



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

Vinicius Augusto Matheus Rosa

**LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS ANISOTRÓPICAS COM A
UTILIZAÇÃO DE ONDAS GUIADAS**

Prof. Dr. Vicente Lopes Junior
Orientador

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de conhecimento: **Mecânica dos Sólidos**

Ilha Solteira
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R788l Rosa, Vinicius Augusto Matheus.
Localização de danos em estruturas anisotrópicas com a utilização de ondas guiadas / Vinicius Augusto Matheus Rosa. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
88 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos , 2016

Orientador: Vicente Lopes Junior
Inclui bibliografia

1. Materiais compósitos. 2. Ondas guiadas. 3. SHM. 4. Diagnóstico por imagem. 5. PZT.

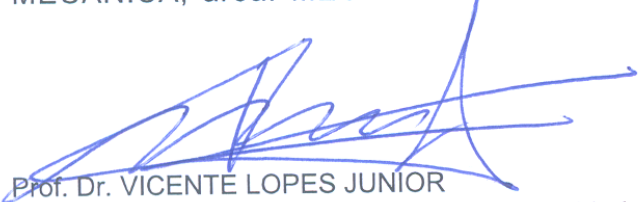
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Localização de danos em estruturas anisotrópicas com a utilização de ondas guiadas

AUTOR: VINICIUS AUGUSTO MATHEUS ROSA

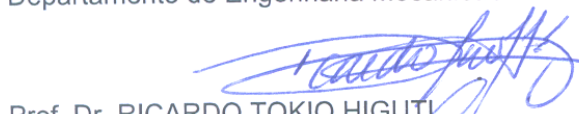
ORIENTADOR: VICENTE LOPES JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MECANICA DOS SÓLIDOS pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. RICARDO TOKIO HIGUTI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA

Departamento de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã

Ilha Solteira, 25 de julho de 2016

RESUMO

Este trabalho analisa um método de Monitoramento da Integridade de Estruturas (SHM, do inglês Structural Health Monitoring) usando funções erro calculadas a partir de ondas guiadas que são refletidas nos danos. Este método foi primeiro testado por Gorgin *et al* em 2014, que apresentou o método aplicado para materiais isotrópicos. A abordagem é testada experimentalmente em materiais anisotrópicos e isotrópicos. O sinal da estrutura intacta, que será referido como *baseline* e o sinal atual para cada caminho de propagação (entre dois transdutores PZT) são medidos e a energia do sinal de dispersão para cada caminho é calculada em um dado intervalo. Assumindo que existe dano no ponto avaliado, a onda irá refletir neste ponto e se propagar até o sensor. A técnica é baseada no tempo de propagação (*time-of-flight*) entre o atuador (primeiro transdutor PZT) até o ponto avaliado mais o tempo de propagação do ponto avaliado até o sensor (segundo transdutor PZT, em uma configuração *pitch-catch*) para cada ponto da estrutura. A velocidade de propagação em materiais anisotrópicos é dependente da direção de propagação. Isto não acontece em materiais isotrópicos, onde a velocidade de propagação é constante e não é dependente da direção de propagação. No caso de materiais anisotrópicos as velocidades de propagação para diferentes direções foram calculadas experimentalmente e incorporadas ao algoritmo para calcular o *time-of-flight* corretamente para todos os pontos da estrutura. A energia do sinal de dispersão é calculada em um intervalo baseado no *time-of-flight* de cada posição analisada. A estimativa da localização do dano é definida através de uma função erro resultante para cada ponto da área monitorada. Como a função erro é baseada na interferência do dano na propagação de ondas guiadas, o maior valor da função erro mostra uma menor probabilidade de dano naquela posição. Uma imagem é gerada com um valor da função erro para cada ponto avaliado da estrutura. A função erro compara valores de energia nos devidos intervalos para cada par de transdutores PZT. O método foi aplicado para várias frequências de excitação, afim de obter-se um resultado melhor.

Palavras-chave: Materiais compósitos. Ondas guiadas. SHM. Diagnóstico por imagens. Transdutores PZT.

ABSTRACT

This work highlights a method for Structural Health Monitoring using error functions computed from guided waves reflected from damage. This method was first tested by *Gorgin et al* in 2014, who presented the method for isotropic plates. The approach is experimentally tested on anisotropic and isotropic specimens such as composite and aluminum plates, respectively. The baseline and test signals of each sensing path (between two PZT transducers) are measured and the energy of the scatter signal for each path is calculated in a given range. The structure is meshed and the middle point of each component is considered in the calculations. Assuming that there is damage in the evaluated position, the wave will reflect at this point and propagate to the next transducer. The technique is based in the time-of-flight between the actuator (first PZT transducer) and the evaluated point plus the time-of-flight of the evaluated point to the sensor (second PZT transducer, for a pitch-catch configuration) for each mesh component of the structure. The wave speeds in anisotropic specimens are propagation direction dependent. It does not happen in isotropic materials, which have the wave speed constant and non-dependent of the propagation direction. In the case of anisotropic materials, the wave speed for different angles were experimentally computed and incorporated in the algorithm in order to calculate the proper time-of-flight. The energy of the scatter signal is computed in a time range based on the time of flight of each analyzed position. The estimated damage location is defined through a resultant error function for each evaluated point in the monitored area. As the error function is based on the interference of the damage in the propagation of guided waves, the higher value of the error implies the less likelihood of damage in that position. An image is generated with an error value for each mesh position in the plate. This error function compares the energy in the given ranges for each pair of transducers. In addition, several frequencies were tested and the results for each one were combined in order to get a better result.

Keywords: Composite materials. Guided waves. SHM. Imaging diagnostic. PZT transducers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Porcentagem dos materiais utilizados na construção do AIRBUS A350 XWB.....	11
Figura 2 -	Ilustração dos tipos de entrelaçamento de fibras de compósitos.....	21
Figura 3 -	Exemplos de orientação no empilhamento de camadas.....	22
Figura 4 -	Exemplos de material quase-isotrópico (a) e material anisotrópico (b)	23
Figura 5 -	Sistema de coordenada em uma placa fina de espessura $2d$	23
Figura 6 -	Ilustração do comportamento das superfícies quando o modo de propagação simétrico (a) e assimétrico (b) se propagam na placa.....	24
Figura 7 -	Configurações da rede de sensores: <i>pulse-echo</i> (a) e <i>pitch-catch</i> (b)	25
Figura 8 -	Resultado experimental obtido por Zhongqing e Ye (2009) demonstrando claramente o fenômeno de atenuação	28
Figura 9 -	Figura 9 – Exemplo da análise de dispersão da onda de Lamb com frequência de excitação de 300kHz	29
Figura 10 -	Gráfico das curvas de dispersão do alumínio.....	30
Figura 11 -	Gráfico das curvas de dispersão do alumínio destacando região pouco dispersivas dos modos S_0 e A_0	30
Figura 12 -	Disposição dos transdutores PZT na placa de alumínio	33
Figura 13 -	Crescimento da energia no sinal <i>scatter</i>	34
Figura 14 -	Energia do sinal <i>scatter</i> para um componente da malha da estrutura analisada em um dado intervalo para os caminhos h e k (de acordo com o <i>TOF</i>)	36
Figura 15 -	(a) Foto dos materiais e equipamentos utilizados no experimento e (b) Ilustração dos materiais e equipamentos utilizados no experimento.....	38
Figura 16 -	Transdutor PZT modelo T110-H4e-62 fabricado pela Piezo Systems, Inc. e cortado em quadrado com medida de 10mm de lado.....	39
Figura 17 -	(a) Foto da placa utilizada no experimento e (b) Ilustração da placa mostrando posicionamento dos transdutores.....	40
Figura 18 -	Caminhos entre sensores/atuadores utilizados na localização dos danos.....	41
Figura 19 -	Exemplo da obtenção do sinal Burst 5	42
Figura 20 -	Curva de dispersão do Alumínio (— A_0 , — S_0 e - - A_1)	43
Figura 21 -	Sinal emitido pelo transdutor PZT 1 para 150KHz (a), 200KHz (c), 250KHz (e), 300KHz (g) e 350KHz (i), e sinal captado no transdutor PZT 3 para 150KHz (b), 200KHz (d), 250KHz (f), 300KHz (h) e 350KHz (j)	44
Figura 22 -	Ilustração do posicionamento do dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d).....	45
Figura 23 -	Fotos do posicionamento do dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d).....	46
Figura 24 -	Efeito do dano 4 no caminho P_{56} para 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e)	47
Figura 25 -	Disposição dos PZTs na placa de compósito.....	48
Figura 26 -	(a) Foto dos materiais e equipamentos utilizados no experimento e (b) Ilustração dos materiais e equipamentos utilizados no experimento.....	51
Figura 27 -	Transdutor PZT modelo SML-SP1-1/4-0 fabricado pela Accelent	27
Figura 28 -	(a) Foto da placa utilizada no experimento e (b) Ilustração da placa mostrando posicionamento dos transdutores.....	53
Figura 29 -	Curvas de dispersão de velocidade de fase. Propagação a $0,5^\circ$ (curvas sólidas), $22,5^\circ$ (curvas tracejadas) e $44,5^\circ$ (curvas de pontos)	54

Figura 30 -	Ilustração do posicionamento do dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d).....	55
Figura 31 -	Fotos do posicionamento do dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d)	56
Figura 32 -	Exemplo do cálculo do TOF para determinação da velocidade de grupo.....	58
Figura 33 -	Sinal <i>scatter</i> obtido para o caminho P_{12} para 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e)	59
Figura 34 -	Sinal <i>scatter</i> obtido para o caminho P_{19} para 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e)	60
Figura 35 -	Energia (Valor RMS) do sinal <i>scatter</i> dos caminhos P_{12} e P_{19} para 250KHz (a) e energia do sinal <i>scatter</i> dos caminhos P_{12} (——) e P_{19} (-----) calculado no intervalo estimado através do <i>time-of-flight</i> para o componente da malha localizado na posição $x=350\text{mm}$ e $y=200\text{mm}$	61
Figura 36 -	Valores da função erro na placa de alumínio baseado nos caminhos P_{12} e P_{19} para frequências de 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).....	62
Figura 37 -	Valores da função erro final para frequências de 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e)	64
Figura 38 -	Valores da função erro final com as cinco frequências de excitação combinadas para o dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d)	65
Figura 39 -	Direções em que a velocidade de propagação foi calculada para cada frequência de excitação $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 26,56^\circ, \theta_3 = 45^\circ, \theta_4 = 71,56^\circ, \theta_5 = 90^\circ$	67
Figura 40 -	Valores da velocidade de propagação experimental em função da direção de propagação para a placa de compósito testada (figura 31 ^a)	68
Figura 41 -	Valores da função erro na placa de alumínio baseado nos caminhos P_{12} e P_{19} para frequências de 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).....	70
Figura 42 -	Valores da função erro final para frequências de 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300Hz (d) e 350KHz (e).....	72
Figura 43 -	Valores da função erro final com as cinco frequências de excitação combinadas para o dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d)	73
Figura 44 -	Ilustração da ocorrência da piezeletricidade. (a) Cristal sem aplicação de campo elétrico ou deformação. (b) Cristal atuando como sensor (efeito direto) (c) Cristal atuando como atuador (efeito inverso)	81
Figura 45 -	Célula unitária de PZT: (a) Tipo perovskite Titanato de Chumbo (PZT), célula unitária no estado de simetria cúbica abaixo da temperatura de Curie. (b) célula unitária distorcida tetragonalmente acima da temperatura de Curie.....	83
Figura 46 -	Dipolo elétrico nos domínios. (a) Cerâmica ferroelétrica não polarizada (sem aplicação de campo elétrico ou deformação), (b) durante a polarização e (c) após a polarização.....	84
Figura 47 -	Ilustração do cubo piezelétrico para análise tridimensional.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS

Siglas

NDE	<i>Nondestructive Evaluation</i>
PDI	<i>Probability-based Diagnosis Imaging</i>
PVDF	Fluorido de Polivinilideno
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
RAPID	Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Defects
RMS(t_i)	<i>Root Mean Square</i> até o tempo t_i
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
TOF	<i>time-of-flight</i>
UD	Compósitos com fibras unidirecionais
3D	Três dimensões

Letras gregas

ε_{ij}^T	Permissividade Dielétrica
ψ	Função Potencial do modo transversal
φ	Função potencial do modo longitudinal
ρ	Densidade de massa específica
ν	Módulo de Poison
μ	Módulo de cisalhamento
ω	Frequência Angular
λ	Comprimento de onda
ω_0	Frequência de excitação
β_{ij}	Limite da energia do sinal scatter para os caminhos i e j
ε_{ij}	Função erro para os caminhos i e j
α	Valor de energia onde a função erro será calculada
θ_{Di}	Direção (ou ângulo) do atuador i para o dano
θ_{Di}	Direção (ou ângulo) do dano para o sensor i
ε	Função erro resultante

Letras Latinas

a	Número total de funções erro para uma rede com N sensores
A_i	Modo Antissimétrico de propagação
$A(d_i)$	Amplitude da onda a distância d_i
c	Velocidade de Grupo
$c(\theta_{Di})$	Velocidade de propagação na direção do dano para o sensor i
$c(\theta_{Di})$	Velocidade de propagação na direção do atuador i para o dano
d	Metade da espessura da placa
D_i	Deslocamento causada pela eletricidade
d_i	Distância do atuador para o sensor
d_{mkl}	Constante Piezelétrica
E	Módulo de Elasticidade
E_k	Campo elétrico
f	Frequência
f_s	Frequência de amostragem

k	Número de onda
l_{Di}	Distância entre o dano e o sensor i
l_{iD}	Distância entre o atuador i e o dano
N	Número de atuadores ou sensores
P_{ij}	Caminho de propagação entre o atuador i e o sensor j
R	Número de possíveis caminhos em uma rede de sensores
S_i	Modo simétrico de propagação
S_{ij}	Tensor Deformação
s_{ijkl}^E	Tensor de Compliance
$s(\omega_0, t_i)$	Amplitude do sinal scatter na frequência de excitação ω_0 e no tempo t_i
t	Tempo
T_{kl}	Deformação Mecânica
TOF_i	Tempo de propagação entre o atuador i e o dano mais o tempo entre o dano até o sensor i
v_L	Velocidade do modo longitudinal
v_T	Velocidade do modo transversal
Z	Número de Amostras

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVO	15
3.	MATERIAIS E CONCEITOS BÁSICOS UTILIZADOS NA METODOLOGIA	16
3.1.	MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL (SHM)	16
3.2.	MATERIAIS COMPÓSITOS	19
3.2.1.	Tipos de Reforços	20
3.2.2.	Orientação	22
3.3.	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ONDAS DE LAMB	23
3.3.1.	Tipos de Transmissão	24
3.3.2.	Equações Constitutivas	25
3.3.3.	Atenuação	27
3.3.4.	Dispersão	28
4.	METODOLOGIA	32
4.1.	MATERIAL ISOTRÓPICO	32
4.1.1.	Metodologia Experimental e Materiais	37
4.1.1.1.	<i>Corpo de Prova</i>	38
4.1.1.2.	<i>Posicionamento dos danos</i>	44
4.2.	Material Anisotrópico	48
4.2.1.	Testes Experimentais na Placa Compósita e Materiais	50
4.2.1.1.	<i>Corpo de Prova</i>	51
4.2.1.2.	<i>Posicionamento dos danos</i>	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1.	MATERIAL ISOTRÓPICO	57
5.2.	MATERIAL ANISOTRÓPICO	66
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
6.1.	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	75
	Referências	76
	Apêndice	81

1 INTRODUÇÃO

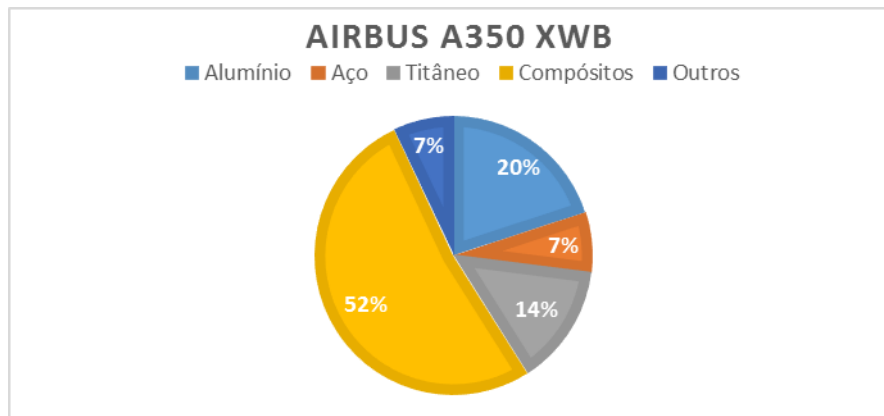
Atualmente muitos estudos têm focado em desenvolver e aprimorar técnicas que são capazes de monitorar a integridade estrutural de vários tipos de sistemas como veículos, aviões e etc. Esta preocupação é dada principalmente a sistemas de segurança crítica onde pequenos danos e falhas, como ruptura local do material, podem causar acidentes e grandes catástrofes.

Também existe uma grande preocupação com as aeronaves militares, que são projetadas para apresentar alto desempenho em voos, o que exige um grande esforço da estrutura. Estas aeronaves possuem um alto custo de produção e para compensar o alto investimento a estimativa de vida destas aeronaves deve ser estendida. Alguns modelos construídos entre 1950 e 1970 foram projetados com uma estimativa de uso em aproximadamente 40 anos. O tempo de vida útil e as condições em ambientes adversos, como por exemplo, a frota marinha posicionada em regiões litorâneas ou em alto mar (porta-aviões) são fatores que criam uma necessidade maior de manutenção (STASZEWSKI et al., 2004).

O alumínio é um material amplamente utilizado na indústria aeronáutica para várias aplicações como fuselagem, revestimentos, estabilizadores horizontais e asas entre outros. Este material é utilizado devido a sua alta performance mecânica e também a sua baixa densidade (GUILLAUMIN; MONKOWSKI, 1999). Porém, este material pode ser afetado por diversas formas de danos como trincas, pequenos furos e delaminação, entre outros.

A indústria aeronáutica tradicionalmente tem se empenhado no desenvolvimento de pesquisas buscando novas tecnologias a fim de aumentar o desempenho das aeronaves, tanto no âmbito econômico quanto no de integridade e segurança. Uma das possibilidades mais interessante é a substituição dos materiais metálicos da estrutura por materiais compósitos (BRANDT, 2004). A figura 1 mostra os materiais utilizados pela AIRBUS na fabricação do modelo A350 XWB.

Figura 1- Porcentagem dos materiais utilizados na construção do AIRBUS A350 XWB.



Fonte: [França \(2014\)](#)

No sentido mais amplo, podemos definir material compósito como um produto onde dois ou mais elementos são combinados em uma estrutura para obter vantagens e melhorias que nenhum dos componentes poderia fornecer isoladamente (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Diversas técnicas são utilizadas para monitorar estruturas, permitindo um diagnóstico para realização de reparos e manutenção. Para obter este diagnóstico é preciso utilizar técnicas de identificação de danos e avarias na estrutura. Existem várias formas, uma delas é pela supervisão humana, utilizando seus sentidos (visão, audição e tato) para identificar irregularidades. Outra opção é a utilização de instrumentos de análise, que possibilitam uma abordagem mais ampla e rigorosa. Estas análises podem ser realizadas através de ensaios destrutivos, que inutilizam o corpo de prova após sua experimentação, ou ensaios não-destrutivos, que são tipos de experimentação que não danifica ou altere as propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais do corpo de prova (FORNARI JUNIOR, 2012).

A habilidade de monitorar a integridade estrutural se tornou uma área de pesquisa muito importante nos últimos anos, do ponto de vista econômico e de segurança. Esta área é comumente denominada de *Structural Health Monitoring*

ou SHM. A escolha da técnica para o monitoramento de uma estrutura depende de vários fatores como: configuração construtiva, ambiente de experimentação e tipo de estrutura, que pode se basear em diversas técnicas não-destrutivas, denominadas NDE (*Nondestructive Evaluation*). Dentre elas estão: inspeção por partículas magnéticas, análise de deformações, técnicas utilizando fibras ópticas, emissões acústicas, vácuo relativo, raios-x, líquidos penetrantes, propagação de ondas (ondas guiadas) e impedância eletromecânica (ADAMS; CAWLEY, 1988; REYNOLDS, 1985).

