aplicadas a problemas de SHM

O método das LW tem se desenvolvido ao longo do tempo para atuação em problemas de SHM, podendo ser visto em Pines (1997), onde o processamento matemático é comparado a modelos de elementos finitos, além de detecções bastante sensíveis tais como de corrosão conforme estudo de Moura Jr et al. (2006).

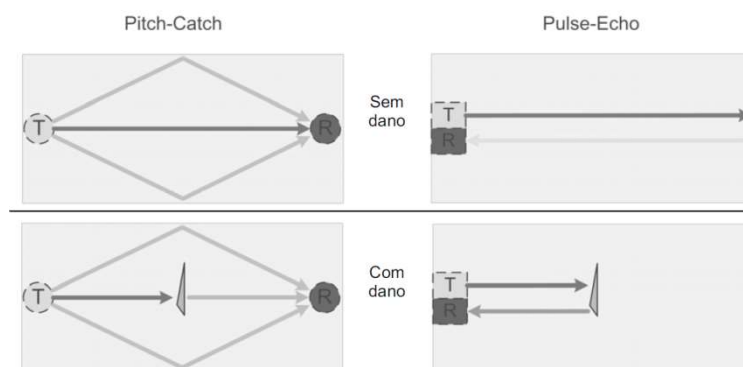
Leucas (2009) comparou a técnica das LW com a da impedância eletromecânica, chegando a resultados satisfatórios e em especial destacando a sensibilidade da técnica das LW com relação à frequência de excitação. Em um estudo de detecção de danos,

Franco (2009) utilizou a técnica de LW para verificar quatro tipos diferentes de índices de falha, sendo eles o RMSD, IFM, Norma H₂e CCDM Todos eles computados no domínio da frequência em que se confirmou a eficiência da técnica.

Farias et al. (2011) estudaram a detecção de furos com diferentes profundidades em chapas de alumínio. Assim estudos de aplicações de LW estão em corrente estudo como pode-se ver nos trabalhos de Santos et al. (2016), Silva et al. (2014) e Rosa (2016).

A forma de posicionamento dos sensores e atuadores pode ser observada nos estudos apresentados por Raghavan e Cesnik (2005), onde apresentam a técnica do uso de LW para estimar a existência, localização, determinação de tipo e severidade de dano em uma estrutura utilizando duas formas de detecção coma utilização das LW: *pitch-catch* e *pulse-echo*, conforme pode-se ver na Figura 5:

Figura 5 – Técnicas para detecção de danos por ondas *Lamb*.



Fonte: Raghavan e Cesnik (2005)

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 *Wavelet* Contínua (CWT – *Continuous Wavelet Transform*) visando detectar defeitos em uma estrutura conforme descrito em Lemistre et al (1999). Independente da forma de captação da resposta da onda, a eficácia das LW na detecção de falhas está na observação das mudanças na forma das ondas recebidas.

Uma das características de interesse das LW é a capacidade de se propagar por grandes distâncias em placas, cascas ou vigas. Assim os sistemas SHM baseados nessas ondas podem cobrir grandes áreas com seus atuadores/detectores fixados em uma única posição. Isso induz que a tecnologia de integração dos sensores/atuadores piezoelétricos

nas estruturas com a finalidade de gerar e de coletar sinais a partir de LW é um ponto importante no processo SHM.

Entretanto existe uma desvantagem dos métodos da onda de *Lamb*. Há sempre a necessidade de um mecanismo ativo para a geração das ondas. Também é necessário um tratamento matemático mais rigoroso para os dados obtidos serem interpretados, conforme pode ser visto em Han et al. (2005).

2.4. ONDAS *WAVELET*

Wavelets em linguagem literal significa “*small waves*”, “*ondelletes*” ou em livre tradução pequenas ondas. São funções capazes de decompor sinais contidos no domínio do tempo, em outras funções de diferentes escalas de frequência e tempo.

Como o nome sugere, elas são ondas, que possuem características comuns de oscilação e suas curvas têm um decaimento a zero em relação à área algébrica:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (20)$$

Sendo $\psi(t)$ a *Wavelet*-mãe ou a primeira função *Wavelet* da decomposição do sinal, isto é, uma *Wavelet* é construída a partir da função básica oscilatória de suporte compacto, denominada *Wavelet*-mãe (base), $\psi(t)$, que gera as bases a partir de deslocamentos e dilatações $\psi(at-b)$. Os parâmetros de dilatação, a , e de translação, b , estão restritos a um conjunto discreto, usualmente $a=2^j$, $b=k$ em que j e k são inteiros.

Essa condição é a de Admissibilidade, em que a função $\psi(t)$ apresenta características oscilatórias ao longo do eixo temporal e que possui média nula. Também caem a zero quanto $t \rightarrow \pm \infty$. Desta forma podem ser perfeitamente determinadas no domínio do tempo.

Outra situação definida para uma função *Wavelet* é que sua energia deve ser unitária, conforme:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (21)$$

Isso define o suporte compacto, ou decaimento rápido de amplitude, garantindo a localização espacial em que a função *Wavelet*-mãe $\psi(t)$ é de quadrado integrável e que

pertence ao espaço $L^2(\mathbb{R})$. Essa condição está relacionada com a localização da energia (concentrada) da função *Wavelet* em certa região finita do tempo. Gurgel (2013), descreve que essa condição de energia concentrada é a principal característica que diferencia as análises de sinais utilizando as funções *Wavelets* e análise utilizando as funções harmônicas (Análise de *Fourier*). Também afirma que as *Wavelets* são perfeitamente determinadas em tempo e frequência.

2.4.1. *Wavelet Morlet*

As *Wavelets* podem ter diversos formatos de oscilação, dependendo da característica a ser estudada. Entretanto, a escolha do modelo a ser utilizado pode alterar os resultados obtidos de forma a enfatizar certas características do sinal analisado. Existem os tipos de *Haar*, *Meyer*, *Daubechies*, *symlet*, *mexican hate*, dentre outros.

Em especial observa-se a *Wavelet de Morlet* que em função da posição da sua frequência central, é útil na determinação da sua escala, e especificamente é uma onda plana modulada por uma função Gaussiana, escrita como:

$$\psi(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) \exp(i\omega_0 t) \quad (22)$$

A função *Wavelet de Morlet* é uma função complexa, o que permite analisar a fase e o modulo do sinal decomposto (Domingues, et al. 2016).

2.5. TRANSFORMADA *WAVELET*

As transformações matemáticas são ferramentas matemáticas utilizadas no mapeamento de funções de um domínio para outro. Em especial na análise de sinais possuem importância singular pois podem evidenciar propriedades relevantes no domínio transformado.

Existem vários métodos de transformações que podem ser aplicados a um sinal, entre os quais a transformada de *Fourier* é a mais utilizada.

A Transformada de *Fourier* (FT – *Fourier Transform*), definida em Fourier (1822), demonstra que qualquer função periódica pode ser representada como uma soma infinita de funções exponenciais complexas periódicas.

A FT consegue mapear sinais estacionários, ou melhor, sinais cuja a frequência não varia no tempo. Entretanto, não é apropriada para sinais transientes pois não possui resolução no tempo, o que significa que podemos determinar a frequência do sinal, mas não quando ela ocorre. Para sinais de duração finita, a Transformada Discreta de *Fourier* (DFT - *Discrete Fourier Transform*) que é uma sequência, em vez de uma função de variável contínua, e corresponde a amostras em frequência igualmente espaçadas no tempo discreto do sinal é mais apropriada.

Já a Transformada Rápida de *Fourier* (FFT - *Fast Fourier Transform*) é um algoritmo ou sequência de cálculo para calcular a DFT e sua inversa com grande aplicação no processamento digital de sinais.

Já a Transformada *Wavelet* (WT – *Wavelet Transform*) é uma ferramenta que permite decompor um sinal em diferentes componentes de frequências, permitindo assim, estudar cada componente separadamente em sua escala correspondente. Possui certa semelhança com a FT, entretanto é mais complexa, pois as funções bases da *Wavelet* podem ou não ser ortonormais.

A condição de Admissibilidade da função *Wavelet* garante a existência da transformada *Wavelet* inversa, que é a reconstrução do sinal em sua forma original.

2.5.1. Transformada *Wavelet* Contínua

A CWT da função $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ é formalizada pela decomposição da função $f(t)$ em uma base formada por funções *Wavelets* $\psi(t)$. Sua formulação matemática apresenta:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt, \quad a > 0 \quad (23)$$

Em que,

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (24)$$

A equação (23) representa uma família de funções *Wavelets* usada para a transformação e que, na literatura é denominada de *Wavelet*-mãe. O parâmetro a está relacionado com a dilatação/contração da função e refere-se à escala usada. É relacionado com a translação ou localização da função *Wavelet*-mãe. O termo $|a|^{-1/2}$ corresponde a um fator de normalização para a energia de *Wavelet* $\psi_{a,b}(t)$. Isso implica em manter a energia da *Wavelet* principal localizada em dada região do tempo. Também significa que as amplitudes da função ψ são aplicáveis apenas na região localizada. Já o símbolo $*$ indica o conjugado complexo.

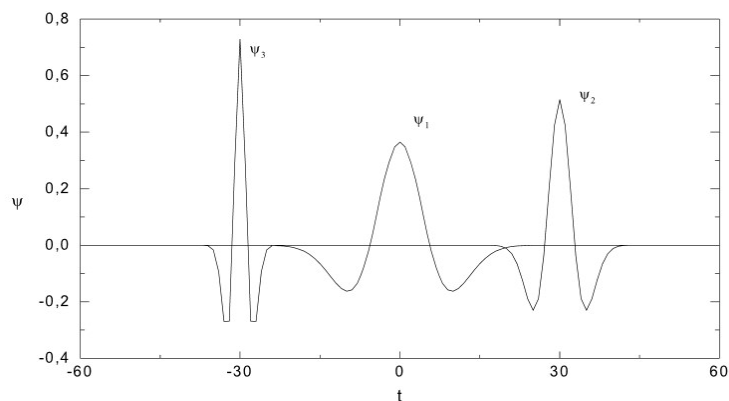
Essa estrutura permite que a CWT possa ser resolvida nos domínios da frequência e do tempo além da possibilidade da representação hierárquica do conjunto de dados. Essa forma de apresentação também pode ser chamada de análise multiresolução, conceito desenvolvido por Mallat (1989).

Assim, a equação (23) mede as flutuações da função ou do sinal $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ na vizinhança de b cujo tamanho é proporcional ao parâmetro de escala a .

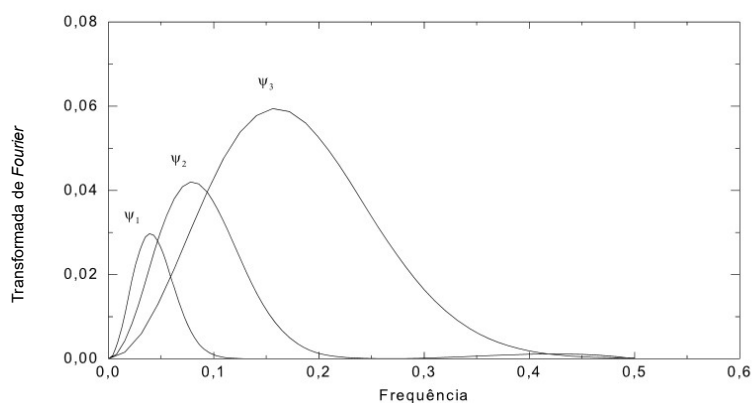
A equação (24) fornece os coeficientes da CWT de uma função ou sinal $f(t)$. Esses coeficientes representam uma correlação em um espaço dual entre a função $f(t)$ e a base formada pelas *Wavelets*. A variação dos parâmetros a e b estão relacionados respectivamente, com a dilatação (ou contração) e a translação temporal da função analisadora ao longo do sinal. Para o parâmetro a , a dilatação acontece se $a > 1$, a contração ocorre se $0 < a < 1$.

Observa-se de forma mais clara na Figura 6, a *Wavelet* ψ_1 para os valores de $a = 1$ e $b = 0$. O parâmetro de translação $b = 0$ significa que a *Wavelet* está com seu centro na origem do gráfico, $t = 0$, enquanto que as *Wavelets* ψ_2 e ψ_3 possuem $b = 30$ e $b = -30$ respectivamente. Também se verifica que existe uma variação em seus parâmetros temporais, sendo que relativamente à *Wavelet* ψ_1 , as *Wavelets* ψ_2 e ψ_3 possuem contração de $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ respectivamente. Contração essa definida pelo parâmetro de escala a . Assim o parâmetro assume o valor de $a = \frac{1}{2}$ para a *Wavelet* ψ_2 e $a = \frac{1}{4}$ para a *Wavelet* ψ_3 .

Figura 6 – (a) Ilustração de dilatação e translação de uma função *Wavelet* para valores dos parâmetros a e b . (b) Transformada de *Fourier* (espectro na frequência) para as *Wavelets* ilustradas em (a).



(a)



(b)

Fonte: Leite (2007)

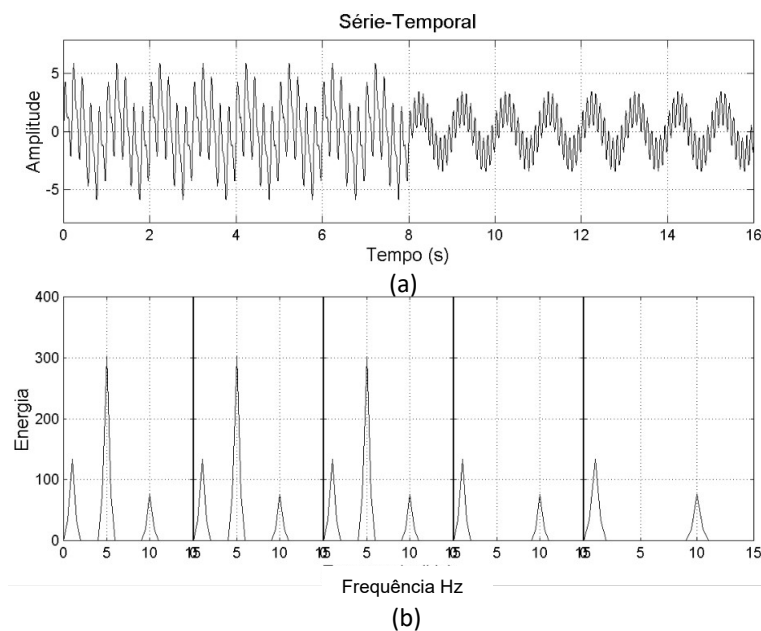
Observa-se na Figura 6(b) o Espectro de *Fourier* (gráfico da magnitude x frequência) para as *Wavelets* ψ_1 , ψ_2 e ψ_3 demonstrando quando se diminui a escala temporal, o espectro de frequências é posicionado em frequências maiores.

Cada tipo de *Wavelets* conduz a análises melhores ou piores dependendo das características ou propriedades que se deseja analisar. Assim se faz necessário um julgamento prévio para a escolha da *Wavelet*-mãe mais conveniente para cada uso, objetivando a verificação de qual propriedade ou domínio caracterizará melhor o sinal sem distorções. Protázio (2002) comenta que as seguintes características podem ser observadas na escolha de uma “*Wavelet*-mãe” para obter representação em tempo-escala: ortogonalidade e não ortogonalidade; complexa ou real; suporte compacto; formato da *Wavelet* e do sinal.

Outra forma de observar graficamente a resposta da CWT é com o uso de escalogramas, que representa a decomposição em tempo-escala do sinal utilizando. A CWT e seus coeficientes são mostrados em mapa de cores. Percebe-se a localização com maior precisão e visibilidade das ocorrências dessas frequências durante o tempo do sinal.

Bolzan (2016) apresenta um sinal no tempo na Figura 7 (a). É utilizada FFT em cinco segmentos, apresentado na Figura 7 (b). Detecta-se nos primeiros segmentos, três frequências distintas, enquanto que nos últimos segmentos apenas duas.

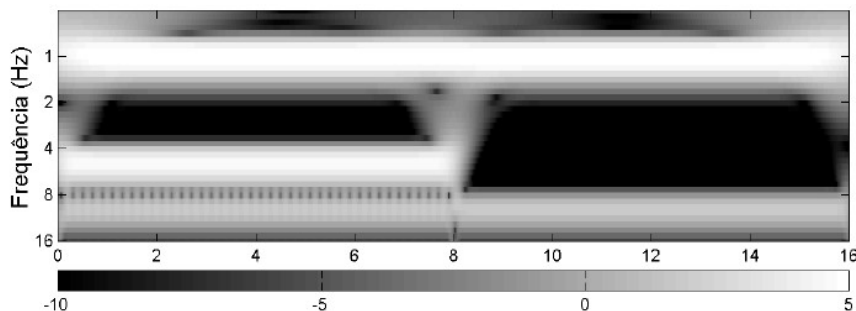
Figura 7 – (a) Série temporal; (b) FFT aplicada em cada segmento da série temporal.



Fonte: Bolzan (2016)

Com o uso da CWT na série temporal da Figura 7 (a), observa-se no eixo vertical do escalograma da transformada *Wavelet* (Figura 8) uma lista clara na escala vertical de frequências 1 e uma outra na escala vertical de frequências 10, um pouco mais acinzentada. As duas faixas estão presentes durante todo o tempo do sinal. A outra frequência aparece na escala vertical de frequências 5 como outra listra bem presente, essa vai somente até a metade do tempo do sinal, definindo em que a frequência é suprimida. Outra informação é apresentada por meio da transformada *Wavelet* relacionada à energia. Identifica-se na cor acinzentada da frequência 10, que ela contém maior energia associada em relação às frequências mais baixa. Normalmente em pacotes computacionais ou *toolbox* de *Wavelets* tem-se a disposição uma escala de cor que permite realizar essa visualização dos níveis de energia.

Figura 8 – Escalograma da série temporal mostrada no gráfico da Figura 7(a).



Fonte: Bolzan (2016)

2.6. IDENTIFICAÇÃO DO DANO

Na literatura atual, existem várias técnicas com o objetivo de verificar a existência do dano em determinada estrutura. Observa-se que tais estudos ou técnicas sempre buscam a comparação entre dados da estrutura íntegra e da estrutura danificada.

Dentre esses métodos pode-se citar os coeficientes MAC (*Modal Assurance Criterion*), que analisam os vetores modais experimentais da estrutura íntegra e da danificada, correlacionando os pares de vetores modais assumindo valores de 0 e 1. De acordo com Farrar e Worden (2013), o valor de 1 indica que os vetores modais são idênticos, havendo ótima correlação entre eles, e o valor de 0 indica que os vetores modais comparados são ortogonais entre si, não havendo nenhuma correlação. Também seguindo o mesmo raciocínio, o coeficiente COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*), que correlaciona os vetores de componentes modais calculadas com as identificadas experimentalmente para cada grau de liberdade. Seus valores também variam de 0 a 1 e, como o coeficiente MAC, valores próximos de 1 indicam boa correlação no grau de liberdade em questão e valores próximos de 0, baixa correlação.

A técnica da Diferença de Curvatura Modal se baseia nas curvaturas derivadas dos modos de vibração. Segundo Farrare Worden (2013), descontinuidades no modo de vibração causadas por danos localizados são ampliadas pela curvatura. A diferença das curvaturas entre as situações íntegra e danificada localizam uma possível região de dano na estrutura. Tal técnica é abordada posteriormente.

Por fim, para o entendimento do DI, observamos o trabalho de Oñate, Hanganu, e Miquel (2000) que realizam simulações de elementos finitos para estruturas de concreto

armado. O interesse dos autores é focado no comportamento complexo de concreto. Entretanto definiram um índice para determinar os danos no concreto. Esse índice é calculado pela Equação (25).

$$d = \frac{S - \bar{S}}{S} = 1 - \frac{\bar{S}}{S} \quad (25)$$

Onde S é a área de seção transversal original do elemento analisado e \bar{S} é a área da seção transversal que efetivamente resiste após a danificação do elemento. O índice local de dano d representa a densidade superficial do que foi danificado, e é inicialmente zero quando o concreto está em seu estado intacto.

Adaptando o princípio comparativo de áreas acima descrito e aplicando para uso com a CWT, observa-se no trabalho de Sohn (2005) a definição da métrica do Índice de dano (DI – *Damage Index*) para os termos de relacionamento da variação de energia dos sinais comparados.

$$DI = 1 - \frac{\int_{b_1}^{b_2} CWT_{teste}(b, a_0) db}{\int_{b_1}^{b_2} CWT_{baseline}(b, a_0) db} \quad (26)$$

Em que a_0 é a escala da CWT correspondente à frequência de excitação do sistema. *Teste* e *baseline* se referem ao estado a ser pesquisado e a situação íntegra. Dessa métrica o DI varia no intervalo de $0 \leq DI \leq 1$. Assim quando o índice é zero denota que a estrutura testada não possui dano, enquanto os valores forem se aproximando de 1, ou sendo cada vez menos correspondentes ou aumentando a diferença dos valores das CWTs, indicando o dano na estrutura. Outra observação é que a integral da *baseline*, ou seja, da CWT da estrutura íntegra é sempre numericamente superior que a integral da CWT da estrutura danificada.

2.7. ESTATÍSTICA

Para obter resultados confiáveis, os estudos e pesquisas utilizam ferramentas estatísticas para análise e validação de seus resultados.

Aqui, em função da quantidade de dados envolvidos, há o interesse pela redução, análise e interpretação dos sinais obtidos. Na Análise Exploratória de Dados (AED)

objetiva-se obter a maior quantidade possível de informações que auxiliem a tomada da decisão sobre os resultados obtidos.

Em estatística, uma análise descritiva de dados limita-se a calcular algumas medidas de posição e variabilidade, como a média e variância, por exemplo. Contrária a essa tendência, uma corrente mais moderna, liderada por Tukey (1977), utiliza principalmente técnicas gráficas, em oposição a resumos numéricos. Isso não significa que sumários não devam ser obtidos, mas uma análise exploratória de dados não deve se limitar a calcular tais medidas.

2.7.1. Medidas Resumo

As medidas resumo tem de posição tem objetivo de reduzir alguma propriedade de um conjunto de dados a um ou alguns valores. Para tal a estatística dispõe de medidas de posição, medidas de dispersão, quartis empíricos e diagramas de caixa.

Utilizam-se medidas de posição para a redução drástica dos dados à um só ou poucos valores. Usualmente, empregam-se a média, mediana ou moda.

A moda é definida como a realização mais frequente do conjunto de valores observados. A mediana é a realização que ocupa a posição central da série de observações, quando estão ordenadas em ordem crescente. E finalmente, a média aritmética, é a soma das observações dividida pelo número delas.

2.7.2. Medidas de Dispersão

As medidas de dispersão representam o resumo de um conjunto de dados por uma única medida representativa de posição central esconde toda a informação sobre a variabilidade do conjunto de observações. Um critério frequentemente usado para tal fim é aquele que mede a dispersão dos dados em torno de sua média e duas medidas. Com esse fim a estatística apresenta os conceitos de desvio médio e variância.

A variância é uma medida de dimensão igual ao quadrado da dimensão dos dados. Entretanto costuma-se usar o desvio padrão, que é definido como a raiz quadrada positiva da variância.

Por outro lado, tanto a média como o desvio padrão podem não ser medidas adequadas para representar um conjunto de dados, pois são afetados, de forma exagerada,

por valores extremos e apenas com estes dois valores não é possível verificar a simetria ou assimetria da distribuição dos dados. Assim é necessário considerar outras medidas.

De modo geral, podemos definir uma medida, chamada quantil de ordem p ou p -quantil, indicada por $q(p)$, onde p é uma proporção qualquer, $0 < p < 1$, tal que $100p\%$ das observações sejam menores do que $q(p)$. Alguns quantis possuem particularizações, como os que dividem o conjunto de dados em quatro partes:

$$q(0,25) = q_1: 1^\circ \text{ Quartil} = 25^\circ \text{ Percentil}$$

$$q(0,50) = q_2: \text{Mediana} = 2^\circ \text{ Quartil} = 50^\circ \text{ Percentil}$$

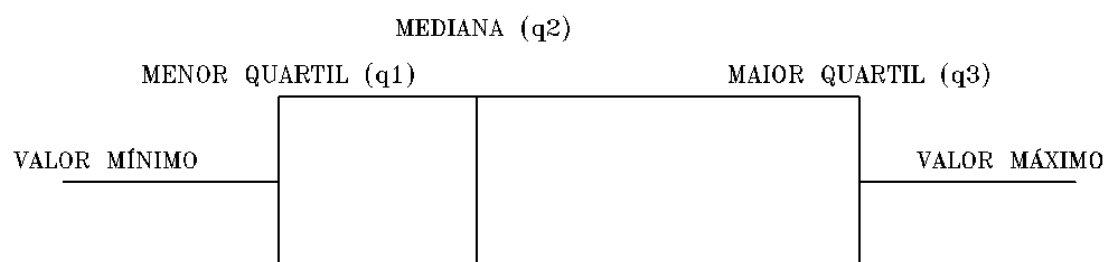
$$q(0,75) = q_3: 3^\circ \text{ Quartil} = 75^\circ \text{ Percentil}$$

Quartis são comumente usados em dados de pesquisas para dividir uma série de dados em grupos.

O primeiro quartil é um valor tal que 75% dos dados ficam acima dele, e apenas 25% abaixo. O terceiro quartil é o valor tal que 25% dos dados ficam acima, e 75% abaixo. A mediana é equivalente ao segundo quartil; metade dos dados estão acima e metade abaixo.

A representação gráfica dos três quartis em conjunto com os valores limites máximos e mínimos é chamada de gráfico de caixa ou *boxplot* conforme a Figura 9. É utilizado para avaliar a distribuição empírica dos dados e para comparação visual entre dois ou mais grupos de dados.

Figura 9 – Construção de um típico *boxplot* e sua dispersão de dados.



Fonte: Adaptado de Morettin e Wilton (2010).

3. SHM BASEADO NAS ONDAS *LAMB*

Neste capítulo apresenta-se o procedimento dos ensaios e a forma de compilação dos dados captados.

Elaboraram-se três casos independentes. O primeiro, utilizando como sensores as pastilhas de PZT, verificou-se as mudanças na detecção do dano em função da distância dos sensores e atuadores. No segundo utilizou-se como sensor um acelerômetro nas posições correspondentes às dos sensores em PZT para a obtenção da melhor posição de detecção e emissão de pulso, em conjunto comparou-se os dados captados com o acelerômetro e com as pastilhas de PZT. No terceiro empregou-se o acelerômetro para medir o DI ao longo da viga com o intuito de encontrar pontos modais.

A estrutura utilizada para os experimentos é composta de uma viga em alumínio simplesmente apoiada em dois pontos. Empregaram-se duas vigas, nominadas “V1” e “V1” com dimensões de 500,0 mm X 50,0 mm X 2,50 mm, conforme mostrada na Figura 10.