Ondas guiadas são ondas que propagam em um sólido. As ondas guiadas se propagam através da reflexão de ondas longitudinais e de flexão nos contornos do sólido. Um caso especial de ondas guiadas são as ondas de Lamb, que se propagam entre as superfícies de placas. As ondas de Lamb são basicamente a superposição de todas as ondas longitudinais e de cisalhamento propagando em uma estrutura do tipo placa. O nome deste tipo de onda guiada veio de Horace Lamb, que foi quem primeiro estudou essas ondas em 1917.

Dentre várias vantagens, uma das principais é que o uso de ondas de Lamb proporciona o monitoramento de grandes áreas utilizando um conjunto atuador e sensor. Isto permite a análise de estruturas com uma quantidade pequena de atuadores e sensores, principalmente se a distribuição dos transdutores for bem planejada (ZHONGQUING et al., 2006; LOWE et al., 1998; WILCOX et al., 2001).

O Titanato Zirconato de Chumbo, ou PZT, compõe o dispositivo mais utilizado em propagação de ondas guiadas. O PZT é acoplado na estrutura por meio de uma cola especial e pode atuar tanto como sensor ou atuador, o que ajuda a diminuir o número de transdutores a serem acoplados para o monitoramento da estrutura. O PZT também apresenta um alto desempenho em aplicações onde altas frequências são requeridas, como no caso de ondas guiadas (ou ondas de Lamb) e impedância eletromecânica (MARQUI, 2007).

Na configuração *pitch-catch*, o transdutor sensor, se alocado a uma distância adequada do transdutor atuador, pode permitir o monitoramento de uma

grande área. Nesta área é possível determinar alterações físicas ou avarias através da atenuação e dispersão da onda. Quando o sinal captado apresenta tais características (dispersão e/ou atenuação) é possível utilizar algoritmos que processam esses sinais e identificam as avarias estruturais. Por meio de métodos de processamento é possível analisar os desvios dos sinais e determinar a existência ou não de danos, a localização e a gravidade (FRANÇA, 2014).

O meio por onde a energia mecânica é propagada pode ser líquido, gasoso ou sólido e, em cada estrutura molecular a velocidade de propagação é diferente. No caso dos sólidos, acrescentam-se outras questões como a posição do conjunto sensor atuador e a geometria da estrutura, que pode causar fenômenos como dispersão e atenuação.

Ondas de Lamb se propagam por uma distância relativamente longa (ZHONGQING SU, 2009), mesmo em materiais com alta taxa de atenuação, tais como polímeros compósitos e, desta forma permite uma grande área a ser coberta por um único transdutor PZT. Essa técnica pode ser utilizada para identificar descontinuidades, porosidade, descolagem, corrosão e delaminação, entre outras avarias.

A análise de sinais de ondas guiadas é propensa a falhas devido a contaminações nos sinais que podem ser ocasionadas por várias fontes de interferência, como por exemplo: ruídos, vibração estrutural e variação de temperatura. Todos estes fatores fazem a identificação de danos através de ondas de Lamb um desafio multidisciplinar.

A técnica de localização de danos através de ondas de Lamb se torna atrativa pelas seguintes características (ZHONGQING SU, 2009): capacidade de análise de uma área relativamente grande com poucos transdutores; habilidade de examinar toda a seção transversal da placa devido aos vários modos de propagação; capacidade de classificar os danos usando múltiplos modos de propagação; alta sensibilidade a danos; possibilidade de inspecionar estruturas

complexas; possibilidade de um sistema de identificação de danos online e automatizado; baixo consumo de energia e boa relação custo benefício.

Recentemente o interesse em diagnóstico por imagem tem crescido, principalmente em sistemas SHM baseados em ondas guiadas. Esse diagnóstico tenta descrever o dano usando imagens. O valor de cada pixel da imagem resultante mostra a probabilidade da presença do dano na área (ZHONGQUING et al., 2009; FLYNN et al., 2011), mostrando o dano de acordo com a probabilidade deste existir. A maioria destas técnicas usa o *time-of-flight* (TOF) do sinal scatter, que consiste na subtração do sinal de referência (*baseline*) pelo sinal que esta sendo analisado para localizar a máxima probabilidade de ocorrência do dano através da reflexão de ondas. A localização do dano é feita através de triangulação geométrica (MICHAELS, 2008; KONSTANTINIDIS et al., 2006; MICHAELS; MICHAELS, 2007). Esta técnica é capaz de localizar o dano em qualquer ponto da estrutura. Por fim, o método de diagnóstico por imagem presume que uma baixa relação entre *baseline* e o sinal atual indica uma alta probabilidade da ocorrência do dano na área avaliada.

Xiaoliang et al. (2007) apresentaram um trabalho que foca em um sistema SHM utilizando ondas guiadas ultrassônicas para inspeção em asas de aeronaves feitas de alumínio. A técnica utilizada para localização do defeito foi a RAPID (Algoritmo de reconstrução para inspeção probabilística de defeitos).

Ye Lu et al. (2008) analisaram trinca com comprimentos diferentes em placas de alumínio. A análise foi feita através do método de elementos finitos e também um estudo experimental. Também foi feita uma análise do comprimento de onda de ondas de Lamb e a difração das propriedades de reflexão e transmissão.

Zhongqing et al. (2006) apresentou a aplicação de ondas guiadas para identificação de danos em materiais compósitos. Este estudo promoveu uma revisão sobre o estado da arte (*state-of-art*) de técnicas de identificação de danos baseadas em ondas de Lamb para materiais compósitos.

Higuti et al. (2010) apresentaram um método de identificação de danos em materiais isotrópicos através de um diagnóstico por imagem. Prado *et al* (2013) apresentaram um estudo sobre o efeito de vários modos de propagação de ondas de Lamb na detecção de danos em estruturas do tipo placa. Granja (2015) apresentou um sistema de identificação de danos utilizando dois modos de propagação de ondas (A0 e S0) e sensores piezelétricos em *array* lineares.

Gorgin et al. (2014) apresentaram um método de localização de danos para estruturas isotrópicas a partir de uma função erro baseada no princípio de reflexão da onda da Lamb no dano. Este método foi usado como referência básica no presente trabalho, que teve como contribuição a melhoria da precisão do método para estruturas isotrópicas e a ampliação da análise para estruturas do tipo anisotrópicas.

O Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes da UNESP tem desenvolvido varias técnicas de SHM, principalmente, baseadas na técnica de impedância eletromecânica (FRANCO, 2009; GONSALEZ et al., 2014; BAPTISTA, 2010). O trabalho atual é uma contribuição a esta área de pesquisa, no entanto, utilizando como base ondas guiadas, dando prosseguimento as pesquisas recentes do grupo (FRANÇA, 2014).

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a detecção de danos em materiais compósitos utilizando ondas guiadas. Este monitoramento das condições estruturais é realizado através de índices obtidos dos sinais de ondas ultrassônicas, conhecidas como ondas de Lamb, que são transmitidas e captadas através de transdutores piezelétricos. Neste trabalho, será usado a técnica PDI (*Probability-based Diagnostic Imaging*), que se baseia na probabilidade de um dano estar em certa região da estrutura. Através de um erro relativo o algoritmo gera uma imagem mostrando a região de maior probabilidade da localização do dano.

3 MATERIAIS E CONCEITOS BÁSICOS UTILIZADOS NA METODOLOGIA

3.1. MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL (SHM)

Meios de transporte como veículos terrestres, aéreos e espaciais, bem como grandes estruturas de engenharia como pontes, hidrelétricas, etc estão presentes na nossa vida cotidiana. A presença de algum tipo de avaria (ou dano) pode colocar em risco a segurança destes sistemas. Quando estas avarias não são detectadas e corrigidas, as falhas nestes tipos de estruturas podem levar a um grande prejuízo financeiro e também a perda de vidas. A preocupação com a integridade de estruturas se dá, principalmente, em sistemas de segurança crítica, como em aeronaves, onde a presença de danos na estrutura pode levar a perda irreparáveis e acidentes catastróficos. O envelhecimento das aeronaves ou submissão à cargas de fadiga e exposição a ambientes corrosivos comprometem a integridade estrutural ocasionando danos e subsequentemente a falha (ZHONGQING SU; LIN YE, 2009).

Dano em um sistema é definido por uma alteração na propriedade do material e/ou geometria do sistema, intencional ou não, incluindo mudanças nas condições de contorno e sistema de conectividade, afetando negativamente o desempenho atual ou futuro (FARRAR et al., 2005).

Monitoramento da integridade de estruturas (do inglês *Structural Health Monitoring*) é um processo de detecção de danos utilizado por várias indústrias como aeroespacial, civil e mecânica. SHM envolve a observação de um sistema usando amostras periódicas de tempo medidas por uma rede de sensores, a extração de características causadas por danos nestas medidas e a análise estatística destas características para determinar o estado atual do sistema. Um sistema SHM tenta fornecer um prognóstico do sistema quando existe dano na estrutura. Prognóstico nada mais é que a estimativa da vida útil restante do sistema ou equipamento com dano. Esta estimativa é baseada em vários fatores como: resultados de modelos preditivos, condições experimentais e operacionais,

entre outros. Um comportamento indesejado de um equipamento ou sistema inviabiliza sua utilização e ameaça a integridade e confiabilidade de sua operação (FARRAR et al., 2005).

Técnicas SHM são uma alternativa potencial pela qual as condições de uma estrutura é monitorada permanentemente por meio de rede de sensores embutidos ou fixados na estrutura. Ao monitorar a condição ou a mudança nas condições da estrutura, a detecção de danos em qualquer local da estrutura torna-se possível (CROXFORD et al., 2007).

O desenvolvimento de técnicas SHM vem crescendo tanto em quantidade de aplicações quanto em tecnologia dos dispositivos, obtendo assim grandes avanços nos últimos anos com melhoramento de sensores/atuadores e novos métodos de detecção. Uma preocupação da comunidade que aplica as técnicas de SHM, sobre o futuro do método, é que estes são atualmente largamente comercializados sem uma normalização específica (KESSLER, 2005). Esta preocupação é pertinente pois se trata de técnicas que apontam a condição ou não de uma estrutura ser utilizada. Um diagnóstico baseado em informações equivocadas oriundas de uma análise sem uma metodologia clara pode proporcionar um prognóstico errado, podendo colocar vidas em risco. A normalização tem um papel fundamental para que haja uma padronização entre informações concedidas entre os fornecedores e usuários destes sistemas.

Os diagnósticos realizados por técnicas SHM são resultados da análise dos dados obtidos a partir de ensaios da estrutura. Ensaio é uma experimentação destinada a verificar se o material, estrutura ou equipamento tem as propriedades necessárias para cumprir um propósito. A finalidade do ensaio é obter informações da estrutura que sejam importantes para um determinado fim, como por exemplo, um ensaio pode ajudar a controlar a qualidade dos materiais recebidos dos fornecedores e checar o estado de um produto final (GARCIA et al., 2000). Outra finalidade está na inovação: ensaios podem gerar informações sobre os materiais para o desenvolvimento de novos produtos e novas tecnologias. De uma forma

ampla, os ensaios são classificados em dois grandes grupos: Ensaaios Destrutivos e Não-Destrutivos.

Métodos SHM baseados em sinais de vibrações são amplamente utilizados e implicam que, na hipótese de dano, as propriedades físicas e geométricas do sistema mudem. Exemplos são: redução de rigidez causada por trincas, corrosão e mudança das propriedades geométricas. Essas alterações podem comprometer o desempenho da estrutura e resultar em mudanças nas respostas dinâmicas do sistema (MARQUI, 2007).

Ondas guiadas acústicas são o um tipo de mecanismo de detecção que combina sensibilidade razoável ao dano com uma área de monitoramento significativa (CROXFORD et al., 2007). Ondas guiadas propagando sobre placas, em algumas circunstâncias, podem propagar por alguns metros. Worlton (1961) foi o primeiro a propor que ondas guiadas poderiam ser usadas para testes não-destrutivos em estruturas do tipo placa.

Em sistemas SHM baseados em ondas guiadas um conjunto de sensores está ligado à estrutura e são usados para gerar um impulso de energia através de ondas guiadas. O mesmo conjunto de sensores é utilizado para registrar os sinais refletidos e gerados por outros sensores no domínio do tempo. Os sinais registrados são então relacionados com a posição onde existe descontinuidades (por exemplo: delaminação) na estrutura. Qualquer alteração do sinal que não é atribuído a uma característica da estrutura é atribuído como dano. O problema desta técnica é que a interpretação do sinal fica limitada a estruturas geometricamente e mecanicamente simples. A medida que a complexidade da estrutura aumenta, os seus sinais obtidos podem obscurecer os sinais refletidos em danos.

Entretanto, em sistemas com sensores incorporados ou colados é possível realizar medidas mais precisas na estrutura usando um sinal de referencia (*baseline*), que é subtraído do sinal atual (KAGAWA et al., 1998; LU; MICHAELS, 2005; KONSTANTINIDIS et al., 2006). Isto permite que a técnica que utiliza ondas

guiadas seja estendida para estruturas mais complexas, como aquelas que podem ser encontradas na indústria aeroespacial. O sucesso da utilização de ondas guiadas em SHM é dependente da habilidade de subtração do sinal atual pelo sinal de referência, o que previne o diagnóstico errôneo (CROXFORD et al., 2007).

3.2. MATERIAIS COMPÓSITOS

O crescimento dos setores aeronáutico, aeroespacial, petroquímica, naval e automobilística impulsionaram a descoberta e criação de materiais que atendem a expectativa de eficiência e segurança destas indústrias. Os materiais são projetados para combinar ao máximo características necessárias como resistência a corrosão, resistência mecânica e densidade específica. A figura 1 (página 12) mostra os materiais que compõem a aeronave AIRBUS A350 XWB e também o projeto estrutural. O uso de materiais compósitos na construção desta aeronave justifica-se pela necessidade de diminuir o consumo de combustível, diminuindo a emissão de gases de combustão e economia para a empresa aérea. Os materiais compósitos são conhecidos por atender as expectativas de bom desempenho no fator resistência versus peso (HOUSTON, 2013).

Materiais compósitos correspondem a uma ampla classe de materiais, compreendendo desde polímeros reforçados com fibras, materiais híbridos, concretos estruturais, metal/compósito e outros compósitos que incorporam matriz metálica ou cerâmica (SHACKELFOR, 2008).

Uma característica básica dos materiais compósitos é a combinação de dois ou mais materiais distintos. Combinados, estes materiais apresentam um excelente desempenho considerando propriedades mecânicas, físicas e químicas. Se comparados com ligas, aços e outros metais são geralmente mais leves. Uma vantagem deste tipo de material é que a combinação de materiais pode ser feita a partir de propriedades adequadas à necessidade deste material em um sistema ou

estrutura. Outra vantagem é o largo espectro de propriedades que estes materiais podem ter, já que existem vários materiais que podem ser combinados na confecção de um material compósito.

Ao combinar dois ou mais materiais na composição de um material compósito, o compósito apresenta característica que nenhum dos seus constituintes apresentariam isoladamente (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Sem uma matriz capaz de proteger e estabelecer geometricamente reforços individuais constituídos de filamentos extremamente rígidos e resistentes, um material isoladamente não poderia oferecer boas características mecânicas como a de um compósito.

Os materiais metálicos (geralmente isotrópicos) apresentam propriedades bem definidas a partir de processos já consolidados tecnologicamente ao longo de muito tempo, tornando suas reações previsíveis a partir de modelos matemáticos já existentes. Os materiais compósitos são mais complexos e são influenciados por diversos fatores, o que também aumenta a complexidade da modelagem matemática.

Em uma análise comparativa as fibras de vidro possuem módulo elástico (E) em torno de 72 GPa, valor comparável ao do alumínio ($E=70$ Gpa). A fibra de aramida possui um E próximo de 130 Gpa e as fibras de carbono de alta resistência apresentam E maiores que 230 Gpa, que é um valor superior ao de alguns aços. Uma grande vantagem dos compósitos em relação aos metálicos é o fator peso por módulo de elasticidade, que é muito menor no compósito (LEVY NETO E PARDINI, 2006), principalmente os que possuem fibras de carbono na sua composição.

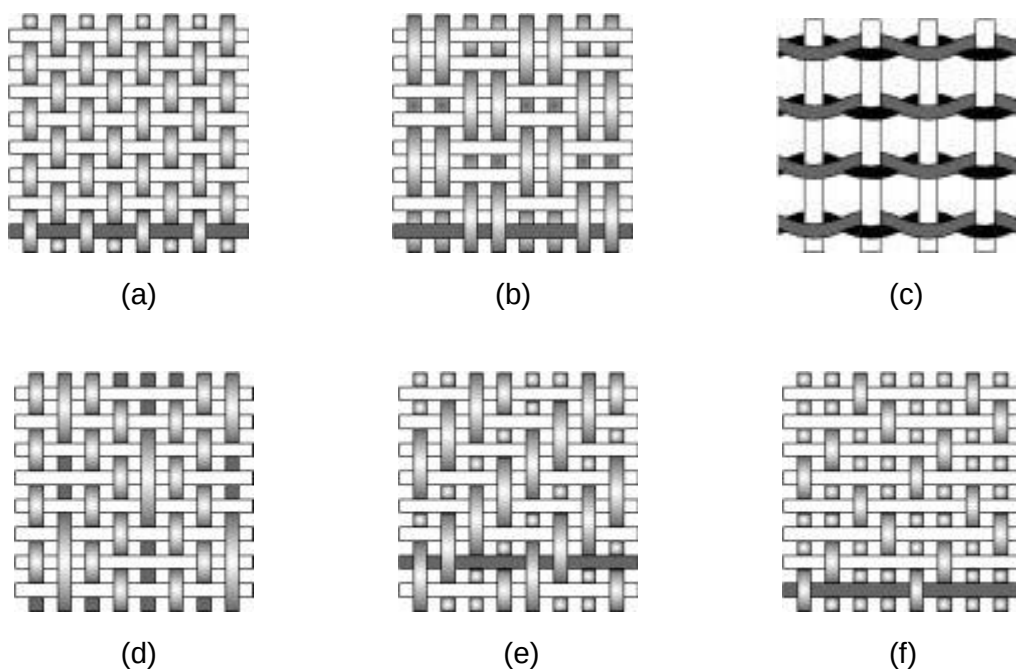
3.2.1. Tipos de reforços

Existem várias possibilidades da confecção de materiais compósitos reforçados com fibras. Entre as possibilidades de trançados existem basicamente

três padrões que são utilizados para construir configurações mais complexas . São eles: *plain weave*, *harness satin weave* e *twill weave*.

A figura 2 mostra os tipos mais comuns dos tipos de malhas utilizadas na confecção de compósitos. O tipo *plain weave* (figura 2^a) é formado pelo entrelaçamento uniforme das fibras do compósito, onde as fibras se entrelaçam por cima e por baixo das fibras que se encontram ortogonalmente. O *Basket* (figura 2b) é uma variação do *plain weave* onde as fibras são entrelaçadas duas a duas, por cima e por baixo das fibras ortogonais. O formato *Leno* (figura 2c) também é uma variação do *plain weave*, e cada conjunto de fibras que entrelaça acima e abaixo da fibra ortogonal é ligeiramente separada do outro conjunto. *Mock Leno* (figura 2d – variação do *plain weave*) possui o trançado variado entre duas ou três fibras ortogonais. No tipo *Twill* (figura 2e) o trançado é feito a cada duas fibras ortogonais, porém a fibra paralela abaixo não segue o mesmo perfil, trançando a fibra ortogonal uma fibra antes. Por último, o tipo *Satin* o entrelaçamento acontece a cada três ou mais fibras ortogonais.

Figura 2 – Ilustração dos tipos de entrelaçamento de fibras de compósitos.

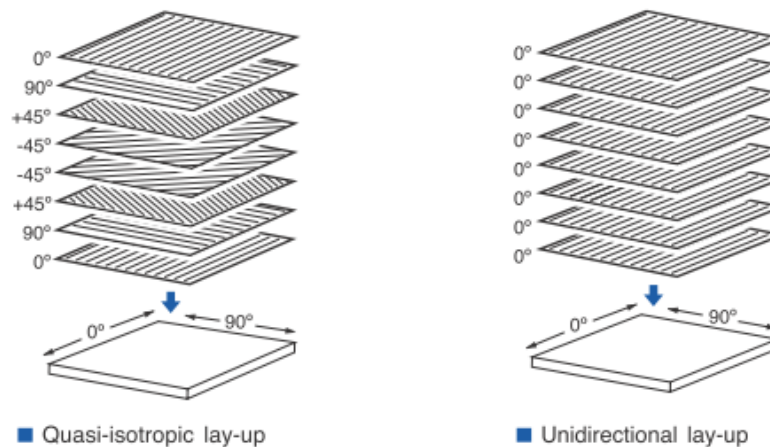


Fonte: França (2014)

3.2.2. Orientação

Para atender a exigências específicas de projeto, as camadas de fibras poderão ser empilhadas em ângulos diferentes, como mostrado na figura 3.

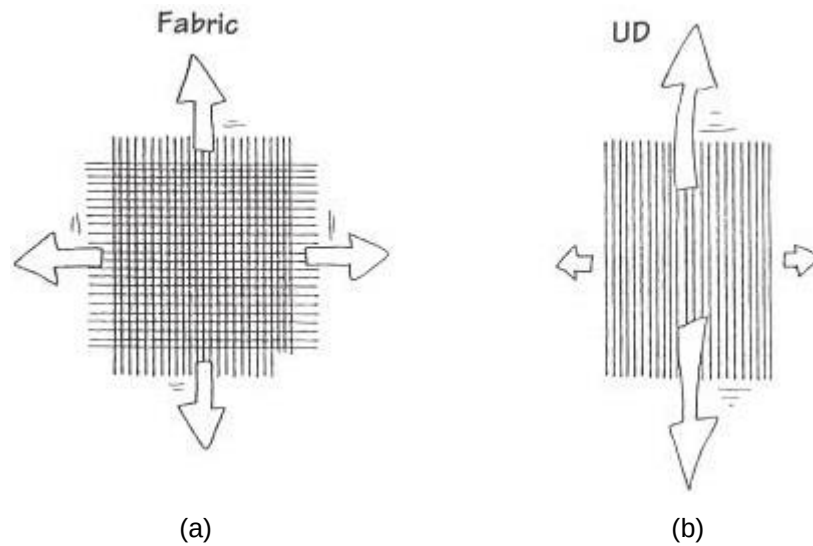
Figura 3 – Exemplos de orientação no empilhamento de camadas.



Fonte: Hexcel (2013).

As fibras em um material compósito reforçado com fibras são fortes e duras e geralmente suportam a maioria das cargas aplicadas. Já a matriz contribui para a temperatura de serviço, tenacidade e resistência ao meio ambiente do compósito. Os compósitos com fibras unidirecionais (UD) têm propriedades mecânicas projetadas para atender solicitações predominantes em uma direção (anisotrópicos), como mostrado na figura 4. Os materiais isotrópicos (como a maioria dos metais) possuem propriedades iguais em todas as direções. Componentes fabricados a partir de materiais compósitos reforçados com fibras podem ser projetados de modo que a orientação das fibras produza propriedades mecânicas ideais, porém eles apenas se aproximam da verdadeira natureza isotrópica (HEXCEL, 2013), sendo praticamente todos os compósitos reforçados com fibras anisotrópicos.

Figura 4 – Exemplos de material quase-isotrópico (a) e material anisotrópico (b).

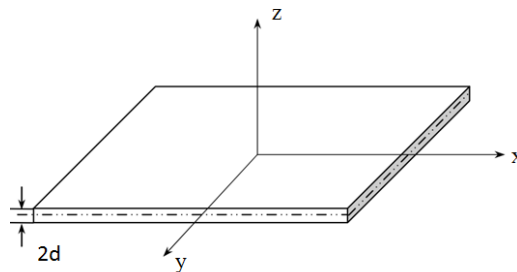


Fonte: Hexcel (2013).

3.3. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ONDAS DE LAMB

O primeiro artigo sobre ondas guiadas aplicadas em placas finas foi publicado em 1917 pelo matemático Horance Lamb, o que deu origem ao nome deste tipo de onda guiada. Em seu trabalho, Lamb mostrou que se a espessura da placa for da ordem do comprimento de onda, então esta onda se propaga entre as superfícies da placa de dois modos: simétrico (S_i) e antissimétrico (A_i). Para fim de ilustração, um sistema de coordenadas é atribuído a uma placa de espessura $2d$, onde x representa o eixo de propagação da onda e z a direção normal a superfície da placa, como mostrado na figura 5.

Figura 5 – Sistema de coordenada em uma placa fina de espessura $2d$.



Fonte: Zhongqing Su (2009). (Adaptado pelo autor)

As figuras 6^a e 6b mostram o movimento das superfícies inferior e superior quando os modos simétrico e assimétrico se propagam pela placa.

Figura 6 – Ilustração do comportamento das superfícies quando o modo de propagação simétrico (a) e assimétrico (b) se propagam na placa



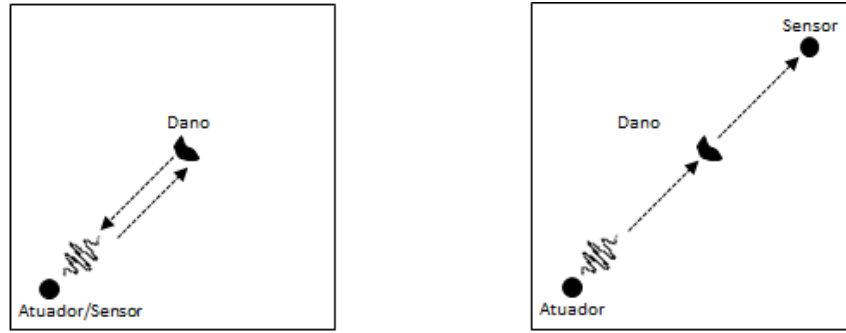
Fonte: Zhongqing Su (2009).

A propagação do modo antissimétrico ocasiona o deslocamento das partículas da placa na direção perpendicular da placa, o que caracteriza um tipo de onda de cisalhamento. Já a propagação do modo simétrico ocasiona o deslocamento das partículas na direção radial da placa, o que caracteriza um tipo de onda longitudinal (GRAFF, 1975).

3.3.1. Tipos de transmissão

Existem duas formas básicas de configuração dos transdutores PZT para localização de danos, sendo elas: *pitch-catch*, representada na figura 7b, e *pulse-echo*, representada na figura 7^a. Na configuração *pitch-catch* uma pequena vibração é emitida pelo atuador e se propaga através da placa até o sensor, que capta a vibração. Já no formato *pulse-echo* a vibração é emitida pelo transdutor PZT e viaja através da placa. Pelo fenômeno de reflexão, esta vibração retorna para o transdutor e é captada pelo mesmo. Neste último caso, o sensor e o atuador podem ser o mesmo elemento, como mostrado na figura 7^a (ZHONGQING SU, 2009).

Figura 7 – Configurações da rede de sensores: *pulse-echo* (a) e *pitch-catch* (b).



(50) (b)

Fonte: Zhongqing Su (2009). Adaptado pelo autor

Após a captação da vibração é possível identificar parâmetros provenientes de ondas transmitidas e refletidas oriundas da interação entre a propagação e possíveis danos na estrutura, podendo ser identificado a presença ou não de dano, bem como a sua localização. O *time-of-flight* (TOF), que é o tempo de propagação da onda na estrutura, pode ser usado para determinar as distâncias entre os sensores e as descontinuidades da estrutura.

3.3.2. Equações constitutivas

Para uma placa fina, isotrópica e homogênea, as equações de onda que descrevem a propagação de ondas longitudinais e de ondas de cisalhamento são dadas por (ZHONGQING SU, 2009):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{v_L^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (2)$$

onde φ e ψ representam funções potenciais e v_L e v_T representam as velocidades de propagação longitudinal e transversal da onda no material, respectivamente, x representa a coordenada da direção de propagação da onda, z representa a coordenada da direção normal a superfície da placa. As equações das velocidades são dadas por:

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}} \quad (3)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (4)$$

onde E é o módulo de elasticidade, μ é o módulo de cisalhamento, ν é o coeficiente de poisson e ρ é a densidade específica do material da placa.

A solução geral das equações 1 e 2 são:

$$\varphi = [A_1 \sin(pz) + A_2 \cos(pz)]e^{-i(kx-\omega)} \quad (5)$$

$$\psi = [B_1 \sin(qz) + B_2 \cos(qz)]e^{-i(kx-\omega)} \quad (6)$$

onde A_1, A_2, B_1 e B_2 representam constantes determinadas através da condição de contorno. O número de onda é representado por k , que junto com q e p são parâmetros obtidos a partir das equações:

$$p^2 = \frac{\omega^2}{v_L^2} - k^2 \quad (7)$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{v_T^2} - k^2 \quad (8)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (9)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (10)$$

Onde ω representa a frequência angular em rad/s, f a frequência em Hz e λ o comprimento de onda.

As condições de contorno para uma placa com superfícies livres de tração são obtidas através das equações 11 e 12, que respectivamente representam os modos de propagação antissimétrico e simétrico que compõem as ondas de

Lamb. Essas equações também são conhecidas como equações de Rayleigh-Lamb (CHEEKE, 2012).

$$\frac{\tan(qd)}{\tan(pd)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4qpk^2} \quad (11)$$

$$\frac{\tan(qd)}{\tan(pd)} = -\frac{4qpk^2}{(k^2 - q^2)^2} \quad (12)$$

As equações 11 e 12 podem ser satisfeitas por um número infinito de raízes reais correspondentes aos números de onda para uma dada frequência, onde cada solução corresponde à ordem i dos modos de propagação antissimétrico (A_i) e simétrico (S_i), normalmente o índice i é iniciado de zero, tendendo ao infinito (ZHONGQING SU, 2009).

3.3.3. Atenuação

Atenuação é um fenômeno que ocorre durante a propagação de ondas guiadas. Este fenômeno consiste na redução gradual de energia mecânica durante a propagação da onda na estrutura e pode ocorrer devido a existência de danos ou falta de homogeneidade como reforços ou elementos de fixação. A amplitude da onda de Lamb em uma placa decai a uma taxa proporcional à raiz quadrada inversa da distância de propagação. Assim, quando se mede a amplitude de onda em dois pontos ao longo do caminho de propagação, tem-se (ZHONGQING SU, 2009):

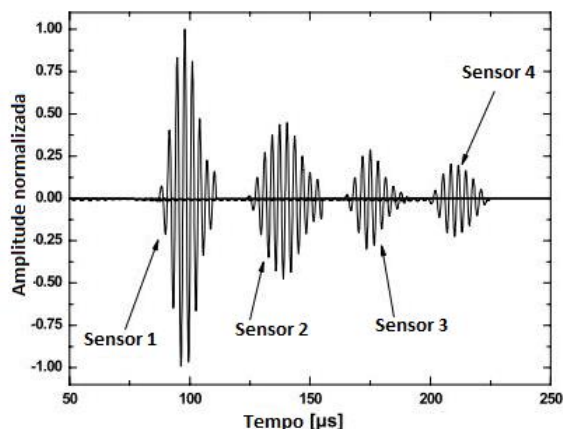
$$\frac{A(d_1)}{A(d_2)} = \frac{\sqrt{d_2}}{\sqrt{d_1}} \quad (13)$$

onde $A(d_1)$ e $A(d_2)$ são as amplitudes da onda de Lamb nas distâncias d_1 e d_2 do atuador, respectivamente.

Para ilustrar a atenuação de uma onda de Lamb, Zhongqing e Ye (2009) colaram cinco transdutores PZT a uma distância de 200mm cada, em linha reta sobre uma placa de alumínio de 1,6mm de espessura. Sendo o sensor 1 o mais

próximo do atuador e os outros alinhados em fila. Os resultados do experimento são expostos na figura 8, revelando que o modo de propagação S_0 a uma frequência de 300kHz atenua a uma taxa de 10,5 dB/m, sem alterar a frequência da onda original por 1 metro.

Figura 8 – Resultado experimental obtido por Zhongqing e Ye (2009) demonstrando claramente o fenômeno de atenuação.



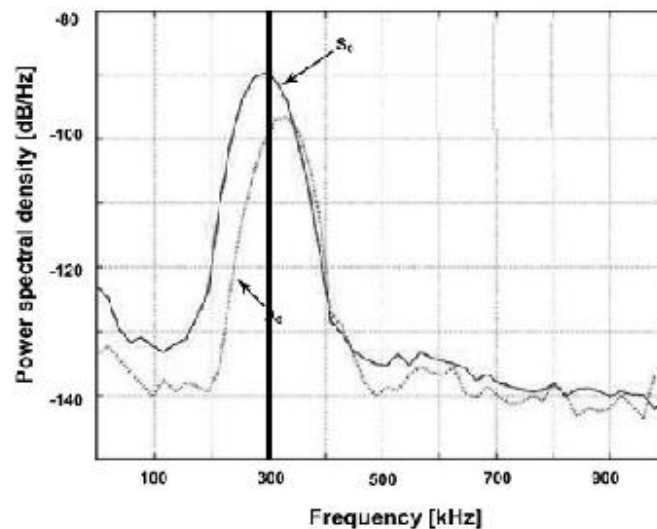
Fonte: Zhongqing Su (2009).

3.3.4. Dispersão

As ondas de Lamb são dispersivas, isto é, a velocidade de fase da propagação da onda sofre uma mudança em função da frequência e, esta velocidade depende do produto fd , ou seja, produto entre a frequência e a metade da espessura do corpo (GIURGIUTIU, 2005).

Como exemplo, Zhongqing e Ye (2009) fizeram uma análise espectral (figura 9) de um sinal da onda de Lamb de 300kHz de frequência após a propagação em uma determinada distância. Os picos do modo S_0 e A_0 são respectivamente 293kHz e 332kHz, que diverge da frequência de excitação de 300kHz. Estas mudanças nos picos de frequência de resposta em relação a excitação original é uma manifestação da dispersão da onda.

Figura 9 – Exemplo da análise de dispersão da onda de Lamb com frequência de excitação de 300kHz.

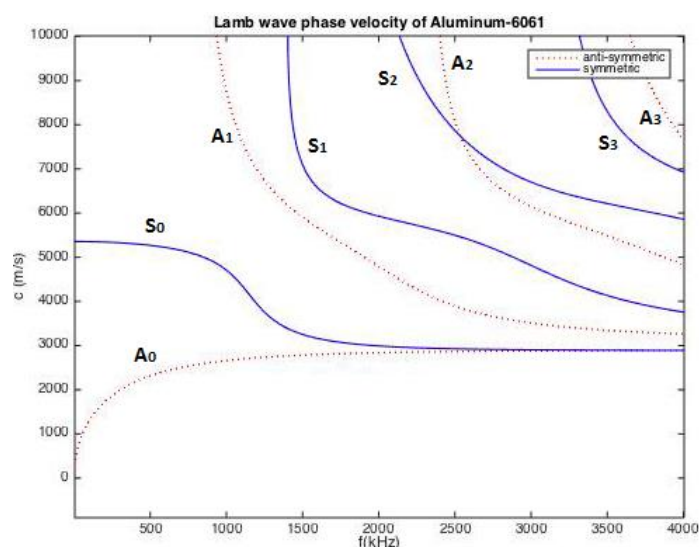


Fonte: Zhongqing Su (2009).

Para uma melhor interpretação do fenômeno de dispersão, um gráfico das soluções das equações de dispersão pode ser utilizado. Este gráfico chama-se gráfico de curvas de dispersão. As curvas de dispersão são utilizadas para descrever e prever a relação entre frequência, velocidade de fase e espessura da placa experimentada. As equações de dispersão podem ser satisfeitas por um número infinito de raízes reais de números de onda para uma dada frequência, exceto para baixas frequências. No gráfico de curvas de dispersão a velocidade de fase ou de grupo de qualquer modo de onda estão em função do produto algébrico da frequência de excitação e da espessura da placa ou apenas da frequência.

A figura 10 mostra como exemplo as curvas de dispersão do alumínio. Neste gráfico são mostrados quatro modos simétricos (S_0 , S_1 , S_2 e S_3) e antissimétricos (A_0 , A_1 , A_2 e A_3) das ondas de Lamb obtidas por RAZZINI (2015). A placa de alumínio possui densidade de 2700kg/m³, módulo de elasticidade de 70Gpa, coeficiente de Poisson de 0,33 e espessura de 2mm. Estes parâmetros precisam ser adicionados ao algoritmo para geração do gráfico.

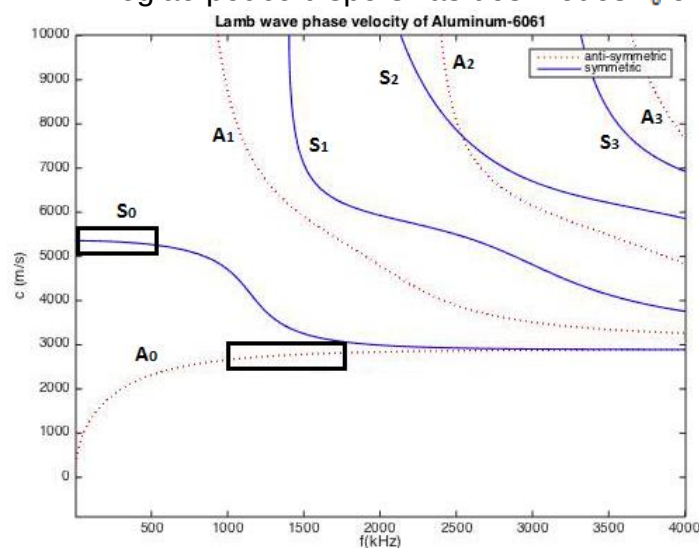
Figura 10 – Gráfico das curvas de dispersão do alumínio.



Fonte: Razzini (2015).

A análise da curva de dispersão é importante para se conhecer a região pouco dispersiva, que no caso do S_0 mostra-se na faixa de baixa frequência (entre 0 e 500 kHz, aproximadamente) e no modo A_0 a curva se mostra pouco dispersiva a partir de uma determinada frequência (1000 kHz aproximadamente). As regiões onde esses modos apresentam uma baixa dispersão são destacadas na figura 11.

Figura 11 – Gráfico das curvas de dispersão do alumínio destacando região pouco dispersivas dos modos S_0 e A_0 .



Fonte: Razzini (2015). Adaptado pelo autor

O estudo de propagação de ondas elásticas em meios multicamadas, tais como polímeros compósitos laminados são de grande interesse e este assunto em particular tem sido grande motivo de pesquisa nos últimos anos, juntamente com as inúmeras aplicações de compósitos em vários setores industriais. A natureza anisotrópica de estruturas multicamadas apresentam muitos fenômenos únicos como a dependência direcional da velocidade da onda, distorção das ondas devido a atenuação e dispersão intensificada pela natureza do material, e muitas outras características que não aparecem na propagação de ondas de Lamb em materiais isotrópicos (ZHONGQING SU, 2009)

4 METODOLOGIA

Neste trabalho, um método PDI (*Probability-based Diagnostic Imaging*) para um sistema SHM será reproduzido baseado em ondas guiadas induzidas em uma estrutura. Este método tem como base o método aplicado por Gorgin *et al*, 2014. Se uma onda incide em um dano, o fenômeno de reflexão (ou espalhamento) será avaliado em todas as direções, sendo o dano considerado uma fonte de dispersão de ondas. Para uma rede de N transdutores PZT, que servem como atuadores e sensores, o sinal de referência (*baseline*) e o sinal a ser analisado são coletados para todos os caminhos entre atuadores e sensores. Através do sinal *baseline* e do sinal atual adquirido é gerado um gráfico *scatter*. Este gráfico consiste na subtração do sinal atual pelo *baseline* e mostra claramente quando existe diferenças (dispersão ou atenuação) entre o *baseline* e o sinal atual captado pelo sensor. Para cada caminho entre sensor/atuador, um gráfico *scatter* é gerado na frequência de excitação.