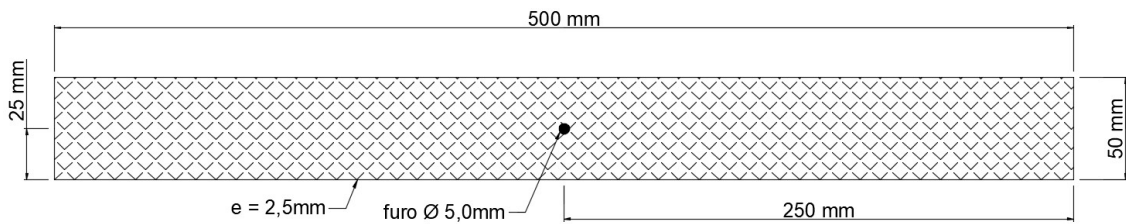
Figura 10 – Vigas de alumínio V1, V2 e parafuso utilizados no experimento.



Fonte: Aatoria Própria

As vigas contém um furo de 5,0 mm em seu centroide onde pode ser fixado um parafuso com diâmetro de 4,8 mm com duas arruelas e porca, conforme Figura 11.

Figura 11–Esquema dimensional e de furação das vigas V1 e V2



Fonte: Autoria Própria

A estrutura com parafuso é definida como íntegra e a perda de seu parafuso é a situação de dano. Essa situação de estrutura íntegra e com dano em função de um parafuso já foi verificada por Santos et al. (2016)

As pastilhas de PZT utilizadas nos experimentos como atuadores e receptores possuem base de latão com espessura de 0,14 mm e diâmetro de 27 mm, a área de cristal de PZT possui diâmetro de 18 mm com 0,35 mm de espessura, conforme Figura 12.

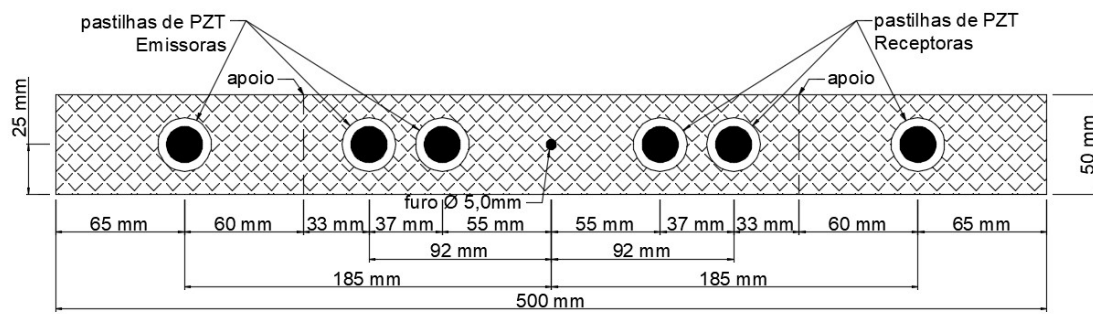
Figura 12 – Pastilhas de PZT utilizadas nos experimentos.



Fonte: Autoria Própria

As Pastilhas PZTs foram fixadas nas vigas com adesivo a base de resina epóxi conforme o posicionamento apresentado na Figura 13. As distâncias relativas ao furo central estão definidas na Tabela 1.

Figura 13–Esquema de posicionamento das pastilhas PZT nas vigas V1 e V2.



Fonte: Autoria Própria

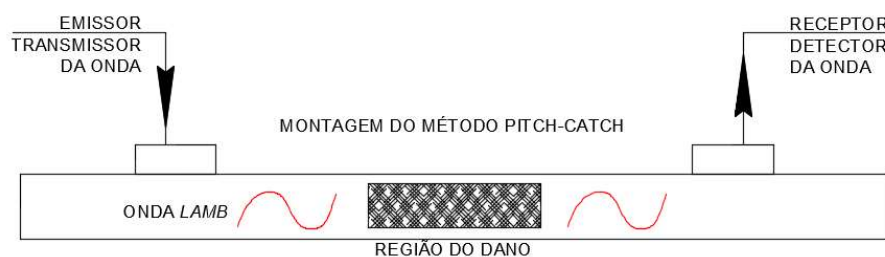
Tabela 1– Indicação de posicionamento das pastilhas PZT.

Posição	Indicação	Função
Lado esquerdo à 185 mm do furo	A	Emissora
Lado esquerdo à 92 mm do furo	B	Emissora
Lado esquerdo à 50 mm do furo	C	Emissora
Lado direito à 185 mm do furo	1	Receptora
Lado direito à 92 mm do furo	2	Receptora
Lado direito à 50 mm do furo	3	Receptora

Fonte: Autoria Própria

O posicionamento dos sensores seguiu a metodologia *Pitch-Catch*, desenvolvida por Gresil e Giurgiutiu (2013), conforme a Figura 14.

Figura 14 – Configuração *Pitch-Catch*.

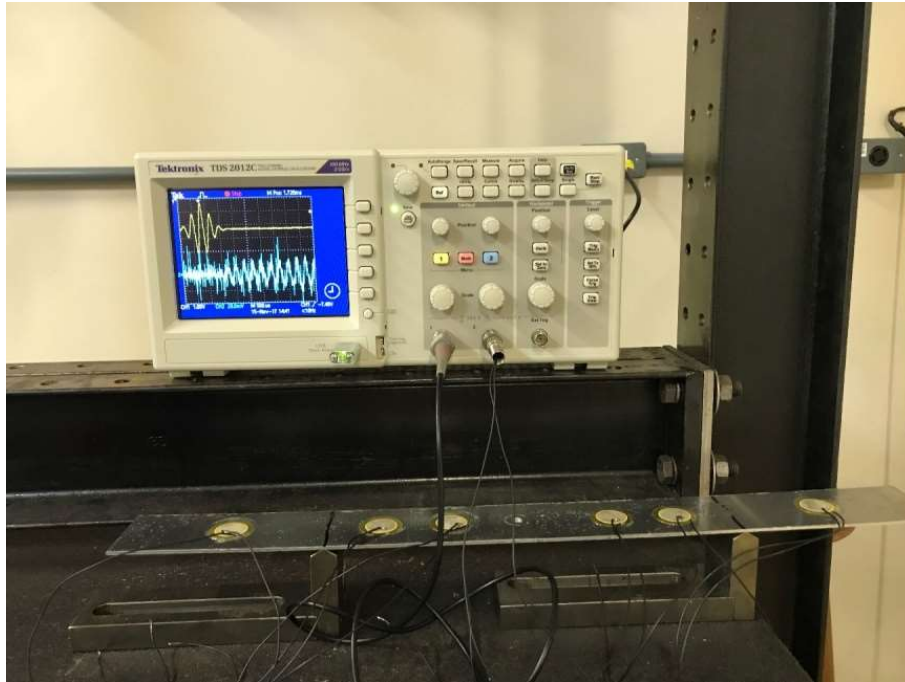


Fonte: baseado em Gresil e Giurgiutiu (2013).

No ensaio, a viga é bi apoiada a 22,4% de sua dimensão longitudinal, a partir de sua extremidade. Esta é a posição dos dois pontos modais do primeiro modo de vibrar da viga. Visa-se obter a condição livre-livre citada por Carreira et al. (2012) e Chui et al. (1999), como sendo a condição de apoio mais confiável para a caracterização

das propriedades mecânicas de uma viga. Desta forma as pastilhas posicionadas a 50 mm e 92 mm ficaram dentro do vão central da estrutura e as pastilhas localizadas a 185 mm ficaram posicionadas nos balanços da viga. Sua montagem pode ser vista na Figura 15.

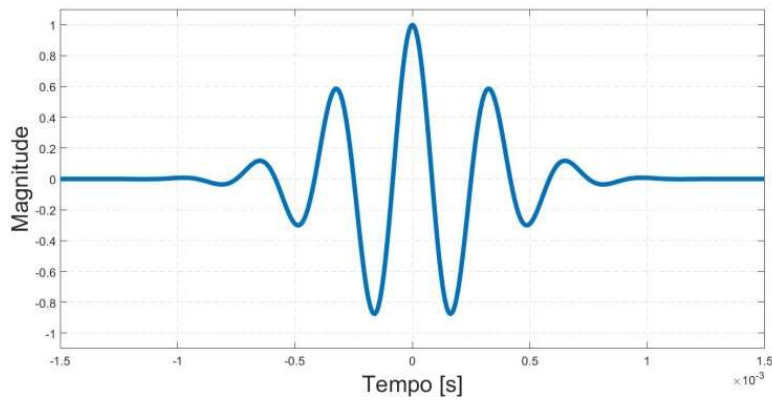
Figura 15 – Experimento 01 - Viga V2 com PZT's aplicados em pares relativos ao furo. Na posição 185 mm; posição 92 mm e posição 185 mm.



Fonte: Autorial Própria.

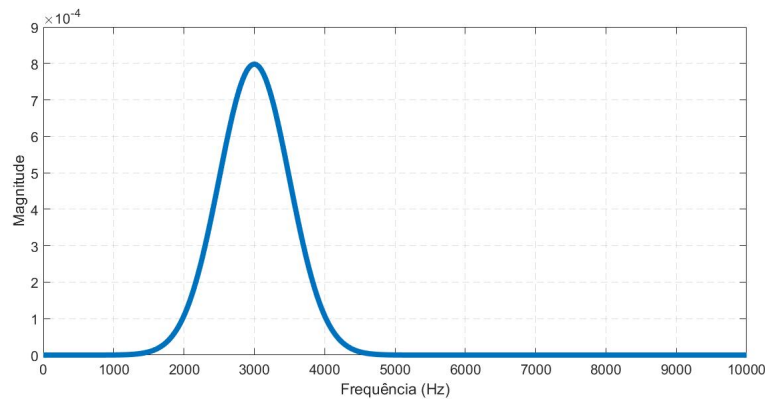
Para criar o pulso em LW, emprega-se um código computacional para gerar uma função *Wavelet* de *Morlet* que produz um ruído por meio da placa de som do microcomputador. O código permite definir a frequência emitida, proporcionando ajustes conforme a necessidade. Desta forma o microcomputador é utilizado como o gerador de pulso. A LW gerada é apresentada nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Plotagem da função *Wavelet* de *Morlet*.



Fonte: Autoria Própria

Figura 17 – FFT do Pulso enviado para a pastilha PZT atuadora.



Fonte: Autoria Própria

O sinal da placa de som do microcomputador é conectado à pastilha PZT definida como emissora. Pela propriedade do efeito inverso característico do elemento piezoelétrico, a impedância elétrica é transformada em impedância mecânica gerando uma onda mecânica no formato de LW.

Conforme Franco (2009), a relação campo elétrico/deformação é aproximadamente linear para baixas intensidades do campo elétrico. Desta forma, o sinal emitido excita a viga na frequência de interesse.

A vibração da LW produzida é detectada pela pastilha PZT receptora, que por sua vez a transforma em um sinal elétrico (propriedade de efeito direto dos materiais piezoelétricos).

Para a leitura dos sinais elétricos utiliza-se um osciloscópio com dois canais de leitura. O Canal 01 foi dedicado a ler o sinal captado pela pastilha PZT receptora, enquanto que o Canal 02 foi utilizado para ler o pulso elétrico enviado à pastilha PZT

emissora. O osciloscópio grava 2500 pontos com uma taxa de amostragem de 2,0 GS/s. Os parâmetros dos canais do equipamento são descritos na Tabela 2.

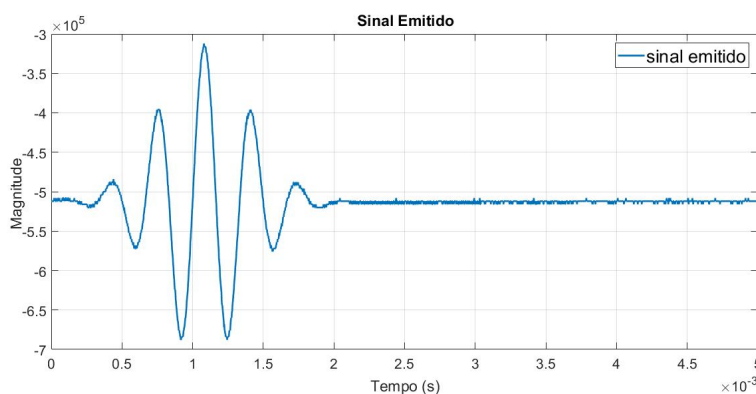
Tabela 2– Indicação de posicionamento das pastilhas PZT.

Canal	Unidade	Escala
Canal 01	Tensão Elétrica (V)	1
Canal 02	Tempo (s)	0,001

Fonte: Autoria Própria.

O sinal enviado para a pastilha PZT emissora (Figura 18) é medido pelo osciloscópio no domínio do tempo. O sinal é gravado e pós processado em um código computacional.

Figura 18– Sinal emitido para as vigas V1 e V2



Fonte: Autoria Própria.

Para a detecção da resposta, é necessário que a LW transmitida pela superfície da placa tenha a maior energia possível. Assim procura-se pela frequência de ressonância do sistema, a qual será definida como a frequência de análise para a geração do pulso no microcomputador.

É aplicada na pastilha de PZT emissora, uma varredura de frequências (*sweep*) gerada por um código computacional. O código produz uma sequência de vibrações crescentes no passo de 1,0 Hz em função dos valores iniciais e finais estabelecidos como entrada de dados, formando assim um intervalo de análise para a varredura de frequências. Nesse ensaio a varredura abrangeu as frequências de 1 Hz a 10.000 Hz.