O método realizado neste trabalho foi reproduzido para materiais do tipo isotrópicos (como o Alumínio), e a partir deste, foi proposto um método para materiais anisotrópicos (como materiais Compósitos). No caso de materiais isotrópicos, o perfil de velocidade pela direção é constante, isto é, a velocidade de propagação da onda guiada é independente da direção de propagação da onda e tem o mesmo valor para todas as direções. Já em materiais compósitos a velocidade de propagação é dependente da direção de propagação, alterando o valor da velocidade de acordo com a direção de propagação.

4.1. MATERIAL ISOTRÓPICO

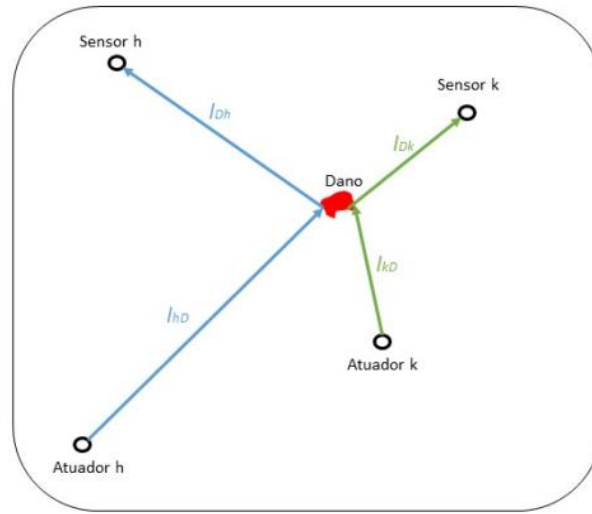
O *time-of-flight* TOF_h corresponde ao tempo em que a onda de Lamb se propaga do atuador h para o dano mais o tempo de propagação da onda do dano

para o sensor h e TOF_k corresponde ao mesmo tempo para o sensor e atuador k , como mostrado na figura 12. Com isto, podemos definir as seguintes relações:

$$l_{hD} + l_{Dh} = c (TOF_h) \quad (14)$$

$$l_{kD} + l_{Dk} = c (TOF_k) \quad (15)$$

Figura 12 – Disposição dos transdutores PZT na placa de alumínio



Fonte: Gorgin (2014).

onde l_{hD} , l_{Dh} , l_{kD} e l_{Dk} são as distâncias lineares entre o dano e os sensores/atuadores (h ou k). A velocidade de grupo da onda é dada por c . A velocidade de propagação de ondas guiadas em materiais isotrópicos é independente da direção de propagação e é constante em todas as direções. A equação 16, para materiais isotrópico, é obtida a partir das equações 14 e 15. (Gorgin, 2014)

$$\frac{l_{hD} + l_{Dh}}{l_{kD} + l_{Dk}} = \frac{(TOF_h)}{(TOF_k)} \quad (16)$$

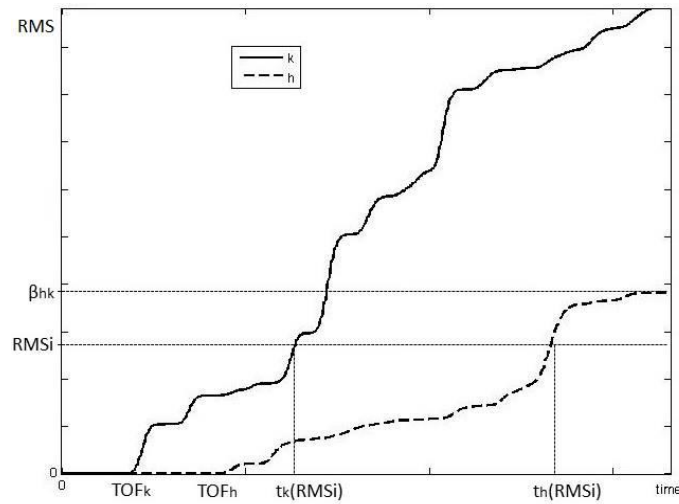
Um recurso alternativo para o cálculo do TOF é utilizado, pois com este não é preciso uma interpretação complexa do sinal para extrai-lo. A energia do sinal

scatterscatter é medida através da simples somatória da magnitude da amplitude do sinal *scatter*.

$$RMS(t_i) = \sum_{t=0}^{t_i} |s(t)| \quad (17)$$

onde $RMS(t_i)$ é a energia do sinal *scatter* até $t=t_i$, $s(t)$ é a amplitude do sinal *scatter* em $t=t_i$. A figura 13 mostra o sinal de energia obtido para dois caminhos diferentes.

Figura 13 – Crescimento da energia no sinal *scatter*



Fonte: Elaborado pelo Autor

Como mostrado na figura 13, a energia dos sinais *scatter* dos caminhos *h* e *k* começam a crescer em TOF_h e TOF_k , respectivamente. Embora o tempo em que cada trajeto atinja um dado valor de energia seja diferente do seu respectivo *time-of-flight*, a razão entre estes tempos é próxima à razão entre os respectivos *time-of-flight* dos trajetos *h* e *k* quando existe a reflexão da onda em um dano na grade analisada, então (GORGIN, 2014)

$$\frac{(TOF_h)}{(TOF_k)} \cong \frac{t_h(RMS_i)}{t_k(RMS_i)} \quad 0 < RMS_i < \beta_{hk} \quad (18)$$

onde $t_h(RMS_i)$ e $t_k(RMS_i)$ são os tempos em que a energia do sinal *scatter* dos caminhos h e k , respectivamente, atingem o valor RMS_i . Esta equação pode ser utilizada pois o crescimento do valor de energia acontecerá após o TOF de cada caminho de propagação. Como o sinal gerado para cada sensor é igual, o valor de energia terá o mesmo perfil de crescimento, porém não será exato devido aos fenômenos de atenuação do sinal. Como mostrado na figura 13, β_{hk} denota um limiar da energia do sinal *scatter* usado na equação 19. Esse limiar é imposto porque para valores maiores que β_{hk} , o tempo $t_h(RMS_i)$ não pode ser definido. Substituindo a equação 16 na equação 18, temos:

$$\frac{l_{hD} + l_{Dh}}{l_{kD} + l_{Dk}} \cong \frac{t_h(RMS_i)}{t_k(RMS_i)} \quad 0 < RMS_i < \beta_{hk} \quad (19)$$

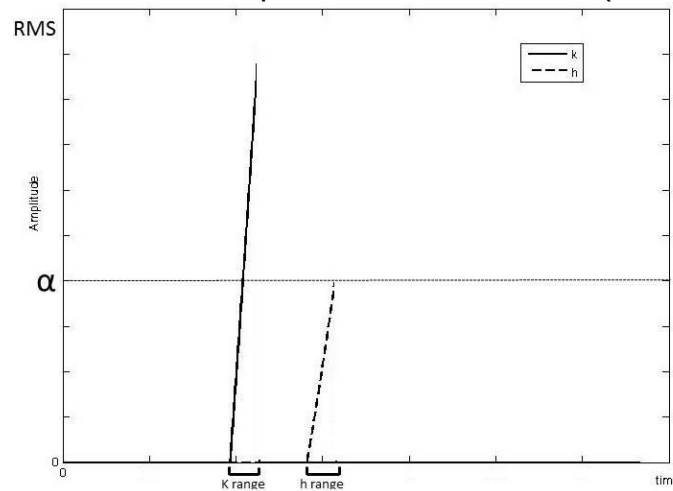
De acordo com a diferença entre a razão dos *time-of-flight* e a razão dos tempos em que os sinais medidos nos sensores atingem um determinado valor de energia do sinal *scatter*, uma função erro para materiais isotrópicos é introduzida para cada grade da malha (Gorgin et al, 2014):

$$\varepsilon_j = (l_{hD} + l_{Dh}) - \left[\frac{t_h(RMS_i)}{t_k(RMS_i)} \times (l_{kD} + l_{Dk}) \right] \quad (20)$$

Uma malha uniforme é criada na região monitorada. Para cada grade uma função erro é calculada. Para aumentar a exatidão do método a energia do sinal *scatter* é avaliada em apenas um determinado intervalo onde existe a influência do dano. Esse intervalo é determinado como o intervalo logo após o *time-of-flight* entre a grade analisada e os sensores/atuadores (TOF_h ou TOF_k). Portanto, para o caminho h , este intervalo começa em TOF_h e tem o exatamente o tamanho do sinal gerado no atuador h . O intervalo avaliado para o caminho de propagação k é calculado da mesma forma. Usando este intervalo, a função erro é calculada apenas onde existe a influência do dano, que diminui consideravelmente os efeitos de reverberação. Para um par de caminhos, a função erro é calculada no último

ponto onde a energia dos dois sinais têm o mesmo valor. A figura 14 mostra o valor da energia onde a função erro é calculada (α). O valor α consiste no último ponto de energia onde as duas funções tem o mesmo valor. A função erro é calculada neste ponto pois acima deste limiar não existe um valor igual de energia para os caminhos analisados, como mostrado na figura 14.

Figura 14 – Energia do sinal *scatter* para um componente da malha da estrutura analisada em um dado intervalo para os caminhos *h* e *k* (de acordo com o *TOF*)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os pontos com os menores valores da função erro mostram a maior probabilidade da existência do dano, pois quando existe a reflexão de um dano no ponto analisado, a equação 18 será satisfeita. Para mostrar exatamente onde o dano está outras funções erro precisam ser calculadas através da aquisição dos sinais para outros sensores e atuadores. Usando várias funções erro nos permite reduzir os efeitos de ruídos e outros não desejáveis, o que ajuda na exatidão do método.

Para uma rede de sensores com R pares de atuadores/sensores (R caminhos) o número de funções erro que podem ser calculadas é definido como:

$$a = \frac{R*(R-1)}{2} \quad (21)$$

A função erro resultante pode ser definida como a soma de todas as funções erro encontradas comparando-se dois caminhos de propagação:

$$\varepsilon_{final} = \sum_{i=1}^a \varepsilon_i \quad (22)$$

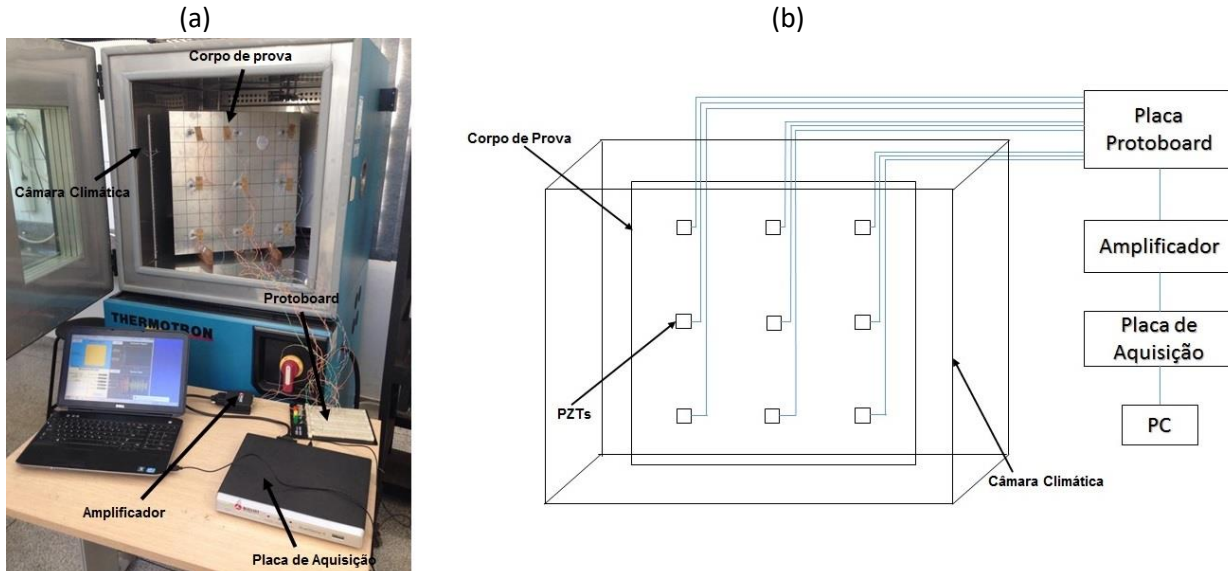
Onde ε_i é a função erro comparando-se dois caminhos de propagação. Ao comparar dois caminhos de propagação, um valor desta função é calculado para cada ponto da malha. A imagem é gerada utilizando o comando *contourf* do matlab para cada função erro. A soma da função erro para todas as comparações possíveis entre os caminhos de propagação consiste na função erro final calculada. A função erro é usada para estimar a probabilidade da presença do dano.

4.1.1. Metodologia experimental e materiais

A figura 15 mostra a montagem utilizada e os equipamentos utilizados nos testes experimentais com o material isotrópico. Os equipamentos utilizados neste experimento foram:

- Corpo de prova: Placa de Alumínio;
- 9 Transdutores PZTs modelo T110-H4e-62 fabricado pela Piezo Systems, Inc.;
- Epóxi aeronáutico Henkel Hysol EA 9320NA para fixação dos transdutores;
- Massa adesiva Hexcel para simulação da delaminação;
- Placa de aquisição Acellent ScanGenie II e Software de aquisição ACCESS 2.1 para aquisição dos sinais;
- Placa Protoboard MSB-400 para entrada dos canais;
- Software de processamento MATLAB[®] versão R2013a como sistema de processamento e
- Câmara climática Thermotron SM-8 como ambiente para os ensaios.

Figura 15 – (a) Foto dos materiais e equipamentos utilizados no experimento e (b) Ilustração dos materiais e equipamentos utilizados no experimento



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.1.1. *Corpo de prova*

O corpo de prova utilizado neste experimento é uma placa de Alumínio com dimensões de 500 x 500 x 2mm. Como conhecido da literatura, o alumínio possui propriedades isotrópicas, isto é, as propriedades do material não são dependentes da direção. Também é conhecido da literatura o módulo de elasticidade do alumínio, que é 69Gpa.

A tabela não deve ser delineada à direita e à esquerda, por traços verticais.

Tabela 1 – Propriedades do Alumínio

Parâmetro	Valor
Módulo de Young E	69Gpa
Coeficiente de Poisson (ν)	0.3
Densidade (ρ)	2710 kg/m ³

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para o sensoriamento da placa foram utilizados 9 transdutores PZTs fabricados pela Piezo Systems, Inc., modelo T110-H4e-62, quadrados com 10mm de lado. Os transdutores foram colados de forma definitiva na estrutura com epóxi

Henkel modelo Hysol EA 9320NA, que é um material destinado para aplicação em estruturas aeronáuticas, tendo em vista a sua tolerância a variação de temperatura e grau de rigidez. A figura 16 mostra em detalhes o transdutor colado no estrutura. Os transdutores foram posicionados em um arranjo simétrico, como mostrado na figura 17.

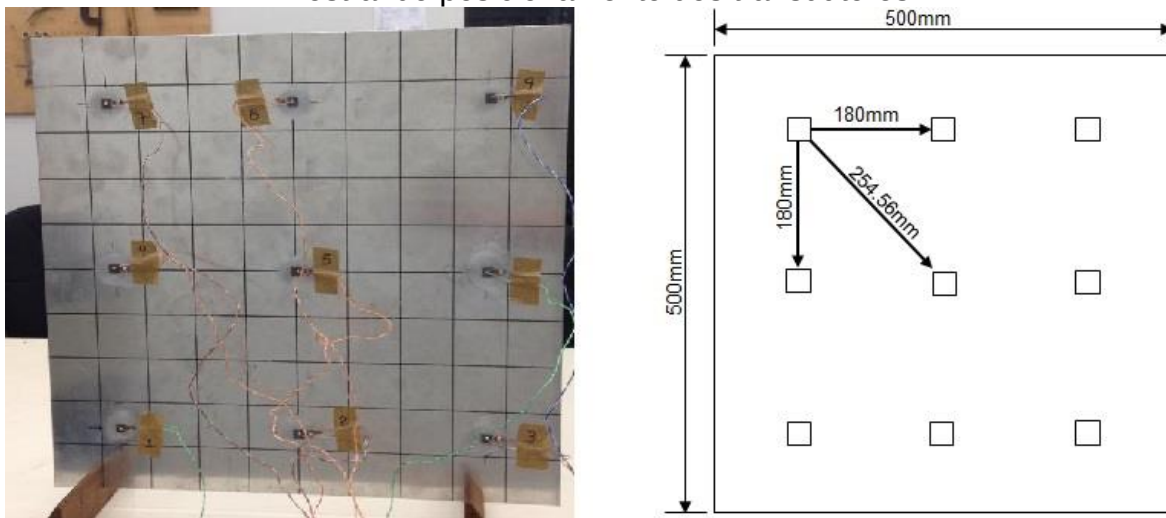
Figura 16 – Transdutor PZT modelo T110-H4e-62 fabricado pela Piezo Systems, Inc. e cortado em quadrado com medida de 10mm de lado.



Fonte: Elaborado pelo Autor

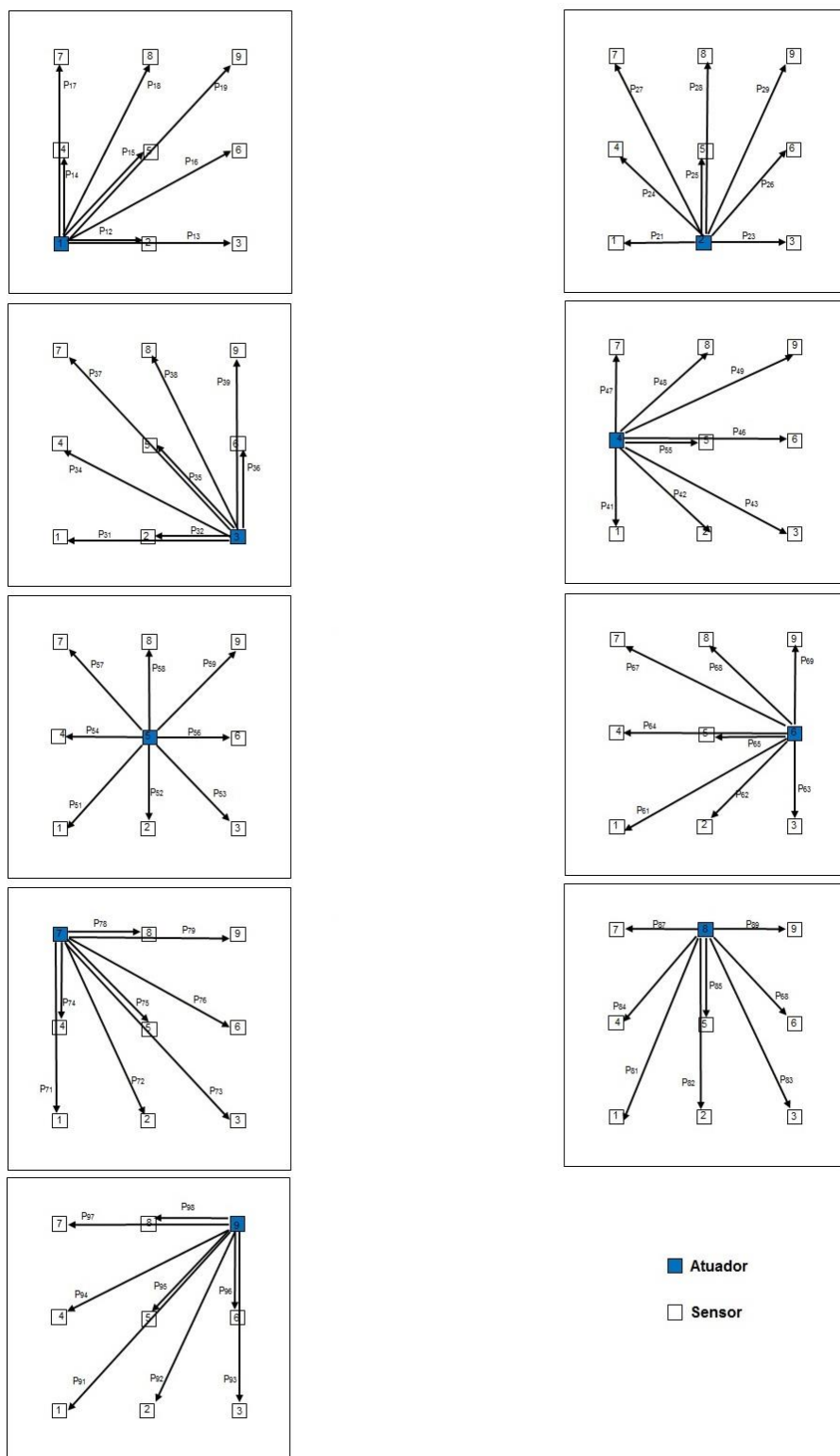
Transdutores PZTs são largamente utilizados para este tipo de aplicação por agir tanto como atuador quanto como sensor. Em um arranjo com 9 transdutores PZTs é possível varrer toda a estrutura fazendo com que 1 PZT seja atuador e os outros 8 sejam sensores. Como existem 9 possibilidades de atuadores que geram 8 caminhos cada, esta rede de sensores fornece 72 caminhos de propagação. Com intuito de didática, cada caminho vai ser designado por P_{ij} , onde o índice i representa o atuador e o índice j representa o sensor, como mostrado na figura 18.

Figura 17 – (a) Foto da placa utilizada no experimento e (b) Ilustração da placa mostrando posicionamento dos transdutores



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 18 – Caminhos entre sensores/atuadores utilizados na localização dos danos.

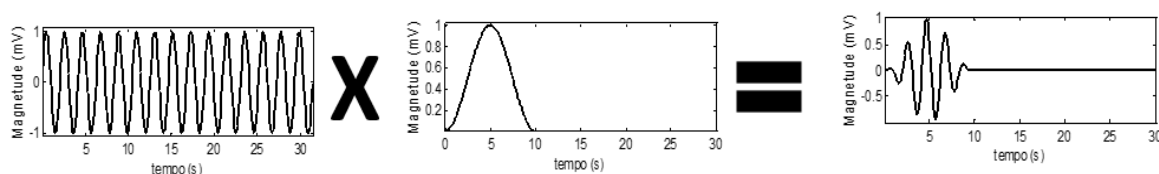


Fonte: Elaborado pelo Autor

O experimento proposto para localizar os danos na estrutura isotrópica faz uso da análise dos sinais gerados da propagação de ondas de Lamb para cada caminho do arranjo. Para a geração e aquisição dos sinais foi utilizada a placa da Accelent modelo ScanGenie-II Battery Edition juntamente com o software ACESS 2.1.

Considerando que o corpo de prova é isotrópico é possível construir o gráfico da figura 20 a partir dos valores de Módulo de Elasticidade (69Gpa), coeficiente de Poisson (0.3) e densidade (2710 kg/m³). Para parâmetros de aquisição foram escolhidos: frequência de amostragem (f_s) de 3MHz e 1000 amostras. O sinal de excitação consiste em um seno de amplitude de 35 milivolts janelado por um filtro *hanning* e cinco ciclos, denominado por *Burst 5*. Este tipo de sinal é obtido por meio de uma multiplicação de dois sinais, conforme mostrado na figura 19.

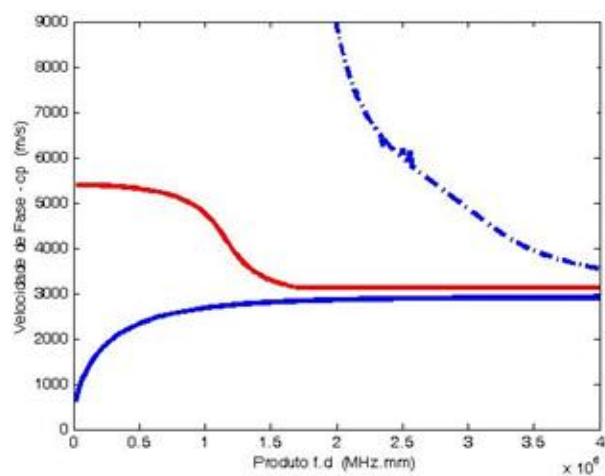
Figura 19 – Exemplo da obtenção do sinal Burst 5



Foram utilizados cinco sinais com diferentes frequências (150, 200, 250, 300 e 350KHz). Na figura 20 é possível notar que para as frequências de excitação escolhidas a velocidade de fase é praticamente constante. É importante analisar a estrutura com frequências que oferecem pouca dispersão pois ao propagar as ondas guiadas podem sofrer fenômenos de atenuação ou dispersão, mudando a sua frequência. Contudo, mesmo com a frequência sendo alterada por estes fenômenos a velocidade de fase terá uma mudança praticamente nula.

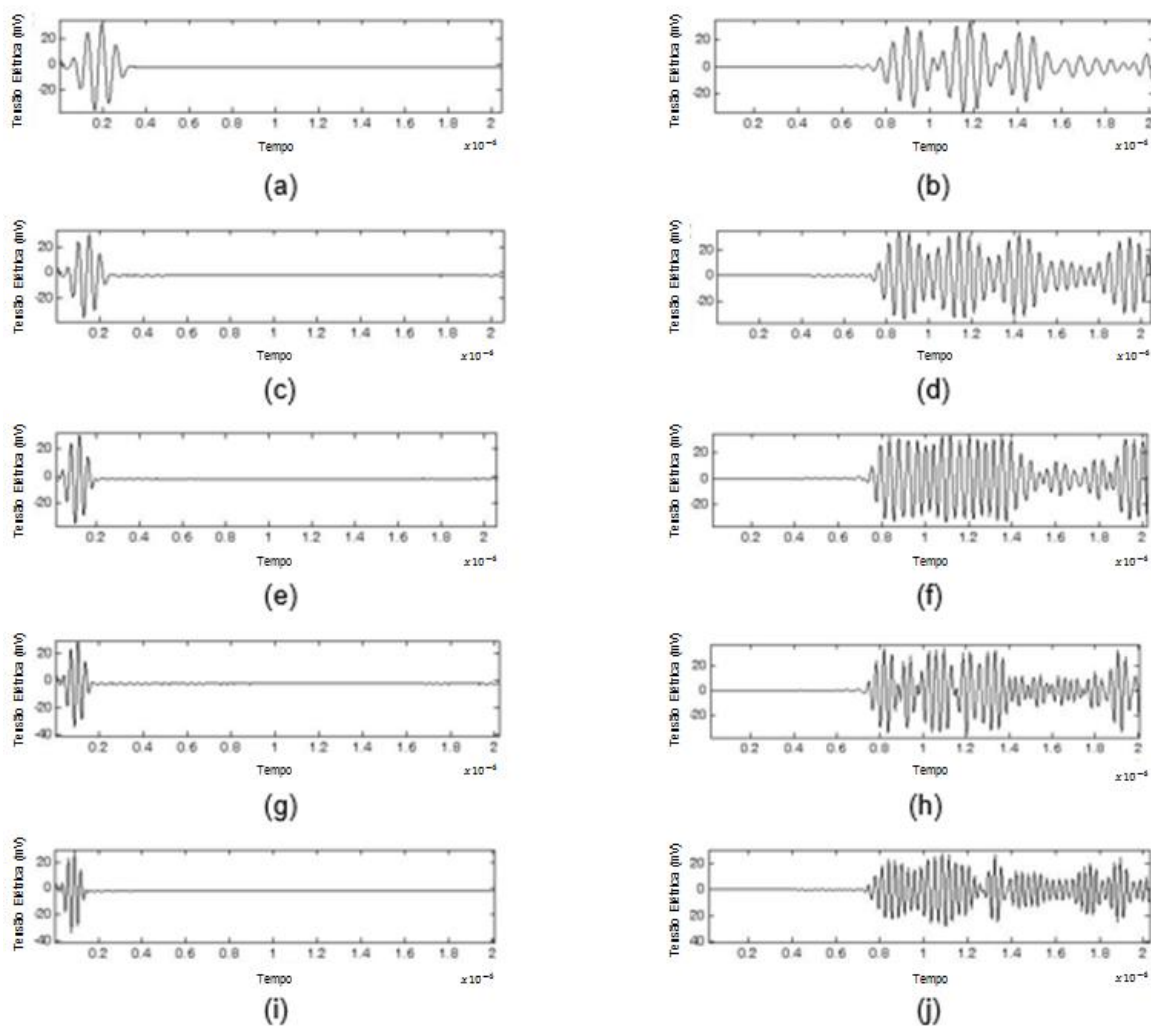
A figura 21 mostra o sinal de excitação do transdutor 1 e o sinal captado pelo transdutor 3 para várias frequências.

Figura 20 – Curva de dispersão do Alumínio (— A_0 , — S_0 e — A_1)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 21 – Sinal emitido pelo transdutor PZT 1 para 150KHz (a), 200KHz (c), 250KHz (e), 300KHz (g) e 350KHz (i), e sinal captado no transdutor PZT 3 para 150KHz (b), 200KHz (d), 250KHz (f), 300KHz (h) e 350KHz (j).



Fonte: Elaborado pelo Autor

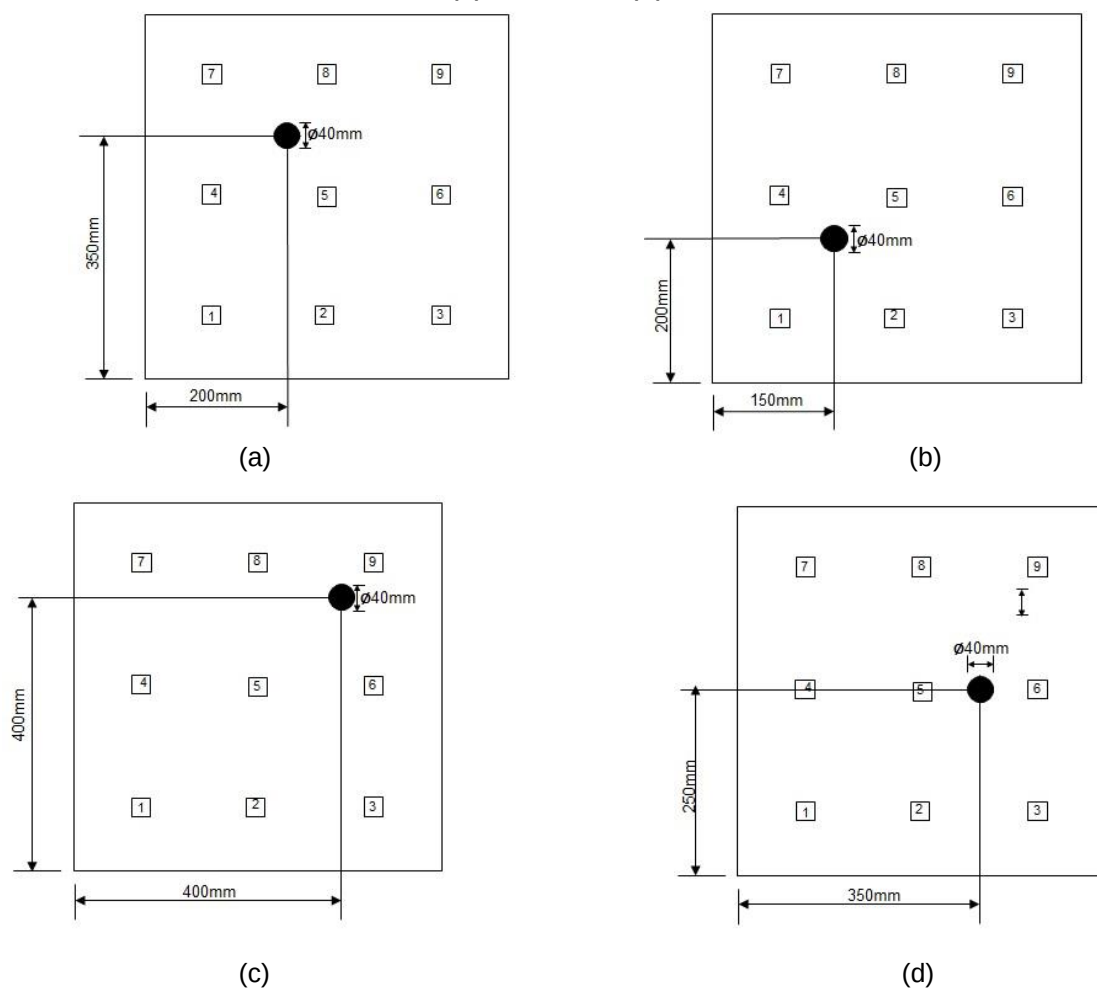
4.1.1.2. Posicionamento dos danos

Para a análise de localização dos danos foram definidos quatro pontos onde seriam colocados os danos em ensaios diferentes. O posicionamento dos danos está apresentado na figura 22. A figura 22^a mostra o posicionamento do dano 1, 22^b do dano 2, 22^c do dano 3 e 22^d do dano 4.

Os danos foram simulados pela adição de massa adesiva de 15g em duas partes de 7.5g para serem coladas nas duas superfícies da placa (superior e inferior). A área de deposição de cada parcela de massa foi um círculo de 40mm

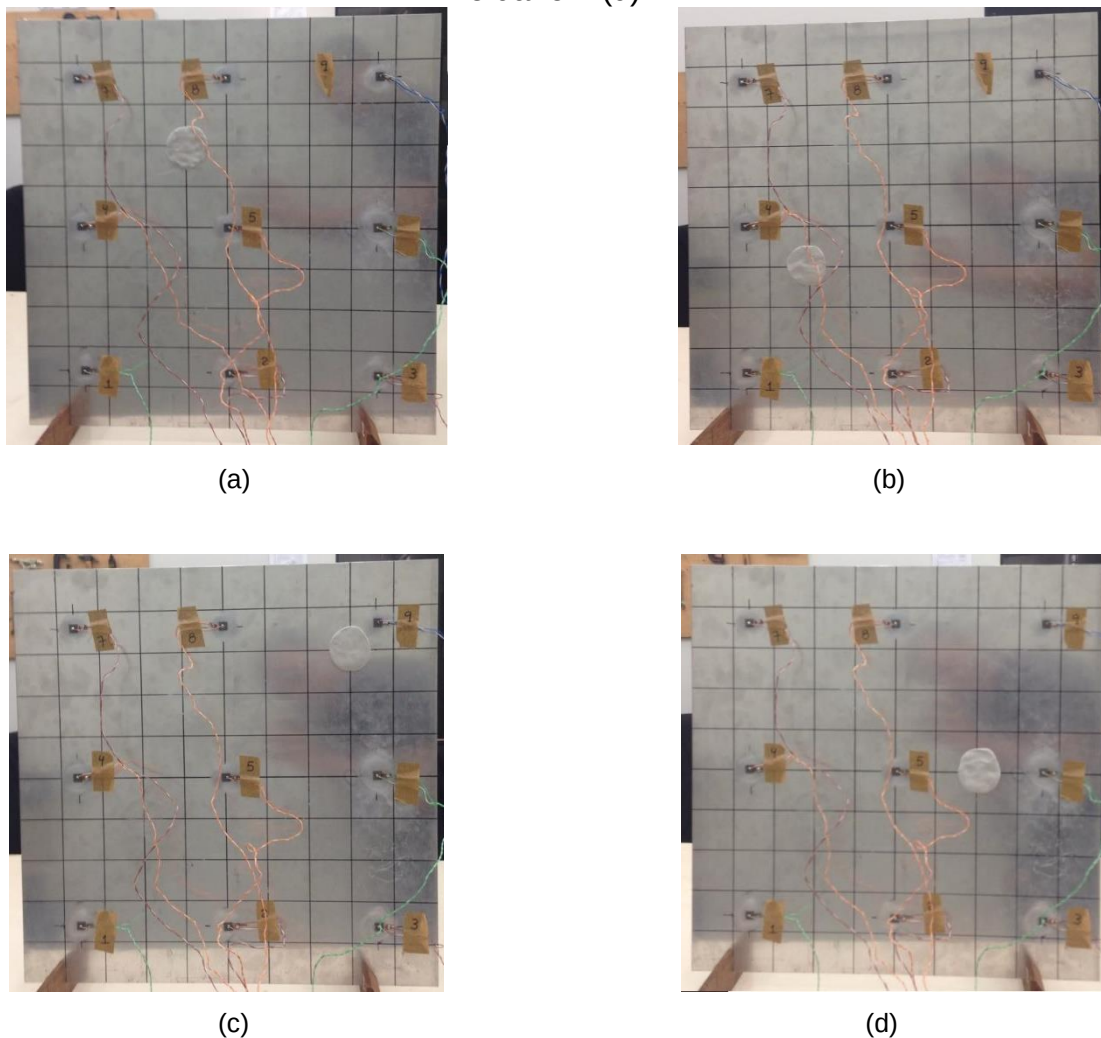
de diâmetro, simulando a presença de delaminação na placa (SOHN,2005). A figura 23 mostra o posicionamento dos danos na placa real, onde a figura 23^a mostra o posicionamento do dano 1, 23b do dano 2, 23c do dano 3 e 23d do dano 4.

Figura 22 – Ilustração do posicionamento do dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d).



Fonte: Elaborado pelo Autor

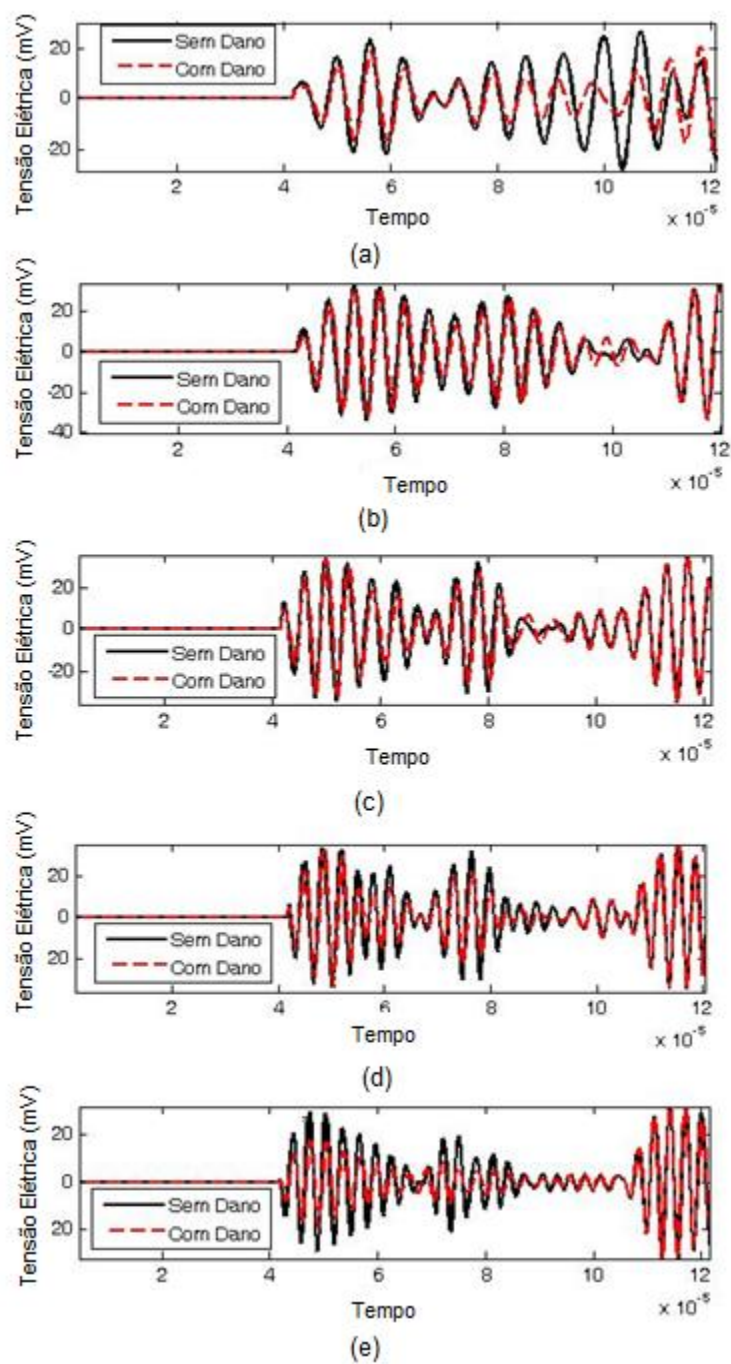
Figura 23 – Fotos do posicionamento do dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d).