Utilizando o osciloscópio é observada a resposta captada na pastilha PZT definida como receptora. Quando uma das frequências emitidas pelo *sweep* chega à ressonância

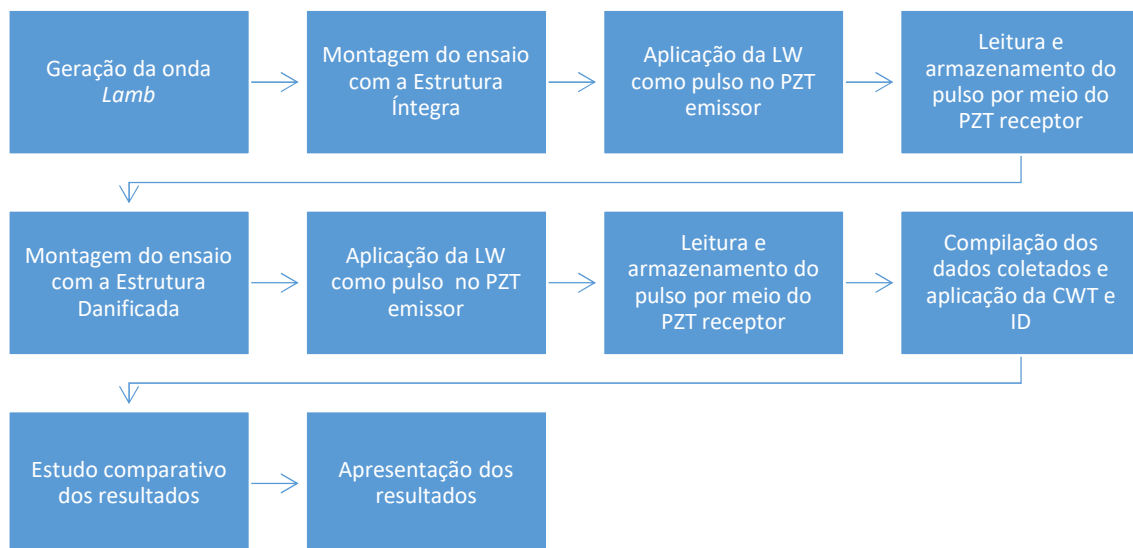
do sistema, há um pico de amplitude registrado no osciloscópio, definindo assim a frequência de teste do ensaio.

A frequência definida pelo *sweep* é de 3002 Hz, a qual é utilizada em todos os casos.

Para a obtenção do DI, aplica-se no sinal recebido pela pastilha PZT uma CWT, gerando os resultados da análise.

De forma esquemática, o procedimento de análise para a detecção do dano é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma do experimento.



Fonte: Autoria Própria.

3.1. CASO 01

O Caso 01 teve a finalidade de medir o DI a partir das posições definidas na Tabela 3. O ensaio utilizou as duas vigas e foi repetido 20 vezes.

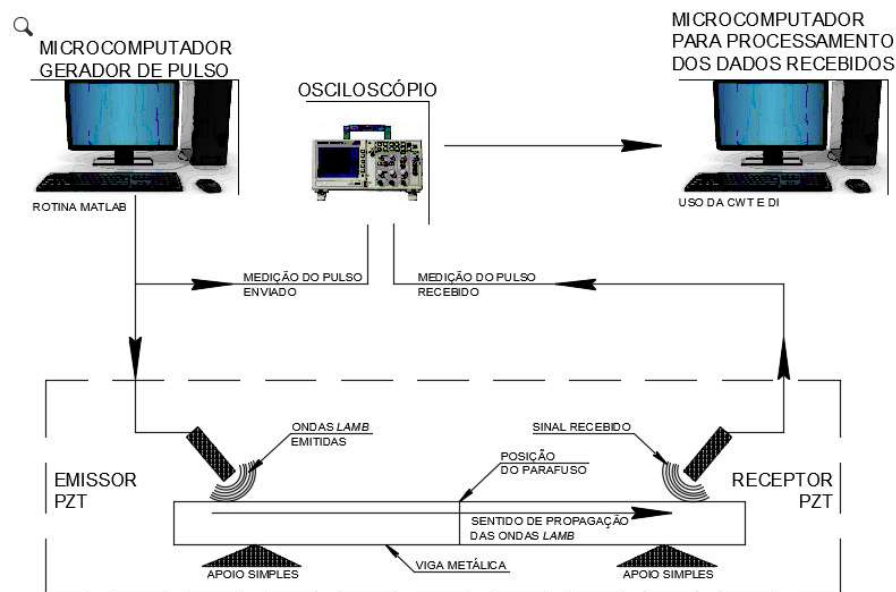
Tabela 3– Esquema de aplicação do sinal LW.

Ensaio	Emissor Posição da pastilha PZT	Receptor Posição da pastilha PZT
1	185mm (A)	185mm (1)
2	92mm (B)	92mm (2)
3	50mm (C)	50mm (3)

Fonte: Aatoria Própria.

A Figura 20 mostra a configuração do ensaio.

Figura 20 – *Setup* do ensaio do Caso 01.



Fonte: Aatoria Própria

3.2. CASO 02

No Caso 02 utilizou-se apenas a viga V2 e repetiu-se o procedimento 20 vezes. Empregou-se como receptor um acelerômetro piezoelétrico posicionado nas mesmas posições das pastilhas PZT. Os dados foram adquiridos utilizando um analisador dinâmico de vibrações. O experimento foi realizado apenas na viga V2. A finalidade deste experimento foi definir a melhor combinação entre o receptor e emissor para a determinação do DI.

As medições foram realizadas conforme a Tabela 4.

Tabela 4– Esquema de aplicação do sinal LW.

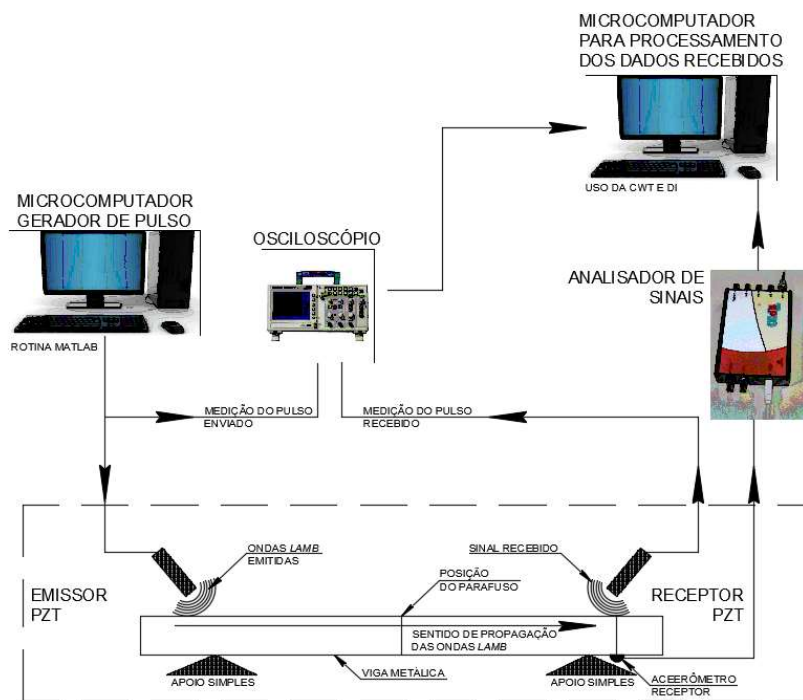
Ensaio	Emissor Posição da pastilha PZT	Receptor Posição da pastilha PZT
1	185mm (A)	185mm (1)*
		92mm (2)
		50mm (3)
2	92mm (B)	185mm (1)
		92mm (2)*
		50mm (3)
3	50mm (C)	185mm (1)
		92mm (2)
		50mm (3)*

* Posições coincidentes com as do Caso 1

Fonte: Aatoria Própria.

O esquema do ensaio é disposto na Figura 21.

Figura 21 – Setup do ensaio do Caso 02.



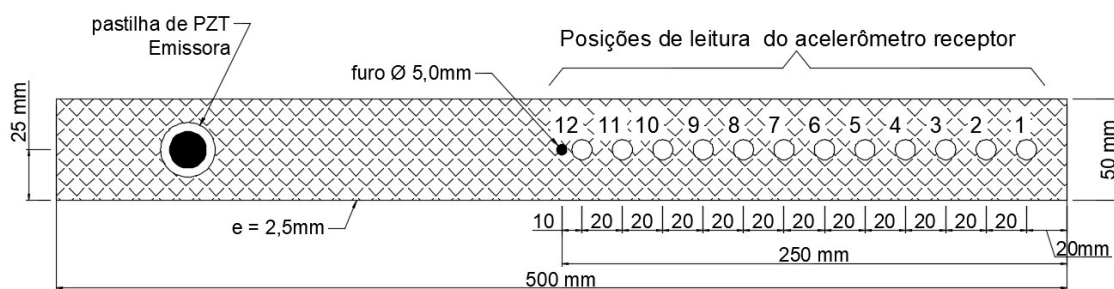
Fonte: Autoria Própria.

3.3. CASO 03

No Caso 03 utilizou-se apenas a viga V2 e repetiu-se o procedimento de ensaio 20 vezes. Empregou-se o acelerômetro piezoelétrico como receptor. O acelerômetro é posicionado em uma linha central à seção transversal da viga, da borda até a posição do dano, espaçando-o de 20 mm em 20 mm resultando em 12 medições. A emissão do sinal foi realizada com a pastilha de PZT posicionada em A (185 mm). O objetivo desse experimento é verificar se todas as posições contêm energia suficiente para a detecção do dano.

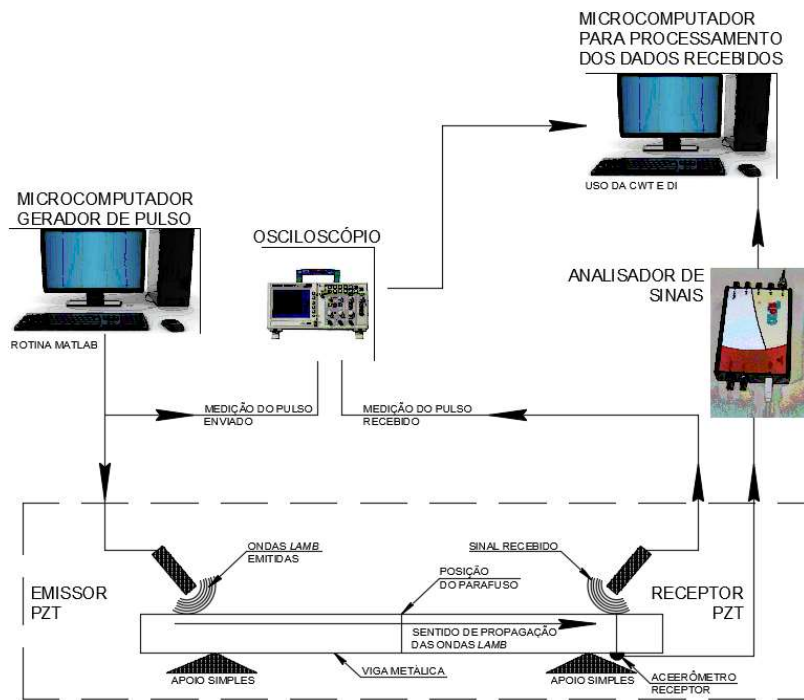
A Figura 22 apresenta os posicionamentos do acelerômetro na viga V2. O esquema do ensaio é disposto na Figura 23.

Figura 22 – esquema de posicionamento do Caso 3 na viga B.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 23 – Setup do ensaio do Caso 03.



Fonte: Autoria Própria.