Fonte: Elaborado pelo Autor

A localização de danos utilizando a propagação de ondas guiadas (ou no caso de placas, ondas de Lamb) é possível pois a existência de dano na estrutura causa a reflexão de ondas de Lamb, que ficam evidenciadas a partir do gráfico scatter, que consiste na subtração do sinal atual pelo sinal *baseline*. A figura 24 mostra o sinal para o atuador 5 e sensor 6 (caminho P_{56}) para o dano 4, considerando as 5 frequências de excitação.. Este dano está localizado no centro deste caminho, como pode ser visto na figura 23d

Figura 24– Efeito do dano 4 no caminho P₅₆ para 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).



Fonte: Elaborado pelo Autor

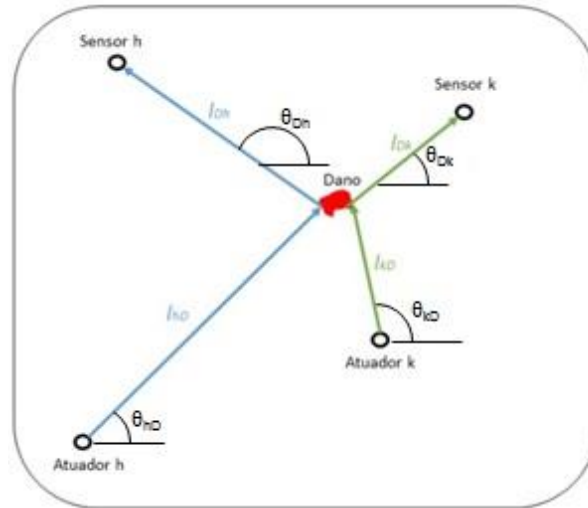
4.2. MATERIAL ANISOTRÓPICO

Os materiais compósitos possuem uma natureza anisotrópica, que significa ter propriedades dependentes da direção, sendo o oposto da natureza isotrópica, que implica em propriedades idênticas em todas as direções. Neste caso, definimos a relação entre as distâncias como:

$$\frac{l_{hD}}{c(\theta_{hD})} + \frac{l_{Dh}}{c(\theta_{Dh})} = TOF_h \quad (23)$$

$$\frac{l_{kD}}{c(\theta_{kD})} + \frac{l_{Dk}}{c(\theta_{Dk})} = TOF_k \quad (24)$$

Figura 25- Disposição dos transdutores PZT no compósito



Fonte: Adaptado de Gorgin (2014).

Os índices mostrados na figura 25 são os mesmos mostrados na figura 12, com exceção dos ângulos θ_{hD} , θ_{Dh} , θ_{kD} e θ_{Dk} que são os ângulos entre o dano e os sensores/atuadores (h ou k). A velocidade de grupo neste tipo de material é dependente da direção de propagação. Nas equações 23 e 24 os valores $c(\theta_{hD})$, $c(\theta_{Dh})$, $c(\theta_{kD})$ e $c(\theta_{Dk})$ representam a velocidade de grupo na direção do atuador h até o dano, do dano até o sensor h , do atuador k até o dano e do dano até o sensor k , respectivamente. Com isto, para materiais anisotrópicos é necessário

avaliar o perfil de velocidade de grupo para todas as direções no material estudado afim de se obter melhores resultados com o método apresentado.

Das equações 23 e 24 obtemos a seguinte equação:

$$\frac{\frac{l_{hD}}{c(\theta_{hD})} + \frac{l_{Dh}}{c(\theta_{Dh})}}{\frac{l_{kD}}{c(\theta_{kD})} + \frac{l_{Dk}}{c(\theta_{Dk})}} = \frac{(TOF_h)}{(TOF_k)} \quad (25)$$

Para materiais anisotrópicos também se tem a necessidade de extrair a energia no sinal pelo mesmo motivo que em materiais isotrópicos, isto é, a dificuldade em extrair o TOF devido ao mecanismo de propagação da onda de Lamb. A energia do sinal também será medida pelo valor RMS pela equação 17, e a figura 13 também pode ser obtida.

Embora o tempo para que cada trajeto atinja o valor definido seja diferente, a razão entre este tempo é próxima a razão dos respectivos *time-of-flight* como avaliado nos materiais isotrópicos. Assim sendo, a equação 18 também é válida para materiais anisotrópicos.

Agora, substituindo a equação 18 na equação 25, temos:

$$\frac{\frac{l_{hD}}{c(\theta_{hD})} + \frac{l_{Dh}}{c(\theta_{Dh})}}{\frac{l_{kD}}{c(\theta_{kD})} + \frac{l_{Dk}}{c(\theta_{Dk})}} \cong \frac{t_h(RMS_i)}{t_k(RMS_i)} \quad 0 < RMS_i < \beta_{hk} \quad (26)$$

onde β_{hk} é o limite imposto para a equação pois para valores maiores que β_{hk} o tempo $t_h(RMS_i)$ não pode ser definido.

Podemos definir a função erro para materiais anisotrópicos com a diferença da razão entre os *time-of-flight* e a razão dos tempos em que a energia dos sinais *scatter* atingem um determinado valor de energia (similar ao realizado na função erro para materiais isotrópicos). Assim sendo, a função erro para materiais anisotrópicos pode ser definida como:

$$\varepsilon_j = \left(\frac{l_{hD}}{c(\theta_{hD})} + \frac{l_{Dh}}{c(\theta_{Dh})} \right) - \left[\frac{t_h(RMS_i)}{t_k(RMS_i)} \times \left(\frac{l_{kD}}{c(\theta_{kD})} + \frac{l_{Dk}}{c(\theta_{Dk})} \right) \right] \quad (27)$$

A equação da função erro para materiais anisotrópicos se assimila com a mesma equação para materiais isotrópicos. A maior diferença é que agora se faz necessário definir o perfil de velocidade para todas as direções na estrutura analisada, já que a velocidade varia em razão da direção de propagação.

O número de funções erro pode ser calculada pela equação 21. Também a função erro resultante pode ser calculada através da equação 22.

Analogamente aos materiais isotrópicos, componentes da malha com menores valores da função erro indicam a região mais provável onde o dano se encontra.

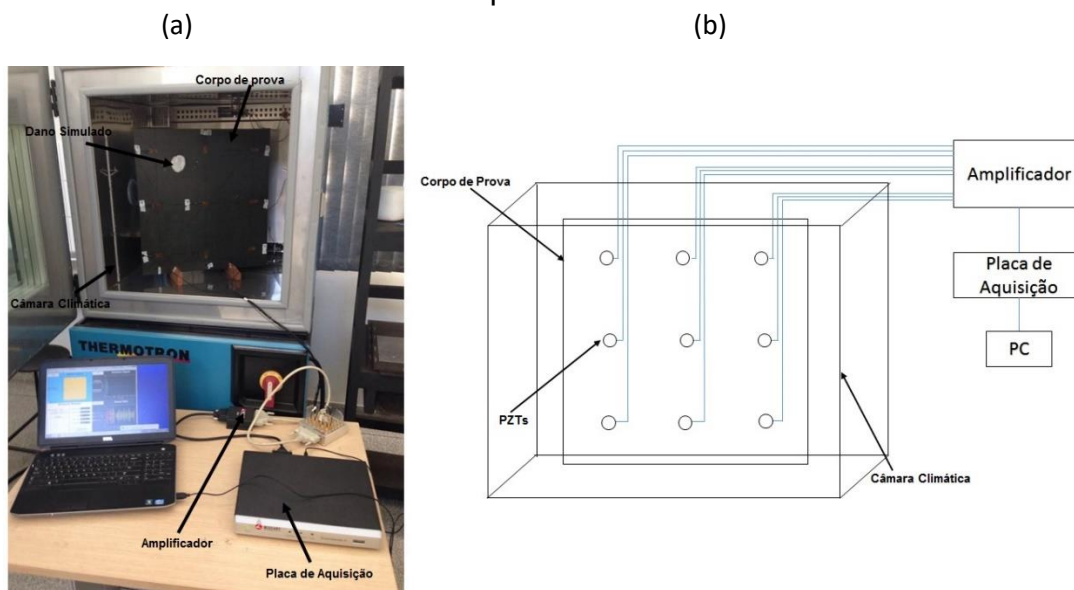
4.2.1. Testes experimentais na placa compósita e materiais

O experimento realizado com o material anisotrópico é semelhante ao realizado com o material isotrópico, mudando apenas alguns equipamentos. Os equipamentos utilizados neste experimento foram:

- Corpo de prova: Placa de Carbono/Epóxi;
- 9 Transdutores PZTs modelo SML-SP1-1/4-0 *singles layers* fabricado pela Accelent;
- Epóxi aeronáutico Henkel Hysol EA 9320NA para fixação dos transdutores;
- Massa adesiva Hexcel para simulação da delaminação;
- Placa de aquisição Acellent ScanGenie II e Software de aquisição ACCESS 2.1 para aquisição dos sinais;
- Software de processamento MATLAB® versão R2013a como sistema de processamento e
- Câmara climática Thermotron SM-8 como ambiente para os ensaios.

A figura 26 mostra o arranjo experimental em foto (a) e em ilustração (b).

Figura 26 – (a) Foto dos materiais e equipamentos utilizados no experimento com a placa compósita e (b) Ilustração dos materiais e equipamentos utilizados no experimento



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.1.1. *Corpo de prova*

O corpo de prova utilizado nesta fase do trabalho é uma placa de carbono/epóxi com dimensões de 500 x 500 x 2 mm. Este laminado é constituído de 10 camadas de uma matriz resinosa com malha *plain weave*. As camadas foram posicionadas na mesma orientação (0°) formando assim o *lay-up* unidirecional.

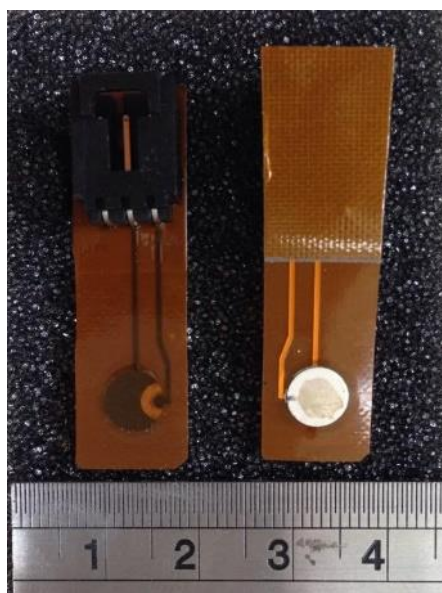
Para o sensoriamento da estrutura foram utilizados 9 transdutores PZTs fabricados pela Accelent modelo SML-SP1-1/4-0 (mostrado na figura 27). As dimensões e propriedades do transdutor estão listadas na tabela 2. Os transdutores foram colados de forma definitiva na estrutura com epóxi Henkel modelo Hysol EA 9320NA (o mesmo utilizado para fixar os transdutores no experimento com material isotrópico). O arranjo dos sensores é mostrado na figura 28.

Tabela 2 – Parâmetros do transdutor PZT modelo SML-SP1-1/4-0 fabricado pela Accelent

Parâmetro	Valor
Diâmetro	6.35mm
Espessura	0.254mm
Constante Dielétrica Relativa (ϵ)	1750 F/m
Coeficiente Piezoelétrico (d_{31})	175×10^{-12} m/V
Tensão Elétrica Máxima	50-70 V _{AC}

Fonte: Elaborado pelo Autor

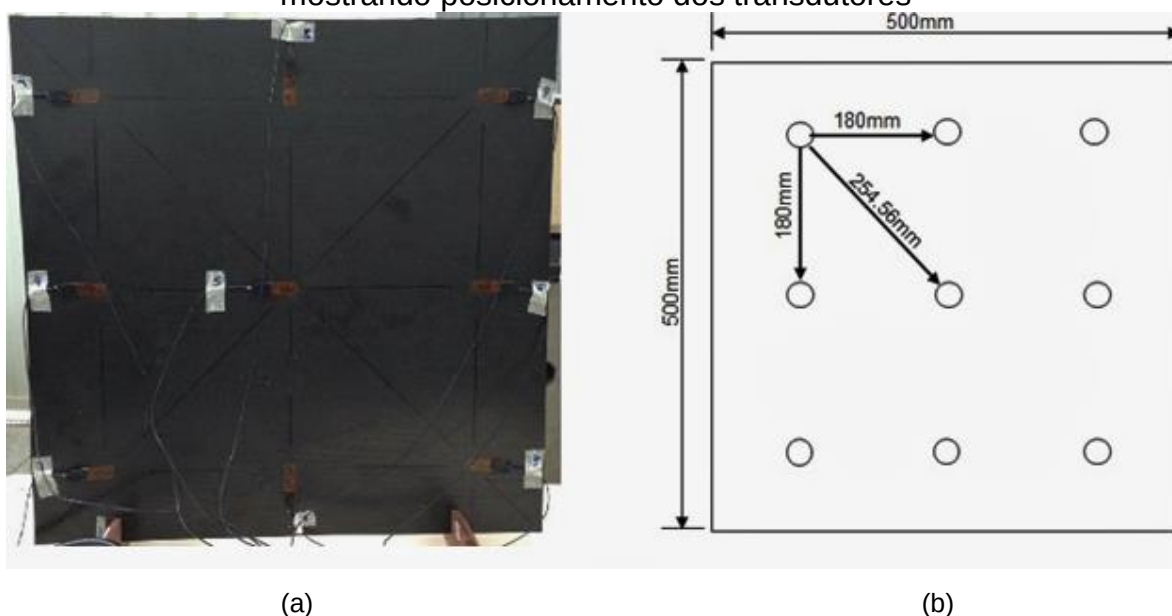
Figura 27 – Transdutor PZT modelo SML-SP1-1/4-0 fabricado pela Accelent



Fonte: Elaborado pelo Autor

Este arranjo também possui 9 transdutores como o arranjo do material isotrópico. Este arranjo fornece 72 caminhos possíveis entre sensor/atuador. Do mesmo modo do experimento com material isotrópico, cada caminho vai ser designado por P_{ij} , onde o índice i representa o transdutor atuador e o índice j representa o transdutor sensor. Os caminhos possíveis de sensoriamento são mostrados na figura 18

Figura 28 – (a) Foto da placa utilizada no experimento e (b) Ilustração da placa mostrando posicionamento dos transdutores

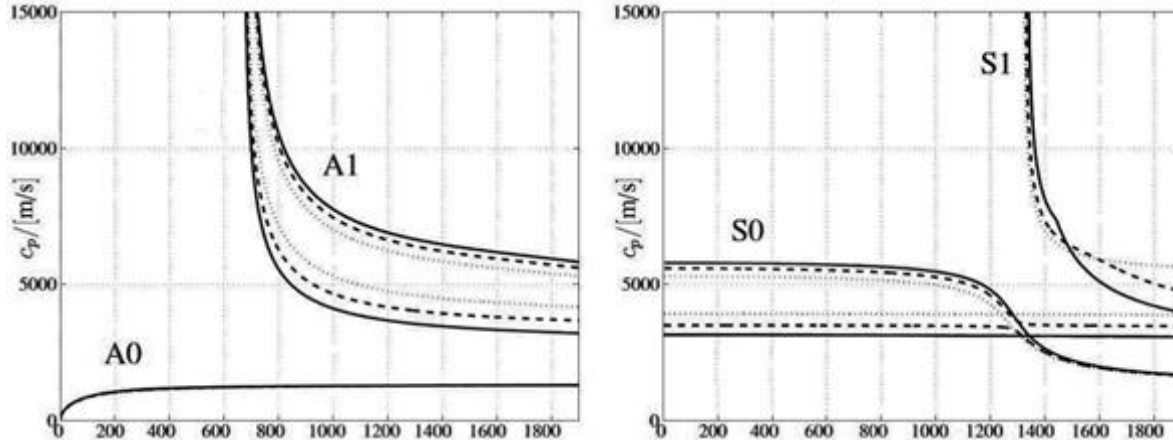


Fonte: Elaborado pelo Autor

O experimento proposto para localizar os danos na estrutura anisotrópica é similar ao experimento para localizar danos na estrutura isotrópica, fazendo uma análise do sinal gerado da propagação de ondas de Lamb para cada caminho do arranjo. A geração e aquisição dos sinais foi realizada com auxílio da placa ScanGenie-II Battery Edition fabricado pela Accelent e também o software ACCESS 2.1.

Considerando que o corpo de prova é anisotrópico, a velocidade de propagação de ondas guiadas irá depender da direção de propagação. Assim, é possível obter um gráfico de dispersão para cada direção de propagação e consequentemente um perfil de velocidade por direção de propagação. A figura 29 mostra curvas de dispersão numérica para um compósito carbono/epóxi de trama simples (*plain weave*) com 9 camadas e sequência de empilhamento de $[0/90/+45/90/0/90/-45/90/0]$. Este tipo de compósito é semelhante ao compósito testado experimentalmente.

Figura 29 – Curvas de dispersão de velocidade de fase. Propagação a $0,5^\circ$ (curvas sólidas), $22,5^\circ$ (curvas tracejadas) e $44,5^\circ$ (curvas de pontos)



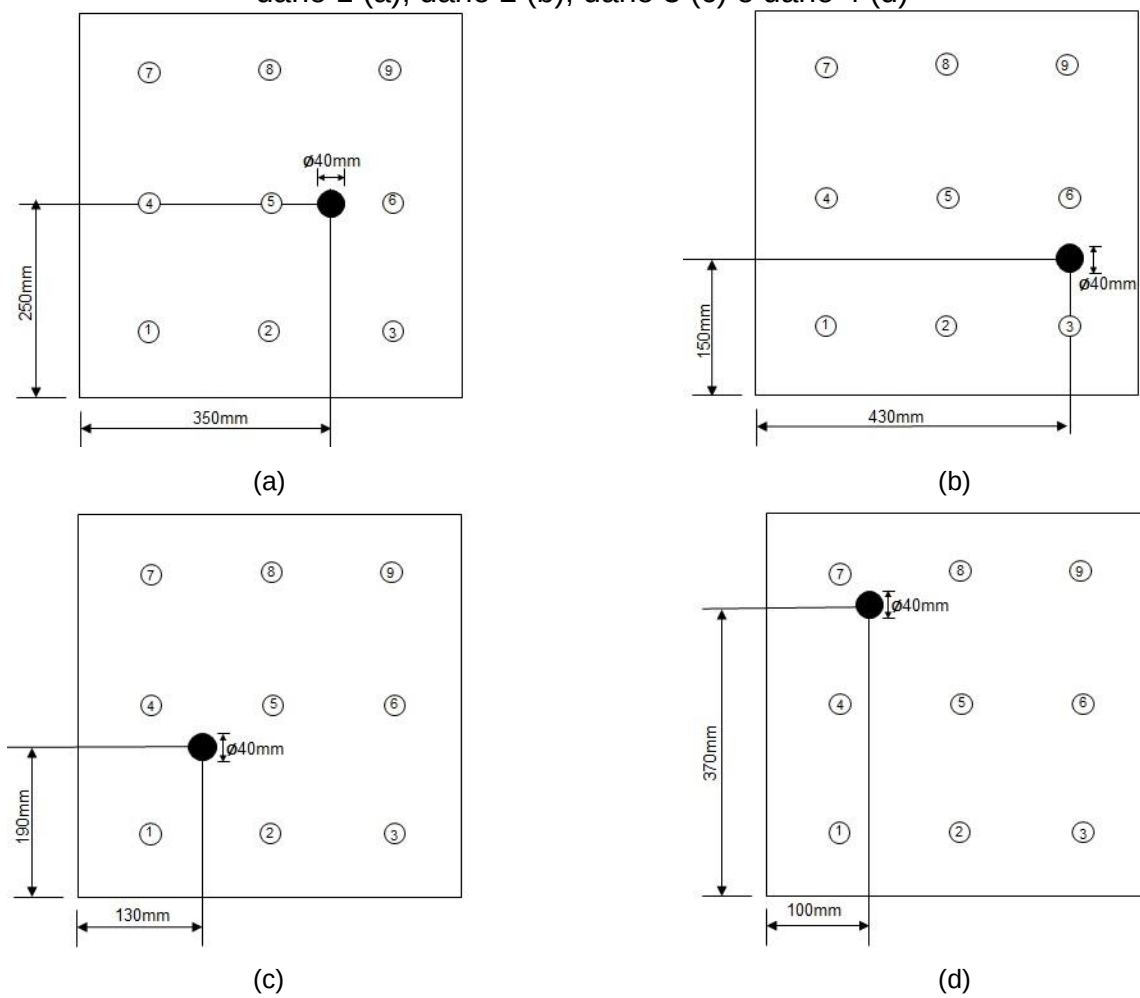
Fonte: Granja (2015).