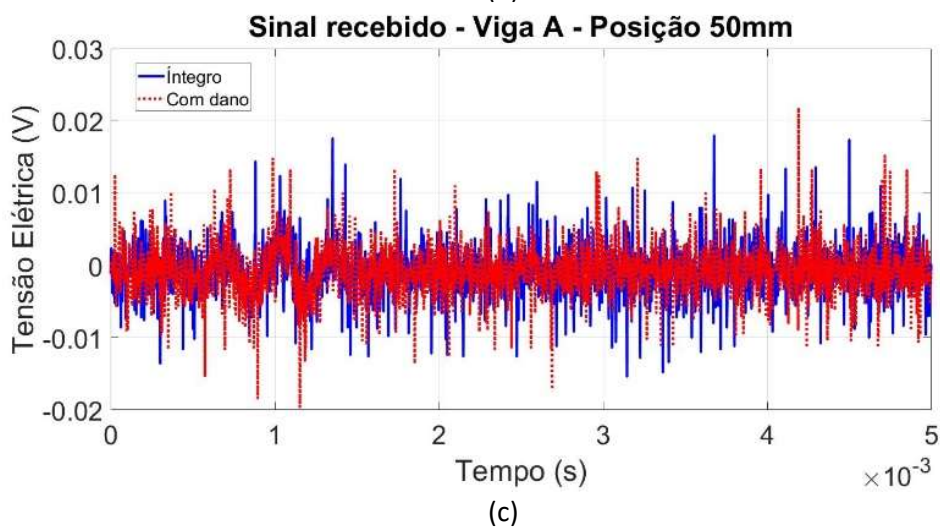
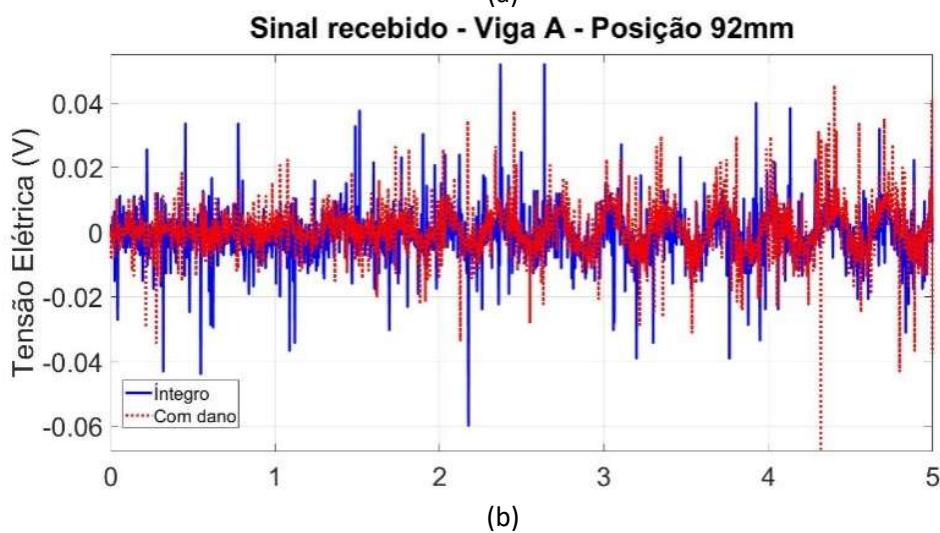
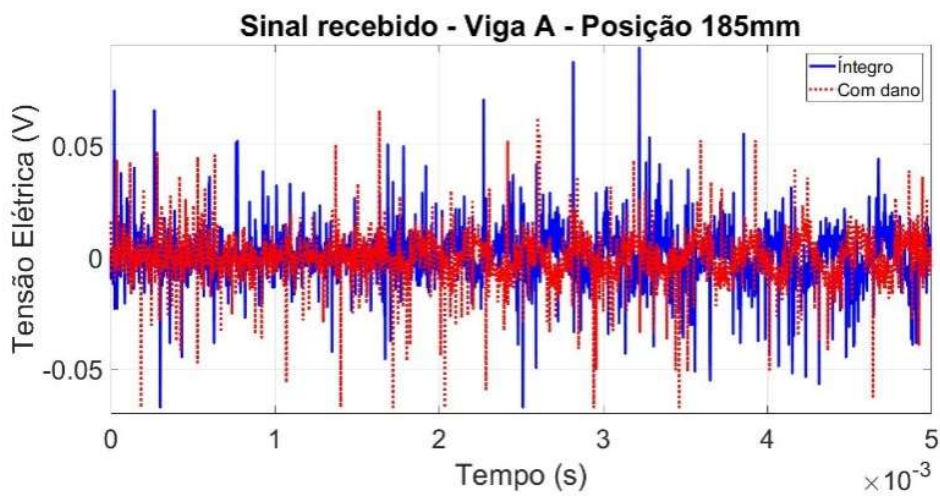
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui se apresenta as informações determinadas durante os ensaios e os resultados numéricos obtidos em função das análises realizadas.

4.1. CASO 01

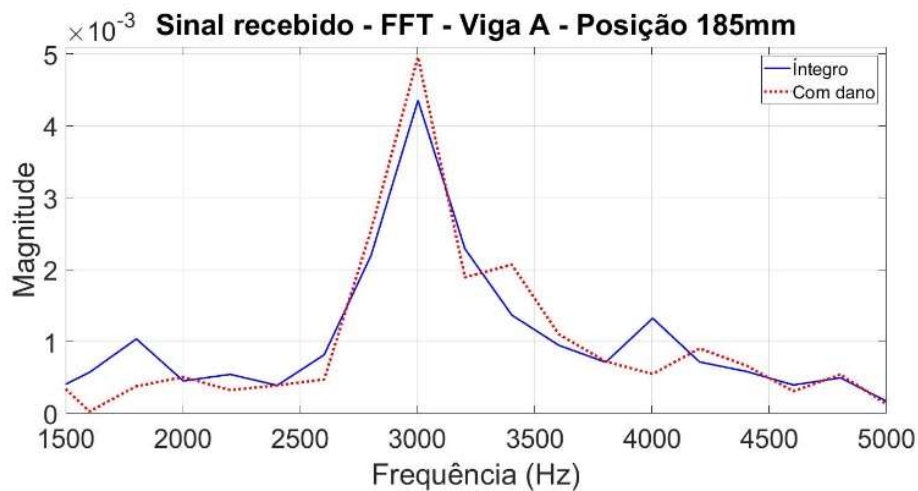
A Figura 24 apresenta a tensão elétrica no domínio do tempo e a Figura 25 apresenta a FFT do sinal para a viga V1.

Figura 24 – Sinal recebido – Domínio do tempo – Viga V1. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.

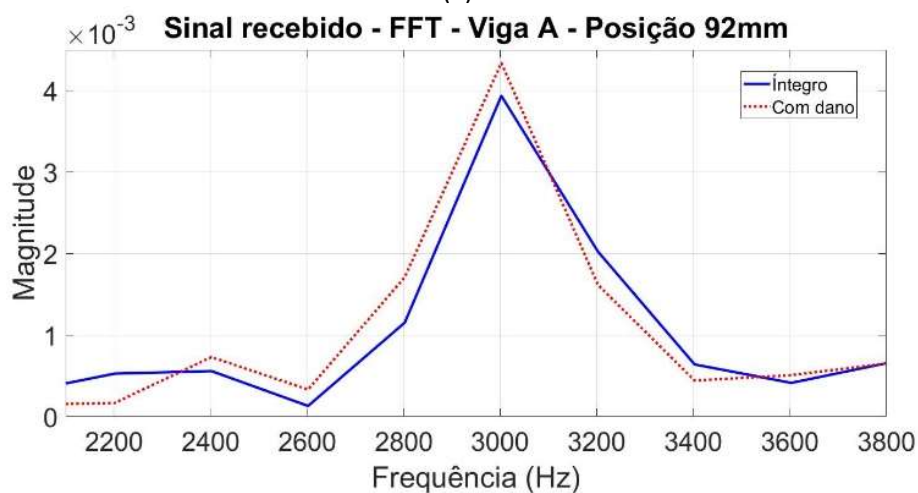


Fonte: Autoria Própria.

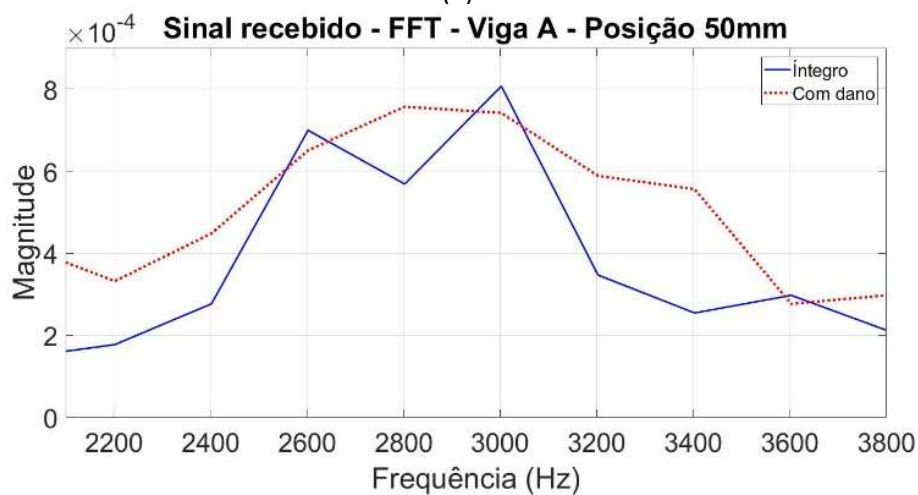
Figura 25 – Sinal recebido – Domínio da frequência – Vigas V1 (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.



(a)



(b)

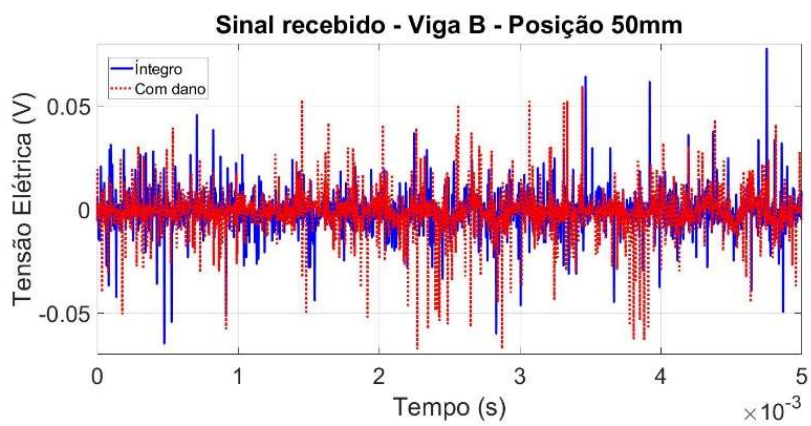
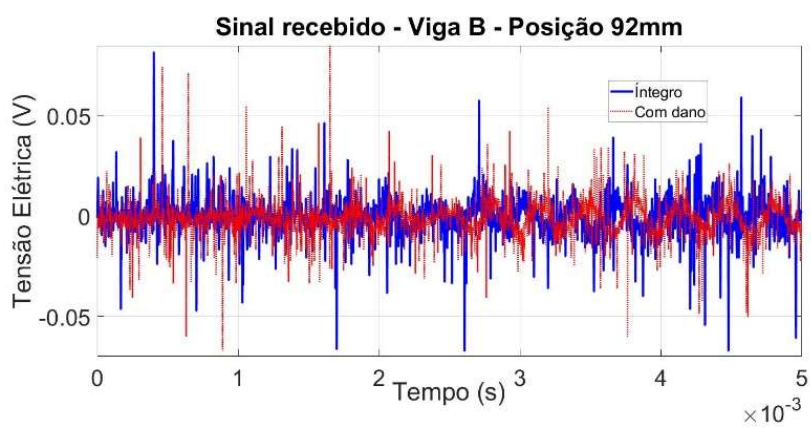
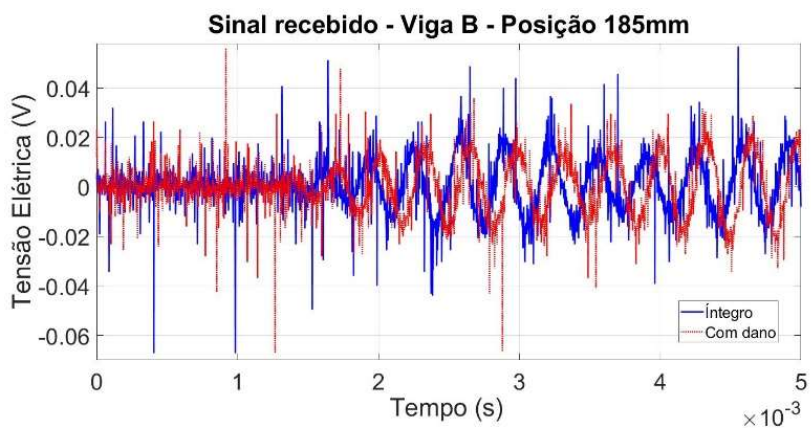


(c)

Fonte: Autoria Própria.

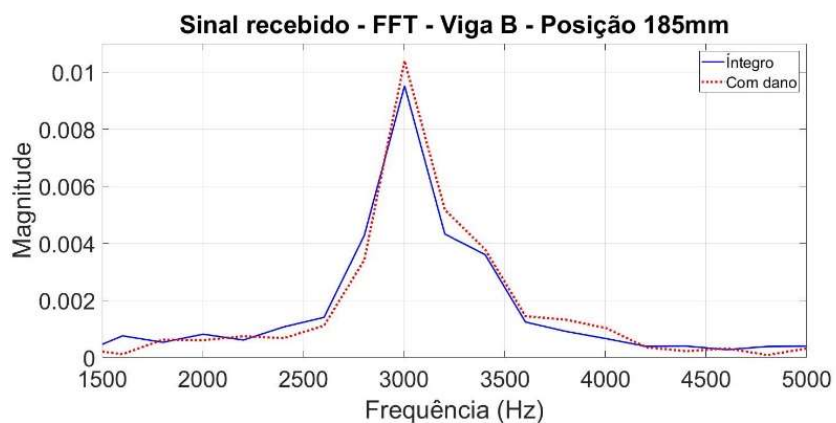
A Figura 26 apresenta a tensão elétrica no domínio do tempo e a Figura 27 apresenta a FFT do sinal para a viga V2.

Figura 26 – Sinal recebido – Domínio do tempo – Viga V2. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.

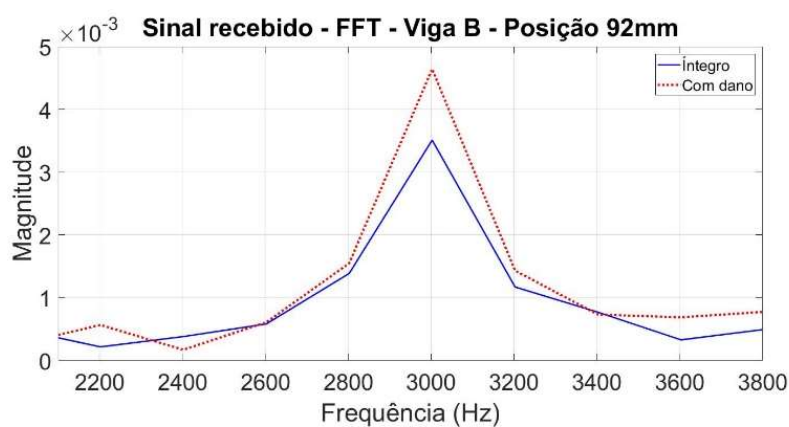


Fonte: Autoria Própria.

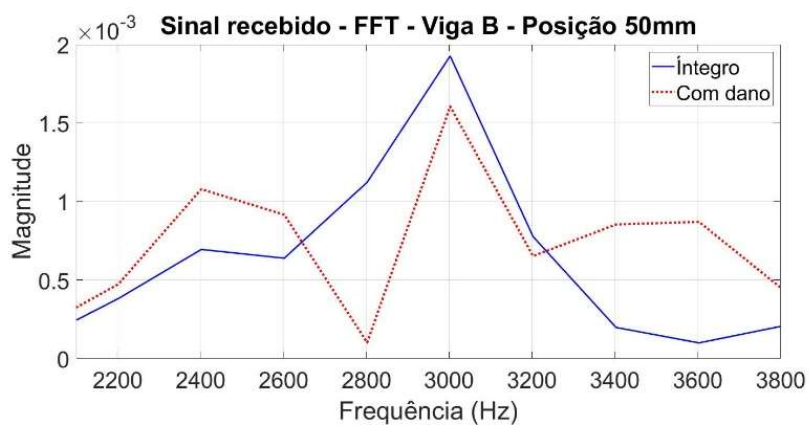
Figura 27 – Sinal recebido – Domínio da frequência – Viga V2. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.



(a)



(b)



(c)

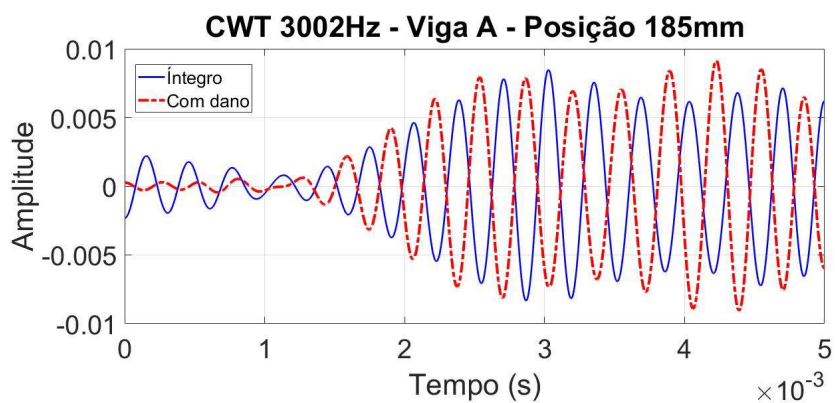
Fonte: Autoria Própria.

Conforme os gráficos apresentados nas Figuras 25 e 27, a frequência emitida foi detectada nas estruturas íntegras e danificadas.

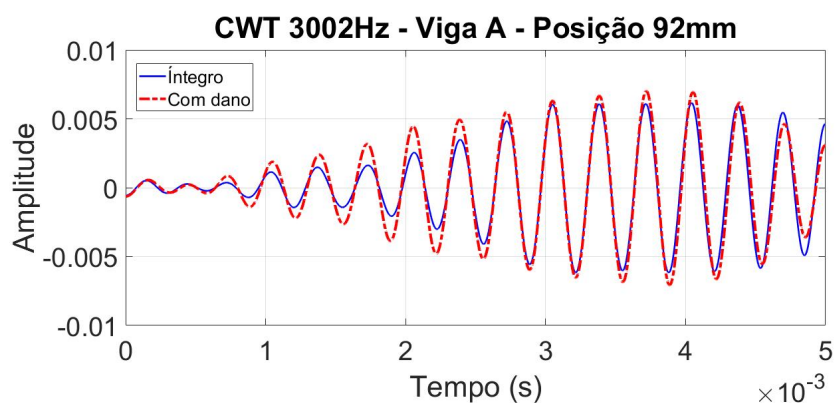
Seguindo o procedimento adotado, utiliza-se a CWT implementada pelo código computacional nos sinais recebidos da estrutura íntegra e com dano, respeitando os três casos diferenciados pela posição das pastilhas PZT's emissoras e receptoras.

A CWT de cada experimento está apresentada na Figura 28 para a viga V1 e na Figura 29 para a viga V2.

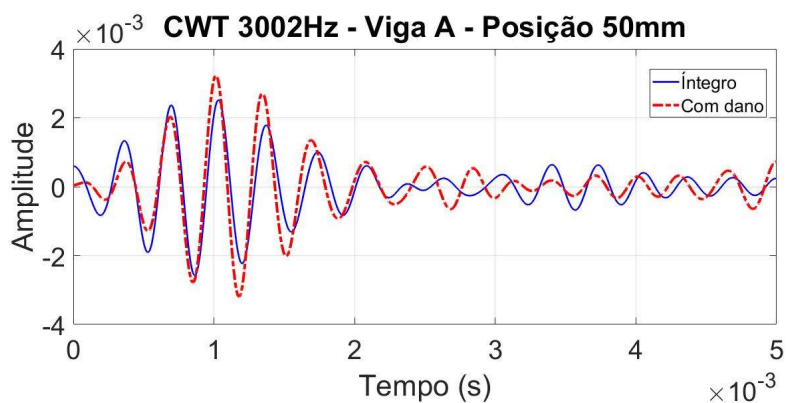
Figura 28 – CWT – Vigas V1. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.



(a)



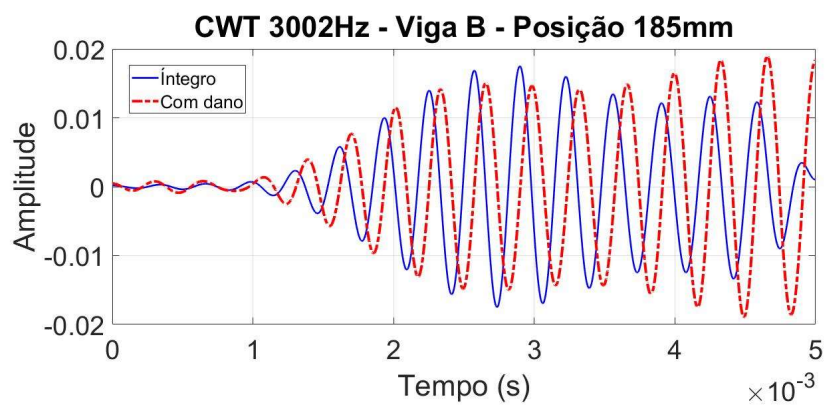
(b)



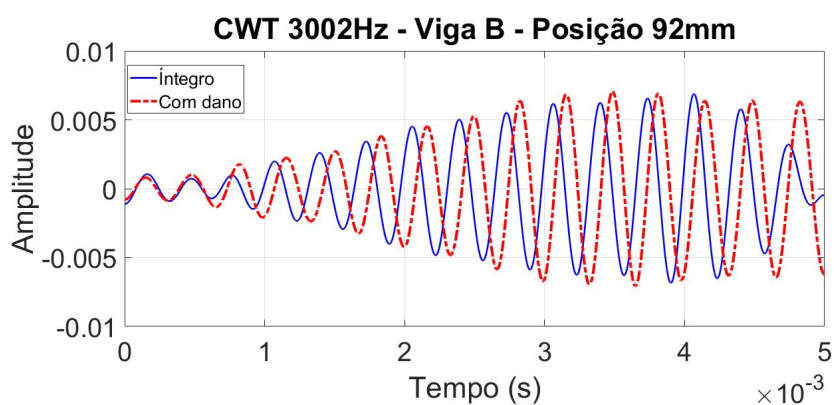
(c)

Fonte: Autoria Própria.

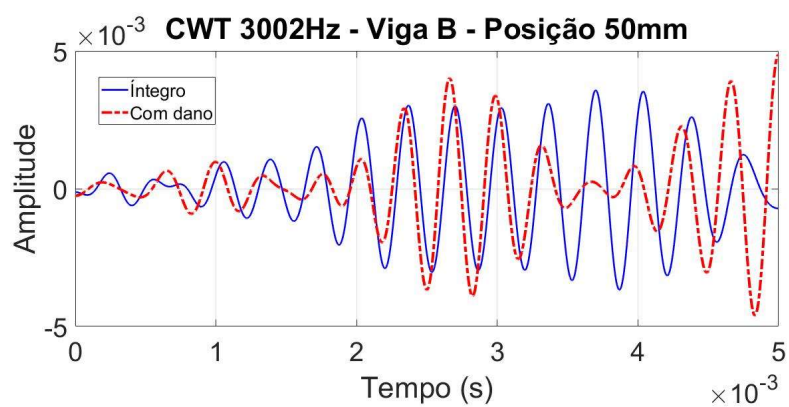
Figura 29 – CWT – Vigas V2. (a) posição 185 mm; (b) posição 92 mm; (c) posição 50 mm.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria.

Integrando as CWT's de cada caso e aplicando a metodologia do DI obtém-se um conjunto de dados onde a média do valor do DI encontrada é apresentada nas Tabela 5.

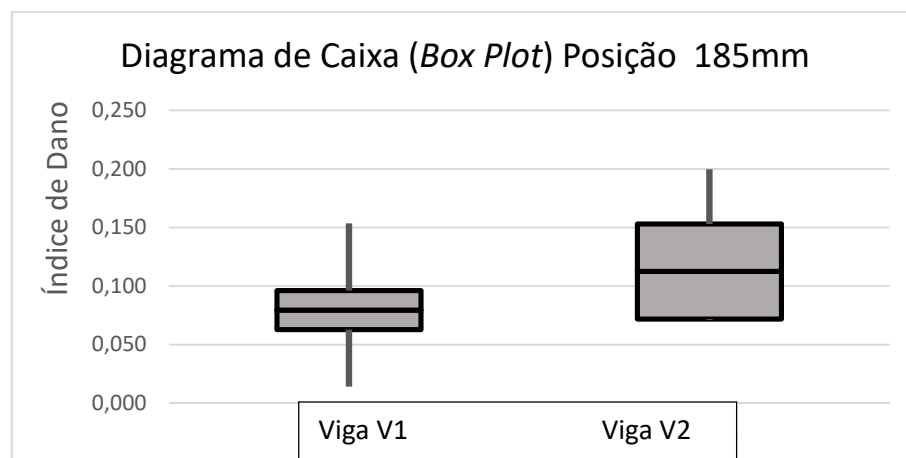
Tabela 5– Medidas resumo dos ensaios.

Posição do sensor/receptor	DI			
	Média		Desvio Padrão	
	Viga V1	Viga V2	Viga V1	Viga V2
A 1 (185 mm)	0,119	0,240	0,094	0,181
B 2 (92 mm)	0,171	0,158	0,148	0,116
C 3 (50 mm)	0,081	0,118	0,051	0,056

Fonte: Autoria Própria.

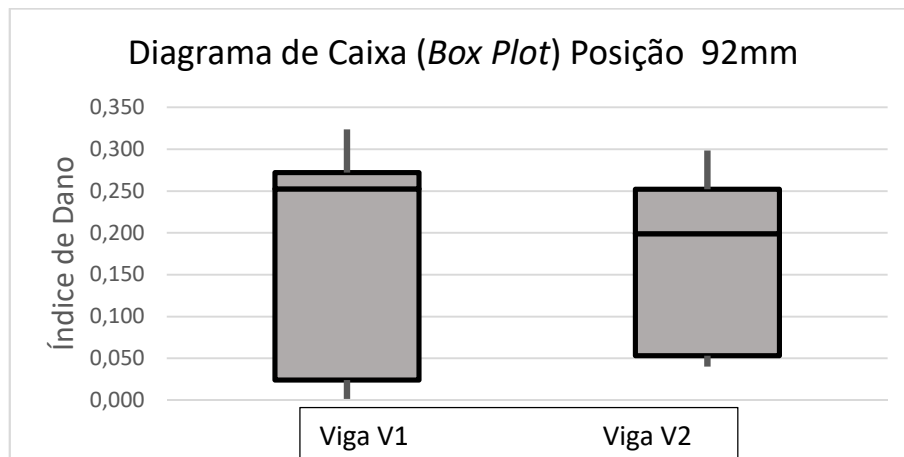
Os resultados são apresentados na forma gráfica para cada posição, com medidas de dispersão estatísticas, conforme as Figuras 29, 30 e 31.

Figura 30 – *Boxplot* do DI na posição A 1 (185 mm).



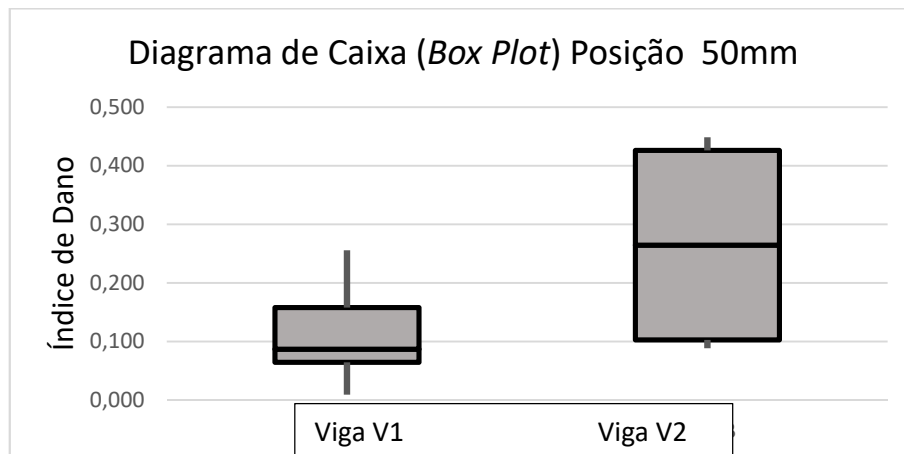
Fonte: Autoria Própria.

Figura 31 – *Boxplot* do DI na posição B 2 (92 mm).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 32 – *Boxplot* do DI na posição C 3 (50 mm).



Fonte: Autoria Própria.

As *baselines* não foram representadas, pois seus valores estão muito próximos à zero.

A observação dos resultados do DI na posição 50 mm das vigas A e B demonstram diferenças na distribuição dos resultados. Na posição 92 mm os resultados apresentam uma melhor correlação, sendo suas dispersões próximas, e por fim, na posição 185 mm verifica-se novamente uma diferença entre os valores obtidos pelo DI.