Para aquisição de dados foram escolhidos os mesmos parâmetros do experimento com o alumínio ($f_s = 3\text{MHz}$, $N=1000$). Os sinais de excitação também são os mesmos: um seno de 150, 200, 250, 300, 350 KHz de amplitude 35 volts janelado por um filtro *hanning* e cinco ciclos (*Burst* 5). As frequências de excitação foram escolhidas pois apresentam baixa dispersão, isto é, mesmo com uma mudança na frequência, a velocidade de fase permanece constante.

4.2.1.2. Posicionamento dos danos

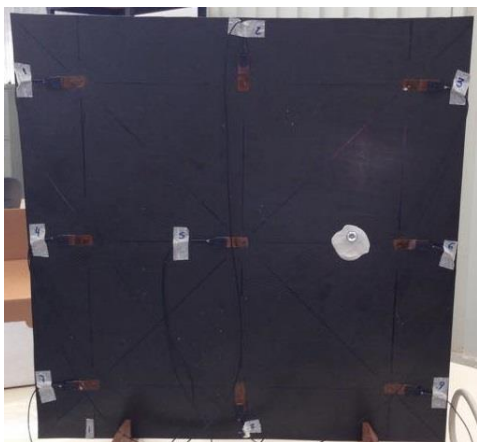
Para análise de localização de danos no compósito foram definidos quatro pontos onde seriam inseridos os danos em ensaios diferentes. O posicionamento dos danos está mostrado nas figuras 30 (Ilustração) e 31 (Fotos).

Figura 30 – Ilustração do posicionamento dos danos na placa compósita: do dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d)



Fonte: Elaborado pelo Autor

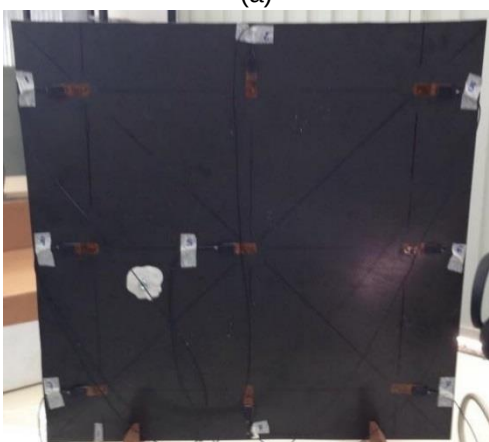
Figura 31 – Fotos do posicionamento do dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d)



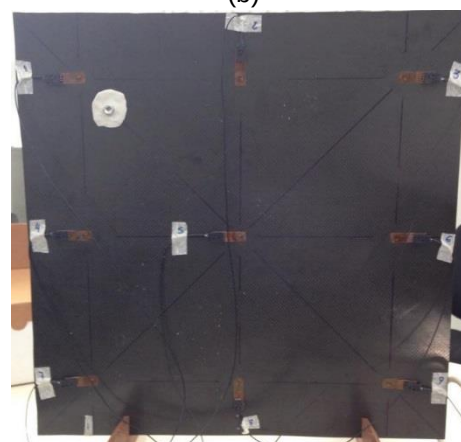
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pelo Autor

A localização de danos será realizada na estrutura compósita pelo mesmo conceito utilizado na placa alumínio: será avaliado a diferença entre os sinais da estrutura saudável (*baseline*) com o sinal com dano. Esta avaliação será possível pois o dano induz fenômenos de dispersão e atenuação na propagação de ondas guiadas, como mostrado na figura 24.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este estudo de monitoramento estrutural visa localizar danos em dois tipos de componentes usados na indústria aeronáutica, o alumínio e o material compósito. As análises dos sinais e o processamento se iniciaram com ensaios na estrutura sem danos e posteriormente com dano. Os sinais obtidos da estrutura sem danos foram processados para ser comparados com os sinais com dano da estrutura. As simulações com danos foram realizadas através da colagem provisória de uma massa adesiva que produz o efeito de delaminação nas placas utilizadas. Esta massa pode ser retirada e colocada em outras posições, o que caracteriza o ensaio como não-destrutivo. Transdutores PZT foram usados para emissão e captação de sinais de ondas de Lamb, no caso deste trabalho em uma configuração *pitch-catch*, onde um transdutor PZT emite e outros transdutores captam o sinal.

Nesta seção serão apresentados os resultados preliminares deste trabalho. Este item será dividido em duas seções principais: Materiais Isotrópicos e Anisotrópicos.

5.1. MATERIAL ISOTRÓPICO

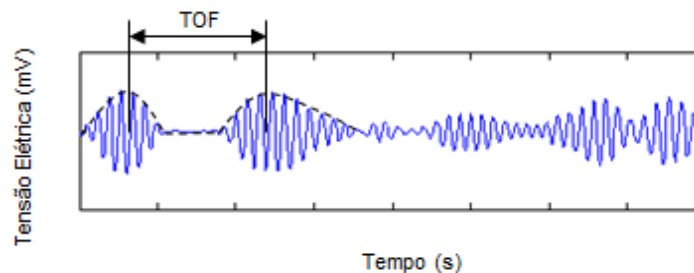
As medidas foram realizadas utilizando nove PZTs como o mostrado na figura 16, que foram colados na estrutura conforme mostrado na figura 17. Os transdutores foram colados na estrutura com epóxi, que é um adesivo bastante utilizado na indústria aeroespacial devido a sua tolerância a mudança de temperatura e também o grau de rigidez. A aquisição foi feita com a placa ScanGenie II e o software ACESS 2.1, conforme mostrado na figura 15. O transdutor PZT pode atuar tanto como atuador ou como sensor, quando um PZT atuar como atuador os outros 8 atuam como sensores (em uma configuração *pitch-catch*). Portanto, serão 72 possíveis caminhos de propagação como mostrado na figura 18. Além disso, como os 72 possíveis caminhos são

comparados entre si (não se compara um dado caminho com ele mesmo), este arranjo fornece um total de 2556 funções erro. As ondas foram digitalizadas em uma frequência de amostragem de 3MHz e cada forma de onda observada é a média de 25 sinais. O sinal de excitação foi o *Burst5*, que consiste em uma senóide janelada (*hanning*) com cinco picos.

A delaminação foi simulada em quatro diferentes pontos da placa de alumínio por uma massa adesiva com 40mm de diâmetro e 2mm de espessura, como mostrado nas figuras 22 e 23. Os sinais foram analisados em cinco diferentes frequências de excitação (figura 25) sem o dano e com o dano simulado em experimentos diferentes. Não foi simulado danos múltiplos no mesmo experimento.

Em placas isotrópicas como o alumínio a velocidade de propagação de ondas guiadas é dependente somente da frequência de excitação se tivermos temperatura e espessura da placa constantes. A velocidade de propagação de ondas de Lamb para a placa de alumínio foi obtida experimentalmente para cada frequência de excitação, como mostrado na tabela 3. Para a placa de alumínio experimentada, foi considerado dois PZTs fixos para a determinação da velocidade de propagação. Com a determinação do TOF a partir do sinal coletado (Figura 32), a velocidade de propagação pode ser definida como a razão entre a distância entre os PZTs e o TOF calculado.

Figura 32 – Exemplo do cálculo do TOF para determinação da velocidade de grupo.



Fonte: Elaborado pelo autor

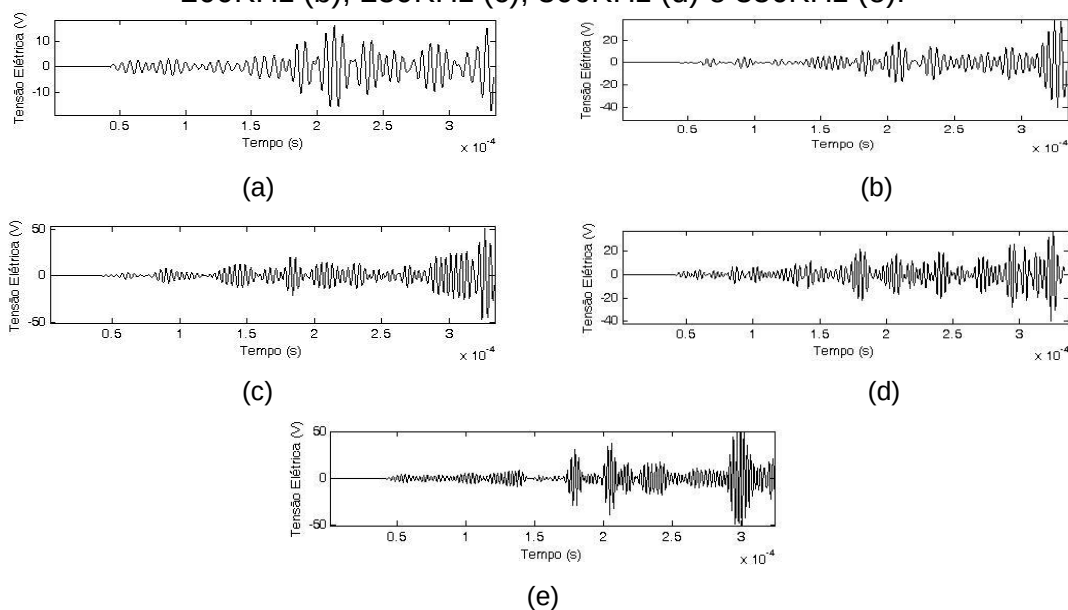
Tabela 3 – Velocidade de grupo obtida experimentalmente para as cinco frequências de excitação utilizadas nos experimentos

Frequência (KHz)	Velocidade de grupo experimental (m/s)
150	5364.93
200	5361.18
250	5381.78
300	5331.89
350	5280.46

Fonte: Elaborado pelo Autor

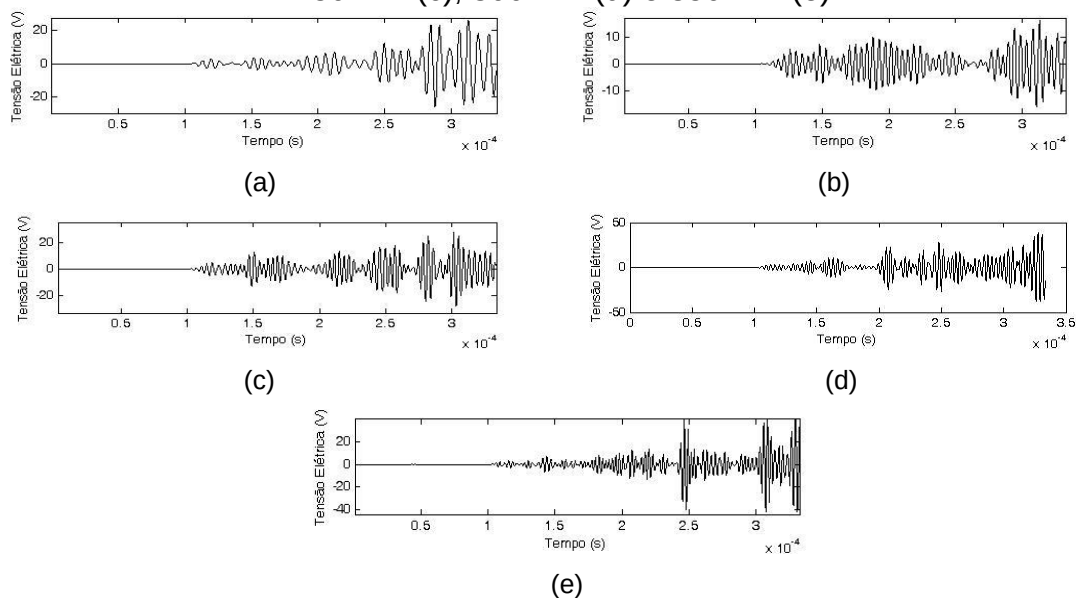
Os sinais foram obtidos com a estrutura sem danos (*baseline*) e com danos para cada caminho de propagação e em cada frequência de excitação. As figuras 33 e 34 mostram exemplos do sinal *scatter* para os caminhos P_{12} e P_{19} quando o dano 1 foi inserido na placa. A temperatura foi mantida constante durante todo o experimento.

Figura 33 – Sinal *scatter* obtido para o caminho P_{12} para 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 34 – Sinal *scatter* obtido para o caminho P_{19} para 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).

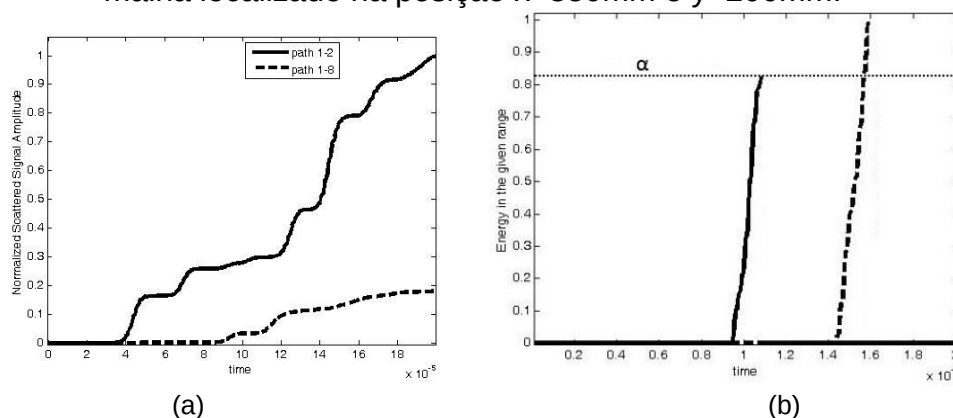


Fonte: Elaborado pelo Autor

Como exemplo, a figura 35a mostra o valor RMS da energia do sinal *scatter* para os caminhos P_{12} e P_{19} calculado através da equação 17 em função do tempo para a frequência de 250KHz. Esse procedimento é feito para todas as frequências de excitação.

A figura 35b mostra o intervalo, de acordo com o *time-of-flight*, em que a energia é calculada para o componente da malha na posição $x=350\text{mm}$ e $y=200\text{mm}$ para o dano 1. O valor α de energia é o maior valor de energia que os dois sinais têm em comum e mostra onde a função erro é calculada.

Figura 35 – Energia (Valor RMS) do sinal *scatter* dos caminhos P_{12} e P_{19} para 250KHz (a) e energia do sinal *scatter* dos caminhos P_{12} (—) e P_{19} (-----) calculado no intervalo estimado através do *time-of-flight* para o componente da malha localizado na posição $x=350\text{mm}$ e $y=200\text{mm}$.

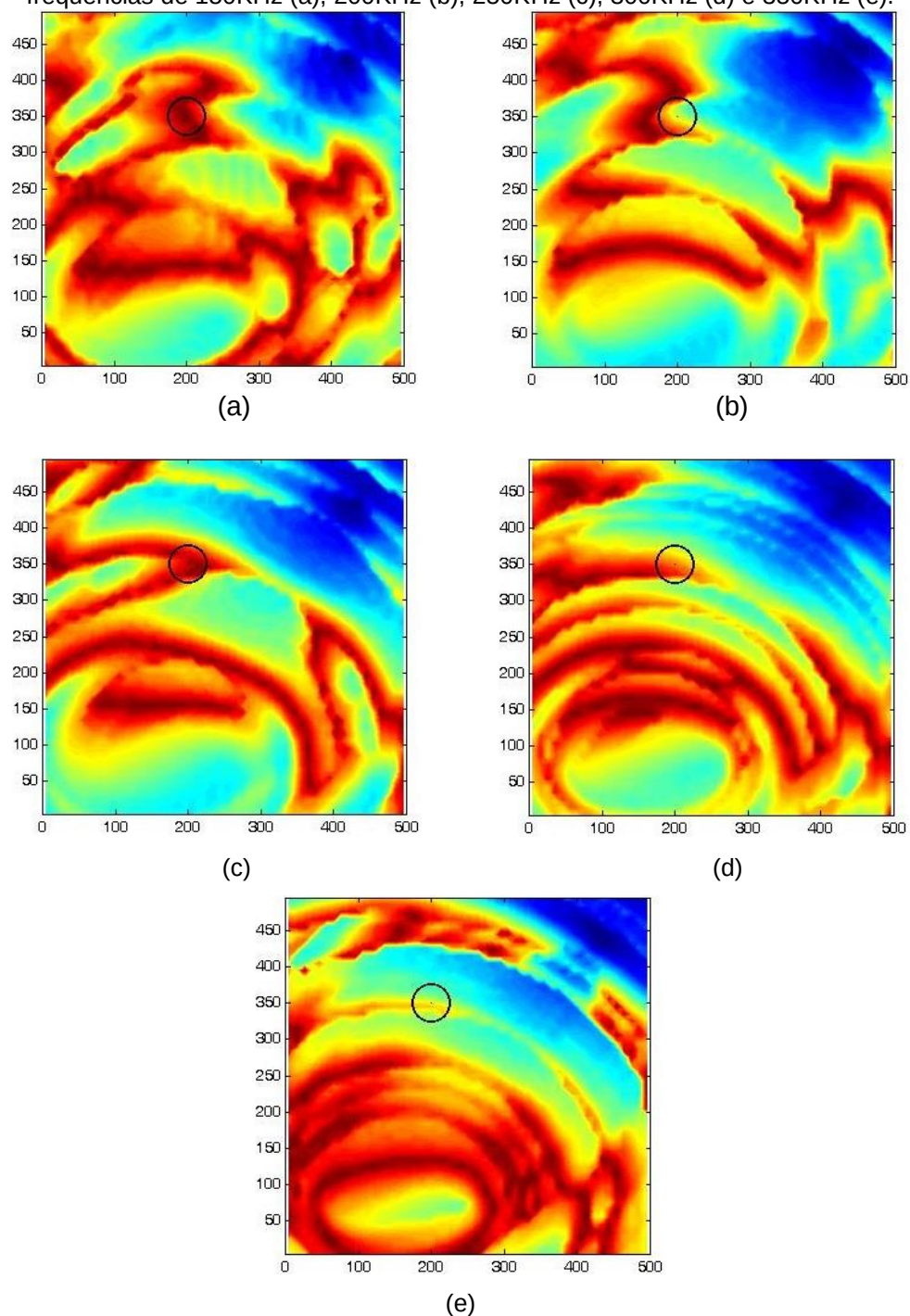


Fonte: Elaborado pelo Autor

Uma malha uniforme é criada sobre a área da superfície da placa de alumínio. Cada grid tem 10mm de lado. Para cada componente da malha um intervalo do sinal é obtido e é correspondente ao *time-of-flight* total. O *TOF* total é o tempo em que a onda guiada propaga do atuador até o ponto da malha analisado mais o tempo deste ponto até o sensor (equações 13 e 14). Além disso, o intervalo do sinal de cada caminho a ser analisado é diferente para cada elemento da malha, pois as distâncias entre o ponto analisado e o atuador/sensor mudam.

A função erro é obtida para cada elemento da malha comparando dois caminhos diferentes. A figura 36 mostra as funções erro calculadas com os caminhos P_{12} e P_{19} calculadas para várias frequências de excitação. Nesta figura, os pontos da malha com valor mínimo de erro (em vermelho) destacam os locais onde o dano é mais provável que esteja. O marcador 'O' mostra a posição real onde a delaminação foi simulada na estrutura. A imagem é gerada com o comando `countourf` do software MATLAB.