Sugere-se que a diferença nas distribuições dos resultados das vigas V1 e V2 devem-se ao material de fabricação e das variações dimensionais ocasionadas pelo corte da chapa. Também pode-se sugerir as diferenças de fabricação da pastilha PZT que interferem na resposta do DI.

A observação dos resultados induz a afirmação de que aumentando o afastamento dos sensores com relação ao dano, faz com que o DI tenha seu valor numérico reduzido. Verificando os gráficos do sinal captado no tempo, tem-se na posição 50 mm uma quantidade de ruído no sinal que é gradativamente reduzida nas posições 92 mm e 185 mm.

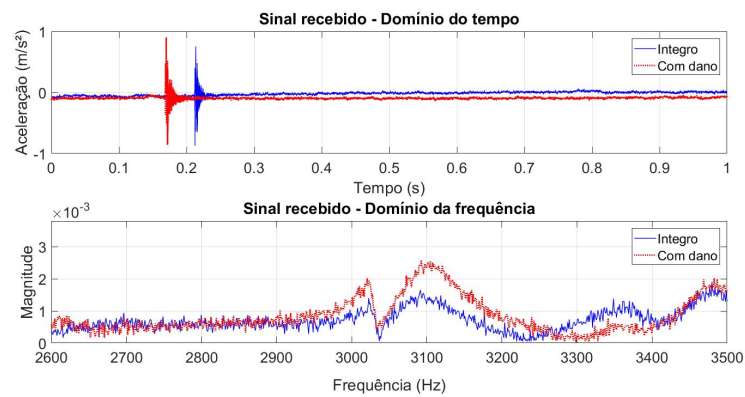
Outro ponto a ser observado, trata-se do efeito do campo próximo, que conforme descrito por Trinca e Gonsalves (2009), a região de campo próximo caracteriza-se pela ocorrência de interferências construtivas e destrutivas entre as ondas, provocando máximos e mínimos na intensidade do campo. A definição da influência do campo próximo depende de um estudo específico não abordado neste trabalho.

Os valores observados para o dano simulado se mantiveram superiores a zero. Isso indica que o método, mesmo com a diferença na distribuição dos valores de DI entre simulações com as vigas, manteve a sensibilidade para a detecção do dano. O método também manteve a sensibilidade em função da distância das pastilhas PZT referente ao dano.

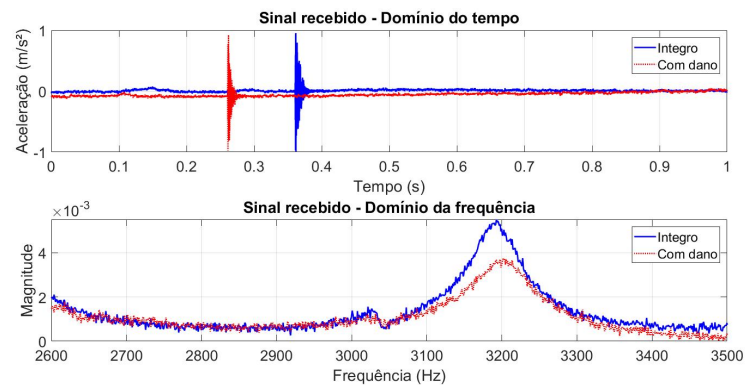
4.2. CASO 02

O sinal recebido pelo acelerômetro na situação íntegra e com dano nas posições correspondentes ao Caso 01 estão representados na Figura 33.

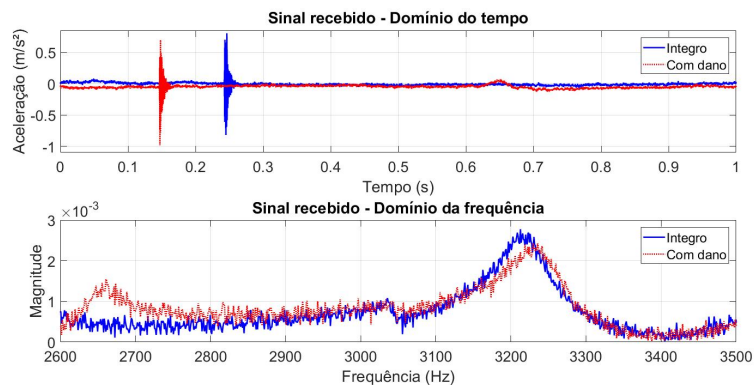
Figura 33 – Sinal recebido – Domínio do tempo e no Domínio da Frequência – (a) Emissão posição A recepção posição 1; (b) Emissão posição B recepção posição 2; (c) Emissão posição C recepção posição 3.



(a)



(b)

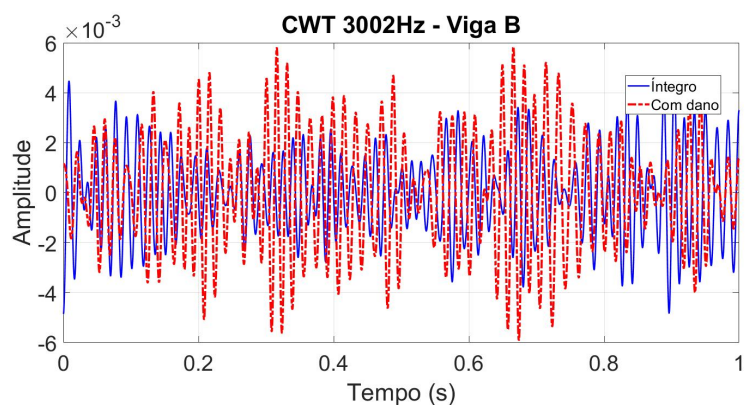
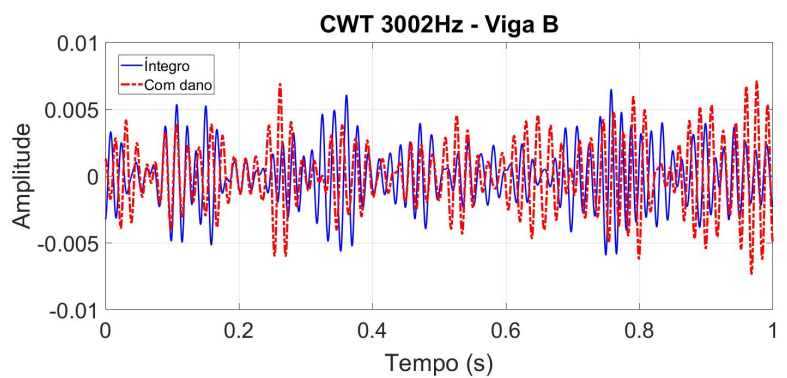
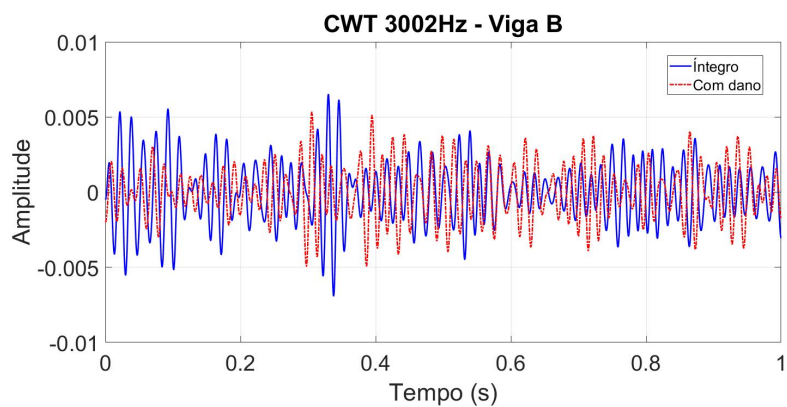


(c)

Fonte: Autoria Própria.

A CWT na situação íntegra e com dano nas posições correspondentes ao Caso 01 estão representados na Figura 34.

Figura 34 – CWT – (a) Emissão posição A recepção posição 1; (b) Emissão posição B recepção posição 2; (b) Emissão posição C recepção posição 3.



Fonte: Autoria Própria.

Aplicando a metodologia do DI obtém-se um conjunto de dados onde a média do valor do DI encontrada é apresentada na Tabela 6.

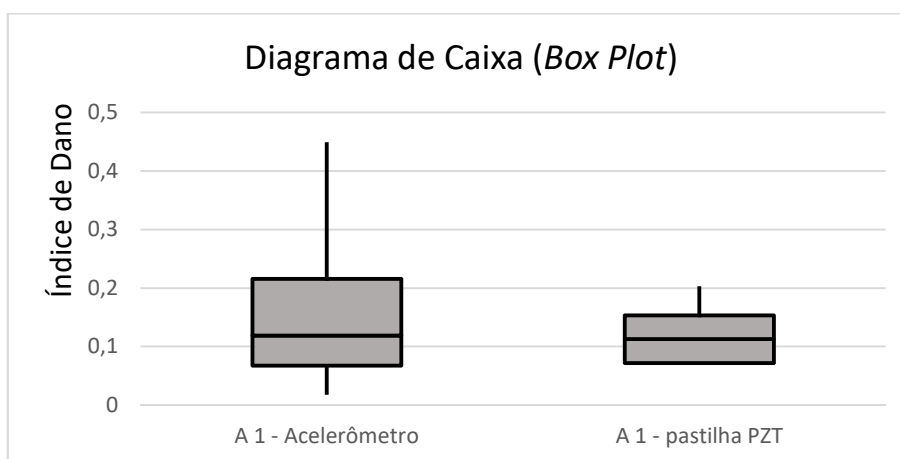
Tabela 6– Medidas Resumo dos ensaios.

Posição do sensor/receptor	DI	
	Média	Desvio Padrão
A 1	0,162352	0,123000
B 2	0,276607	0,083289
C 3	0,176022	0,052174

Fonte: Autoria Própria.

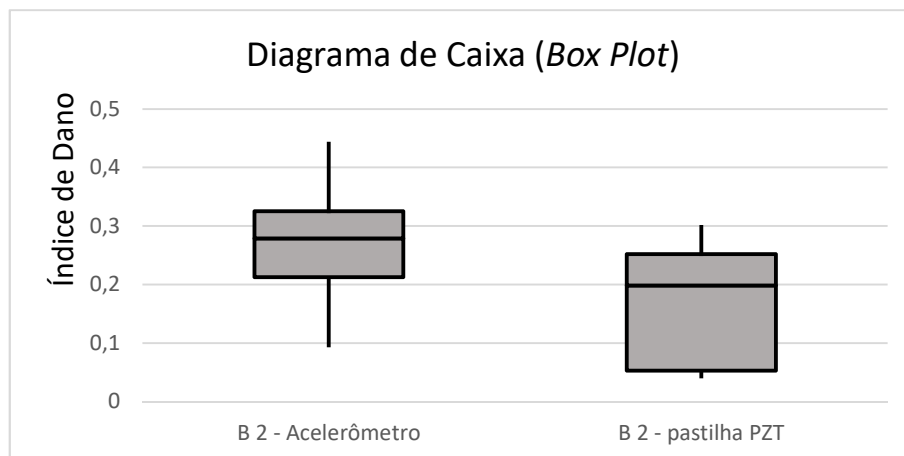
A comparação de resultados da viga V2 do Caso 01 com os valores obtidos no Caso 02 são apresentados, com medidas de dispersão estatísticas, nas Figuras 35, 36 e 37.

Figura 35 – *Boxplot* do DI na posição do emissor em A (185 mm).



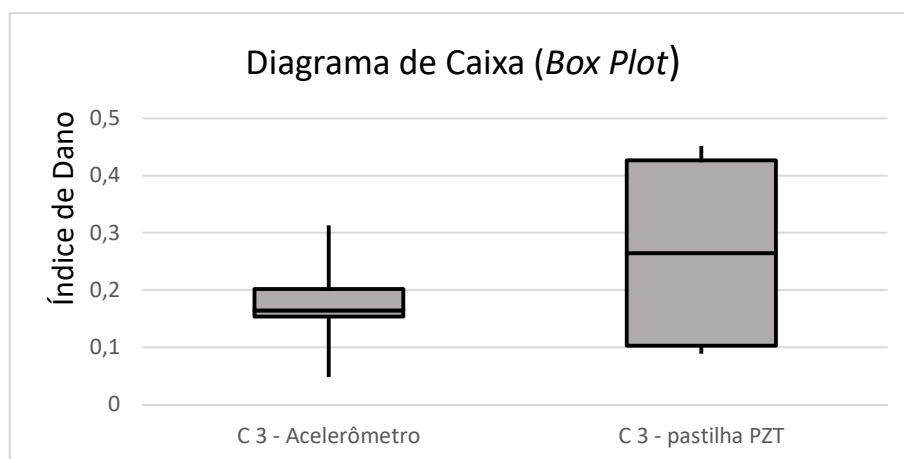
Fonte: Autoria Própria.

Figura 36 – *Boxplot* do DI na posição do emissor em B (92 mm).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 37 – *Boxplot* do DI na posição do emissor em C (50 mm).



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados demonstram que o DI obtidos pelos ensaios do Caso 01 e do Caso 02 tem uma pequena variação e ambos conseguem detectar o dano.

4.2.1. Medição cruzada com o acelerômetro

Na medição cruzada combina-se a medição de todos os pontos de recepção com os emissores com o objetivo de verificar a melhor posição para a determinação do DI.

O procedimento adotado seguiu a mesma metodologia aplicada nos casos anteriores. Desta forma a Tabela 7 apresenta os resultados do DI nas posições ensaiadas.

Tabela 7– Medidas Resumo dos ensaios.

Posição do sensor/receptor	DI	
	Média	Desvio Padrão
A 1	0,162352	0,123000
A 2	0,130271	0,086544
A 3	0,142342	0,139913
B 1	0,278062	0,073263
B 2	0,276607	0,083289
B 3	0,145995	0,059176
C 1	0,235670	0,168226
C 2	0,176787	0,085392
C 3	0,176022	0,052174

Fonte: A autoria Própria.

As posições onde a leitura é prejudicada são A 2 e A 3, entretanto é possível detectar o dano satisfatoriamente em todas as posições estudadas.

As posições onde o DI apresentou valores mais significativos foram nas posições B 1 e B 2. Também verifica-se que seu desvio padrão é baixo comparado aos outros apurados. Desta forma, a melhor relação entre atuador e receptor é na posição B 1.

4.3. CASO 03

O procedimento adotado seguiu a mesma metodologia aplicada nos casos anteriores. Os resultados da leitura com o acelerômetro 12 posições indicadas na Figura 22 estão representadas na Tabela 8.

Tabela 8– Medidas Resumo dos ensaios.

Posição do receptor acelerômetro	DI	
	Média	Desvio Padrão
1	0,131397	0,076695
2	0,364704	0,027091
3	0,279676	0,084351
4	0,246248	0,027386
5	0,252933	0,157547
6	0,427841	0,056694
7	0,185754	0,043838
8	0,239677	0,101199
9	0,318625	0,151954
10	0,382097	0,012632
11	0,9262,76	0,382097
12	0,340672	0,026756

Fonte: Aatoria Própria.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o ponto 11 apresentou o maior valor de DI, enquanto que a posição com valor menor é a posição 1.

Nota-se que todas as posições podem ser utilizadas como possíveis locais de medições.

5. CONCLUSÕES

Apresentam-se neste item as conclusões finais do trabalho desenvolvido, finalizando o estudo e indicando caminhos para estudos futuros.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho apresentou em sua introdução uma visão do direcionamento que a engenharia de construção civil tem seguido e a necessidade da análise do desempenho das estruturas ao longo do tempo, assim justificando o estudo do tema do SHM. Seguidamente apresentou-se a fundamentação teórica das técnicas necessárias ao entendimento dos processos utilizados para a elaboração dos objetivos do trabalho.

Uma metodologia foi aplicada para determinação do DI sendo essa executada em uma estrutura formada por uma viga de alumínio com um parafuso em seu centro. A falha foi definida como sendo a perda deste parafuso, e o método conseguiu detectar o dano imposto.

Os resultados obtidos no primeiro caso, utilizando emissores e receptores em PZT detectam o dano.

Com a elaboração do segundo caso, utilizando um acelerômetro como sensor, obtiveram-se resultados semelhantes aos encontrados no primeiro caso, assim confirmado a presença do dano.

Ainda se realizou uma medição cruzada, onde foi determinada a melhor relação entre receptor e atuador.

No terceiro caso, os ensaios buscaram verificar a existência de pontos onde não haveria resposta para o DI, os quais não foram localizados.

Conclui-se que o método baseado nas ondas *Lamb* se mostrou eficiente para a detecção do dano provocados pela perda do parafuso nas estruturas metálicas ensaiadas. Também ressalta-se que os emissores e sensores em PZT de baixo custo, os quais serviram de motivação para a realização deste trabalho, obteve bons resultados na identificação do dano.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas futuras, pode-se elencar:

- Implementar outra técnica conjunta para aumentar o grau de confiabilidade do método, como por exemplo a realização da análise modal da estrutura a ser ensaiada.
- A utilização da técnica aqui elencada para a detecção e falhas em estruturas de concreto armado;
- Dar continuidade aos estudos em estruturas metálicas procurando desenvolver a técnica para além de detectar o dano, conseguir localizá-lo, definir sua magnitude e por fim estabelecer parâmetros de durabilidade da estrutura;

BIBLIOGRAFIA

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

BECKER, A.; CAREY, G. F.; ODEN, J. T. **Finite Elements: An Introduction**. EnglewoodCliffs: Prentice-Hall, 1981.

BOLZAN, M. J. A. **Transformada em Ondeleita: Uma necessidade**. São Paulo, Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 28, n° 04, 2006, pp. 563-567.

CAREY, G. F.; ODEN, J. T. **Finite Elements: Computational Aspects**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.

CARRERA, M. R.; SEGUNDINHO, P. G. A.; ROCCO LAHR, F. A.; DIAS A. A.; CALIL JUNIOR, C. **Bending stiffness evaluation of TecanasGuarujá lumber trough tests of transverse and longitudinal vibration**. ActaScientiarum. Technology, Maringá, v. 34, n. 1, p. 27-32, 2012

CHEN, R.-L.; WANG, B.-T. **The Use of polyvinylidene fluoride films as sensors for the experimental modal analysis of structures**. Smart Materials and Structures. New York, n. 13, p. 791-799, 01 June 2004.

CHUI, Y. H.; BARCLAY, D. W.; COOPER, P. A. **Evaluation of wood poles using a free vibration technique**. Journal of Testing and Evaluation. West Conshohocken, v. 27, n. 3, p. 191-195, 1999

CLARK, R.L.; SAUNDERS, W.R.; GIBBS, G.P. **Adaptive structures: dynamics and control**. New York, John Wiley & Sons, 1998.

CURIE, J.; CURIE, P. **Development, via compression, of electric polarization in hemihedral crystals with inclined faces**. Bulletin de la Societe de Minerologie de France, 3, 1880.

CURIE, J.; CURIE, P. **Contractions and expansions produced by voltages in hemihedral crystals with inclined faces**. ComptesRendus 93 1881.

DOMINGUES, M.O.; MENDES, O.; KAIBARA, M.K.; MENCONI, V.E.; BERNARDES, E. **Explorando a transformada Wavelet contínua**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, n° 3, 2016. e3314.

EDALATI, K.; KERMANI, A.; NADERI, B.; PANAHI, B. **Defects Evaluation in LambWaveTestingofThinPlates**. 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Bahrain, Manama. 2005.

FARIAS, C. T. T. **Utilização das ondas ultrassônicas de Lamb na inspeção de materiais compósitos laminados fibra-metal**. 2006. Tese –(Doutorado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

FARIAS, C. T. T.; PARANHOS, R. S.; SILVA, I. C.; SIMAS FILHO, E. F.; MENEZES, I. J.; DIAS, J. C. **Estudo da propagação das ondas Lamb em chapas de alumínio com**

furos de diferentes profundidades. 5th Pan American Conference for NDT, Cancun, 2011.

FARRAR, C.R.; DOEBLING, S.W. **Vibration-Based Structural Damage Identification.** Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Royal Society, London, UK. 1999.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMENT, M. T. **An Introduction to Damage Prognosis - Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems.** s.l.:J.Chichester, UK. Wiley & Sons, Ltd, 2005.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. **An Introduction to Structural Health Monitoring.** Philosophical Transactions of The Royal Society, London, UK. v. 365, 2006, p. 303-315.

FARRAR, C. R.; DOEBLING, S. W.; NIX, D. A. **Vibration-based structural damage identification.** Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2001

FARRAR, C.R.; WORDEN, K. **Structural health monitoring – A machine learning perspective.** Chichester, UK. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

FRANCO, V. R. **Monitoramento da integridade em estruturas aeronáuticas.** 2009. 202f. Dissertação (Mestrado, Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2009.

FOURIER, J. B. J. *Théorie Analytique de la Chaleur.* (Firmin Didot, Paris, 1822). Disponível em <https://archive.org/details/thorieanalytiq00four>. Acesso em jan. 2018.

GRESIL, M.; GIURGIUTIU, V. **Time-domain hybrid global-local concept for guided-wave propagation with piezoelectric wafer active sensor.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2013.

GURGEL, V. C. **Aplicação de técnicas *Wavelets* em análise de séries temporais para detecção de correlações.** 2013. 62f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA. Angicos, 2013

HAN, J.; Kim, C.; Kim, J. **The propagation of *Lamb* waves in a laminated composite plate with a variable stepped thickness.** Composite Structures, USA, v. 76, n. 4, 2005. p. 388-396.

HUGHES, T. J. **The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1987.

JAIN, A. K., DUIN, R. P. & MAO, J. **Statistical Pattern Recognition: A Review.** IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(1), 2000.

LAMB, H. F. R. S. **On waves in an elastic plate.** Philosophical Transactions of the Royal Society A, 1917.

LEUCAS, L. F. **Utilização das técnicas de impedância eletromecânica e ondas *Lamb* para identificação de dano em estruturas com rebites.** 2009. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2009.

LEITE, F. E. A. **Análise Estatística de Padrões Sísmicos: decomposição em multiescala.** 2007. 135f. Tese (Doutorado em Física da Matéria Condensada) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

LEMISTRE, M.; GOUYON, R.; KACZMAREK, H.; BALAGEAS, D. **Damage Localization in Composite Plates Using *Wavelet* Transform Processing on *Lamb* Wave Signals,** Second International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, USA. 1999.

LIANG, C.; SUN, F.; ROGERS, C. A. **Electro-mechanical impedance modeling of active material systems.** Smart Material and Structures, New York, v. 5, n. 2, 1996.p. 171-186, doi: 10.1088/0964-1726/5/2/006.

MALLAT, S. G. **A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation.** IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, v. 11, n. 7, p. 674-693, 1989

MORETTIN, P. A., WILTON, O. B. **Estatística Básica.** 6ed, Saraiva, São Paulo 2010

MARQUI, C. R. **Modelagem de Estruturas Piezoelétricas para Aplicação em Localização de Falhas.** 2007. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira. 2007

MOURA JR J. R. V.; PARK S.; STEFFEN JR V.; INMAN D. J. **Identificação de corrosões em vigas usando métodos de ondas *Lamb* e sinais de impedância.** 16° POSMEC – Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica, 2006.

ONATE, E.; HANGANU, A.; MIQUEL, J. **Prediction of Damage and Failure in Civil Engineering Structures Using a Finite Element Model.** European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, Spain. 2000. pp. 53–70.

PANDEY, A. K.; BISWAS, M. S. **Damage detection from changes in curvature mode shapes.** *Journal of Sound and Vibration.* 1991. p 321-322.

PINES, D.J. **The Use of Wave Propagation Models for Structural Damage Identification.** Structural Health Monitoring, Current Status and Perspectives. International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford University, Palo Alto, California. 1997. pp. 665–677.

PRAZZO, C. E. **Análise Modal de uma Estrutura do Tipo Viga Utilizando Materiais Piezoelétricos (PVDF) como Sensores.** 2011. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista - UNESP, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. 2011.

PROTÁZIO, J. M. B. **Análise *Wavelet* Aplicada a Sinais Geofísicos**. 2002. 150f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas.2002.

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

ROSA V. A. M.**Localização de danos em estruturas anisotrópicas com a utilização de ondas guiadas**.2016. 88f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2016

ROSE, J. L., **Ultrasonic Guided Waves in Solid Media**, Cambridge University Press, Nw York, 2014 .

RYTTER, A. **Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures**. Building Technology and Structural Engineering.Aalborg University, Aalborg, Denmark. 1993.

S. JAVID M.; FARHANG H.**Application of signal processing techniques to ultrasonic testing of plates by *S0 Lamb* wave mode**. NDT & E International, 2011.Vol 44 pp 131–137.

SANTOS, J. G. F.; BORGES, D. M.; FINZI NETO, R. M.; ROCHA, L. A. A. **Monitoramento utilizando a técnica de ondas *Lamb* para detecção de dano em estruturas metálicas**, XXXVII Ibero-Latin American CongressonComputationalMethods in Engineering - CILAMCE. Brasília. 2016

SILVA E. J.; CRUZ F. C.; ZANINI D. H. S.; PEREIRA G. S.; FARIAS C. T. T.; SILVA I. C. **Detecção e classificação de descontinuidades tipo fenda em chapa de alumínio utilizando ondas ultrassônicas guiadas de *Lamb*, transformada de *Fourier* e redes neurais artificiais**, Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção – ConaEnd&lev, São Paulo. 2014.

SILVA, R. S. Y. R. C. **Monitoramento e Identificação Numérico e Experimental de Danos em Vigas e Pontes de Aço e Concreto Utilizando Transformadas de *Wavelet***. 2015. 237p. Tese (Doutorado Estruturas e Construção) Universidade de Brasília-Faculdade de Tecnologia. Brasília. 2015.

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

SOHN, H. **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. 2005.

SORIANO, H. L. **Elementos Finitos: Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: CiênciaModerna, 2009.

STUBBS, N.; Kim, J-T.;FARRAR, C.R.**Field Verification of a Nondestructive Damage Localization and Severity Estimation Algorithm**,SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1995

TRINCA, A.T., GONSALVES, R. **Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira**. Rev. Árvore vol.33 no.1 Viçosa. 2009.

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. Reading: Addison-Wesley, 1977.

VIKTOROV, I. A.; **Rayleigh and Lamb Waves**. 2 ed. New York, Plenum Press. 1970

VILLALBA MORALES, J. D. **Detecção de dado em estruturas via inteligência computacional e análise dinâmica**.2012, Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.2012.

WANG, B.-T.; WANG, C.-C.**Feasibility analysis of using piezoceramic transducers for cantilever beam modal testing**. Smart Material and Structures. New York.1997. v. 6, n. 1, 106-116. doi: 10.1088/0964-1726/6/1/013.

WANG, B.-T.; CHEN, P.- H.; CHEN, R.- L. **Finite element model verification for the use of piezoelectric sensor in structural modal analysis**. European Journal of Mechanics, Paris. 2006, v. 22, n. 2, p. 235-242.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.**The Finite Element Method: The Basis**. 5. ed.Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.