Figura 36 – Valores da função erro na placa de alumínio baseado nos caminhos P_{12} e P_{19} para frequências de 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).

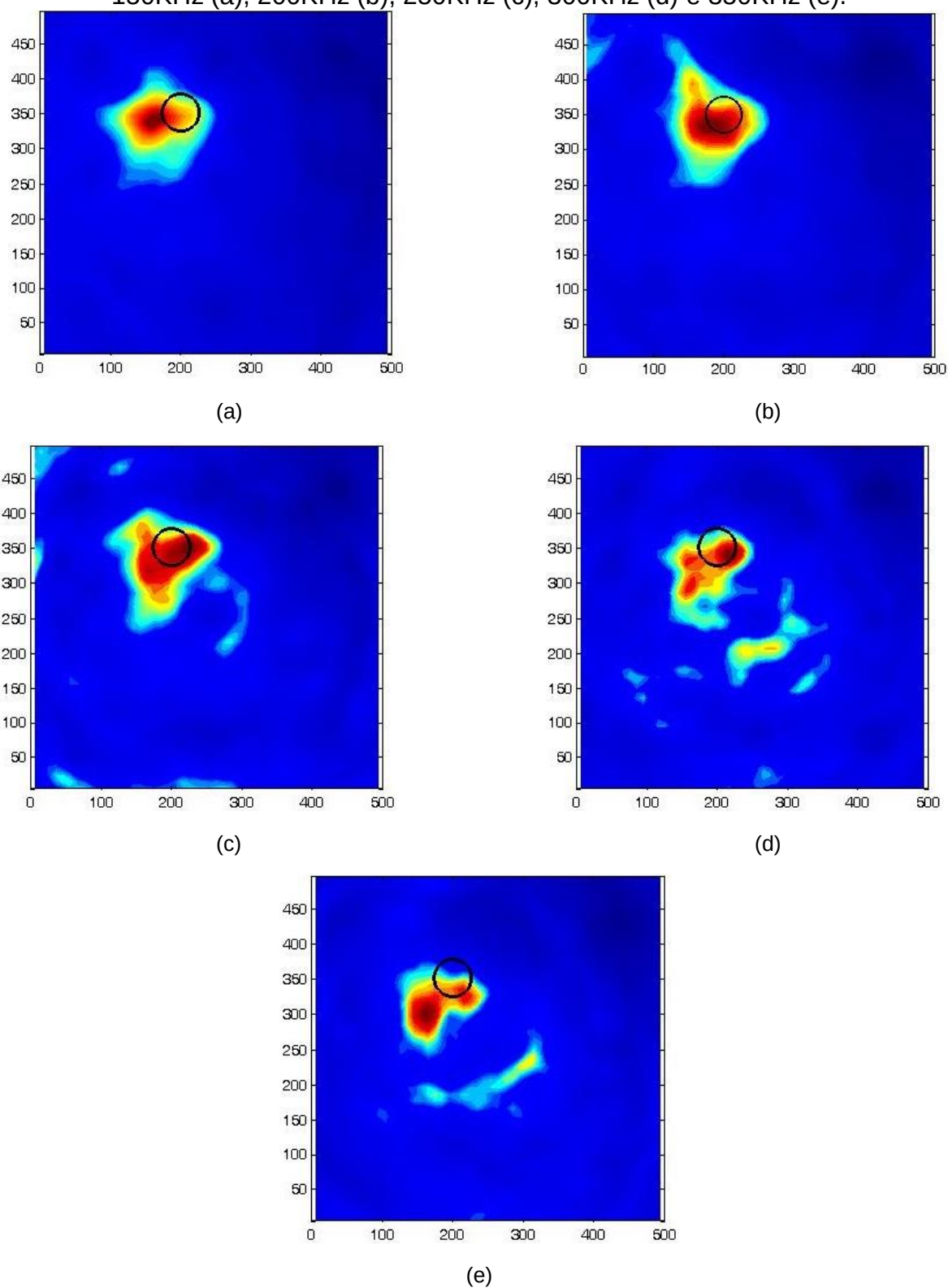


Fonte: Elaborado pelo Autor

A cor vermelha indica um nível mais baixo da função erro que representa a maior probabilidade da presença do dano.

Finalmente, a função erro é calculada para todas as combinações de caminhos. Isso significa que para cada frequência de excitação existem 2556 valores de erro para cada componente da malha. A função erro final é a soma de todas as funções erro de cada combinação de caminhos. As figuras 37a, 37b, 37c, 37d e 37e mostram os resultados obtidos para o dano 1 considerando as frequências de 150, 200, 250, 300 e 350KHz. A aquisição dos dados foi realizada em um ambiente controlado com temperatura fixa em 25°C.

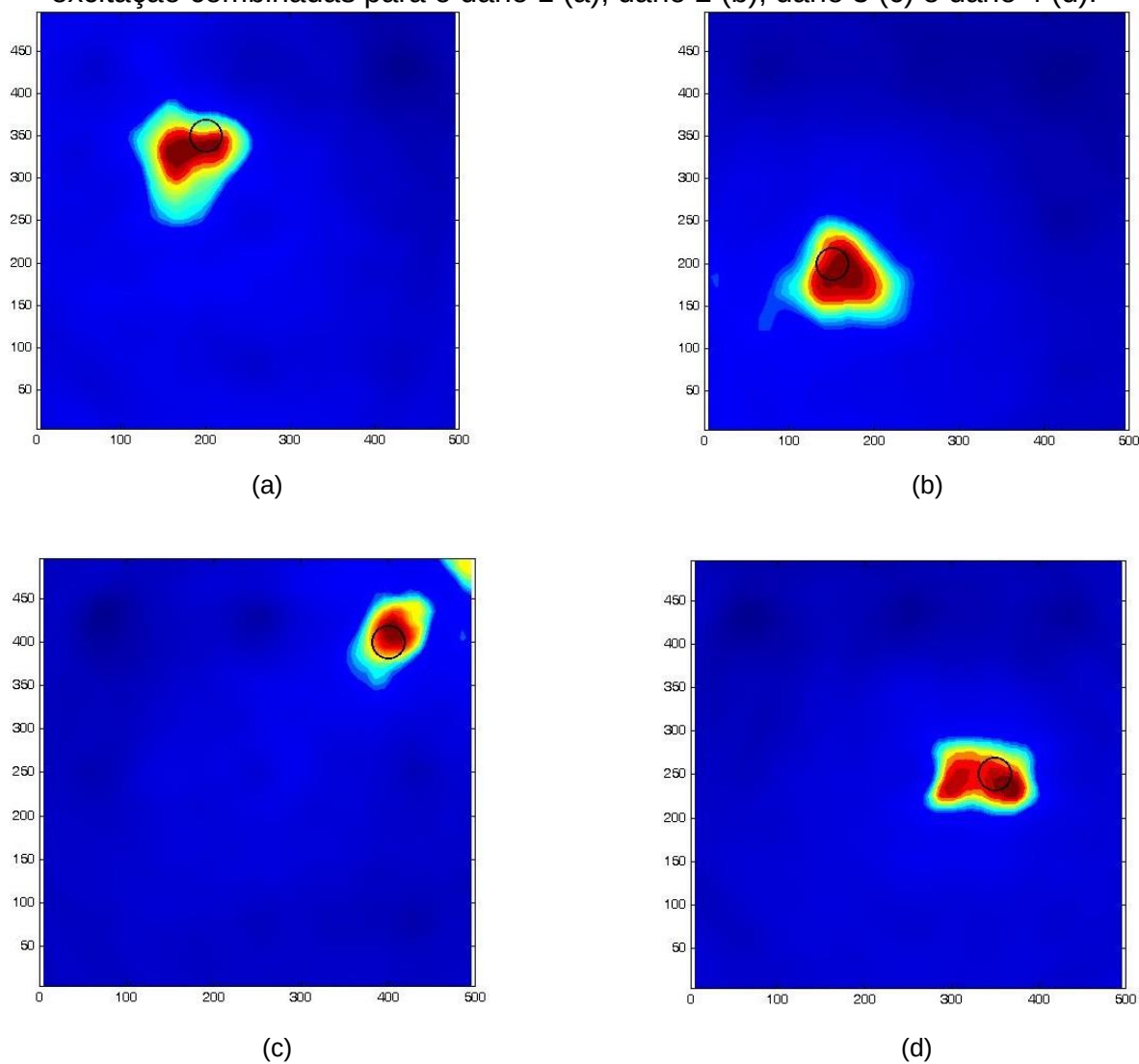
Figura 37 – Valores da função erro final para o dano 1 para as frequências de 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados podem ser melhorados quando combinamos todas as frequências de excitação. A mesma abordagem foi realizada para todos os danos mostrados na figura 22. As figuras 38a, 38b, 38c e 38d mostram os resultados para os quatro danos testados e com as frequências de excitação combinadas.

Figura 38 – Valores da função erro final com as cinco frequências de excitação combinadas para o dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d).



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2. MATERIAL ANISOTRÓPICO

As medidas foram realizadas utilizando nove PZTs como o mostrado na figura 27, que foram colados na estrutura conforme mostrado na figura 28. Os transdutores foram colados na estrutura com epóxi, que é a cola mais usada na indústria aeroespacial devido a sua tolerância a mudança de temperatura e também o grau de rigidez. A aquisição foi feita com a placa ScanGenie II e o software ACESS 2.1, conforme mostrado na figura 25. A rede de sensores possui o mesmo número de sensores do experimento com material isotrópico e os possíveis caminhos de propagação são mostrados na figura 18. Além disso, como os 72 possíveis caminhos são comparados entre si (não se compara um dado caminho com ele mesmo), este arranjo fornece um total de 2556 funções erro. As ondas foram digitalizadas em uma frequência de amostragem de 3MHz e cada forma de onda observada é a média de 25 sinais. O sinal de excitação foi o *Burst5*, que consiste em uma senóide janelada com cinco picos.

Delaminação foi simulada em quatro diferentes pontos da placa de compósito da mesma forma que o experimento com o material isotrópico (massa adesiva com 40mm de diâmetro e 2mm de espessura) como mostrado nas figuras 30 e 31. Os sinais foram analisados em cinco diferentes frequências de excitação (figura 21) sem o dano e com o dano simulado em experimentos diferentes. Não foi simulado danos múltiplos no mesmo experimento.

Em placas anisotrópicas a velocidade de propagação de ondas guiadas não é dependente somente da frequência de excitação, temperatura e espessura da placa. Nesse tipo de material a velocidade de propagação é também dependente da direção de propagação. Isso significa que em uma dada direção a velocidade tem um valor definido constante, porém quando outra direção é analisada, o valor da velocidade de propagação varia. A velocidade de propagação de ondas de Lamb para a placa de compósito testada foi obtida experimentalmente para cada frequência de excitação, e o resultado obtido é mostrado na Figura 40. A figura 40 está em coordenada polar e mostra o perfil de velocidades em função da direção de propagação (θ) para todas as frequências de excitação (150, 200, 250, 300 e

350 kHz). Este gráfico foi obtido a partir determinação da velocidade para cinco direções diferentes, como mostrado na figura 39. Para cada direção e para cada frequência de amostragem, o TOF é obtido e com ele obtemos a velocidade naquela direção. A partir da determinação da velocidade em cada uma das cinco direções, uma interpolação polinomial de grau dois é realizada afim de obter uma maior discretização da curva.

Figura 39 – Direções em que a velocidade de propagação foi calculada para cada frequência de excitação. $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 26,56^\circ, \theta_3 = 45^\circ, \theta_4 = 71,56^\circ, \theta_5 = 90^\circ$.

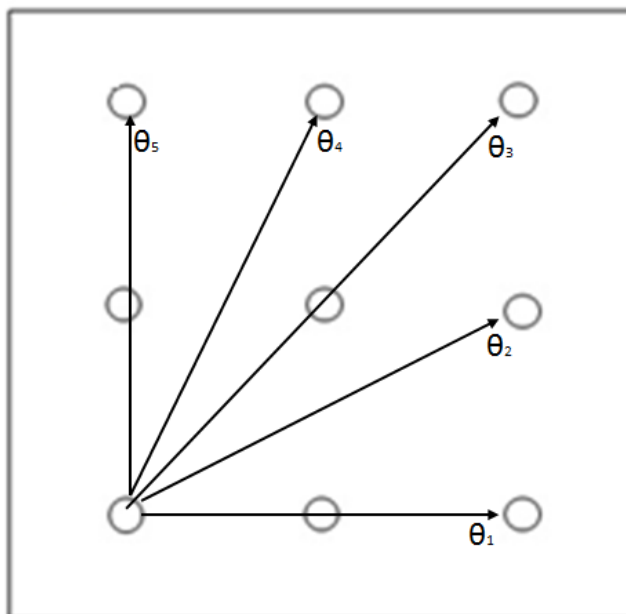
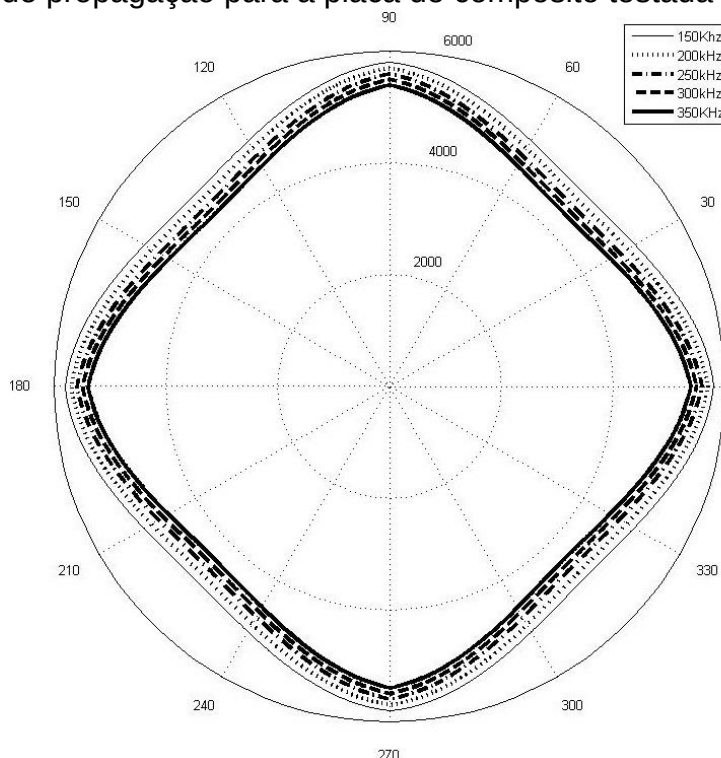


Figura 40 – Valores da velocidade de propagação experimental em função da direção de propagação para a placa de compósito testada (figura 27a)



Fonte: Elaborado pelo Autor

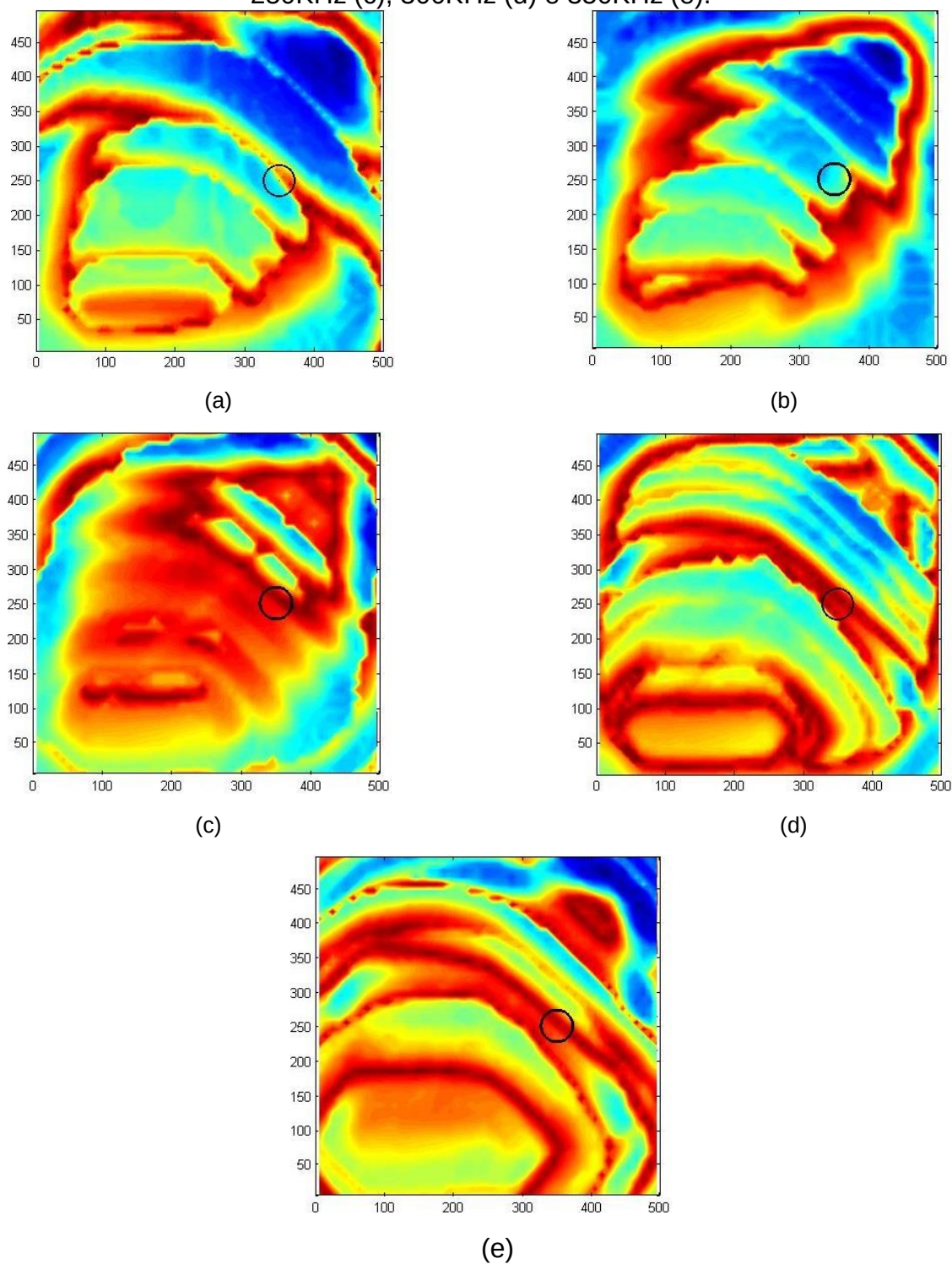
O sinal sem o dano e com o dano é obtido para todos os caminhos em todas as frequências de excitação (como feito no experimento com a placa de alumínio).

O cálculo da energia do sinal é realizado de maneira similar ao experimento anterior. A determinação do intervalo onde a energia do sinal será calculada agora depende do perfil de velocidades da frequência testada. Para cada ponto da malha, a direção de propagação do atuador/ponto e do ponto/sensor é levada em conta para definição da velocidade de propagação, afim de se definir um intervalo mais preciso onde a energia do sinal será calculada. O *TOF* total é o tempo em que a onda guiada propaga do atuador até o ponto da malha analisado mais o tempo deste ponto até o sensor (Equações 13 e 14). Também, os intervalos são diferentes para cada elemento da malha pois as distâncias e a direção entre atuador/ponto e ponto/sensor mudam. Após a definição do intervalo, a energia é

calculada e o valor onde a função erro será calculada é definido, como mostrado na figura 31b.

Uma malha uniforme é criada sobre a área da superfície da placa do compósito e a função erro é obtida para cada grid comparando-se dois caminhos de propagação diferentes. A Figura 41 mostra a função erro calculada considerando o dano 1 para os caminhos P_{12} e P_{19} para várias frequências de excitação. Nesta figura, assim como no experimento anterior, os pontos da malha com valor mínimo de erro (em vermelho) destacam os locais onde o dano é mais provável que esteja. O marcador 'O' mostra a posição real onde a delaminação foi simulada na estrutura.

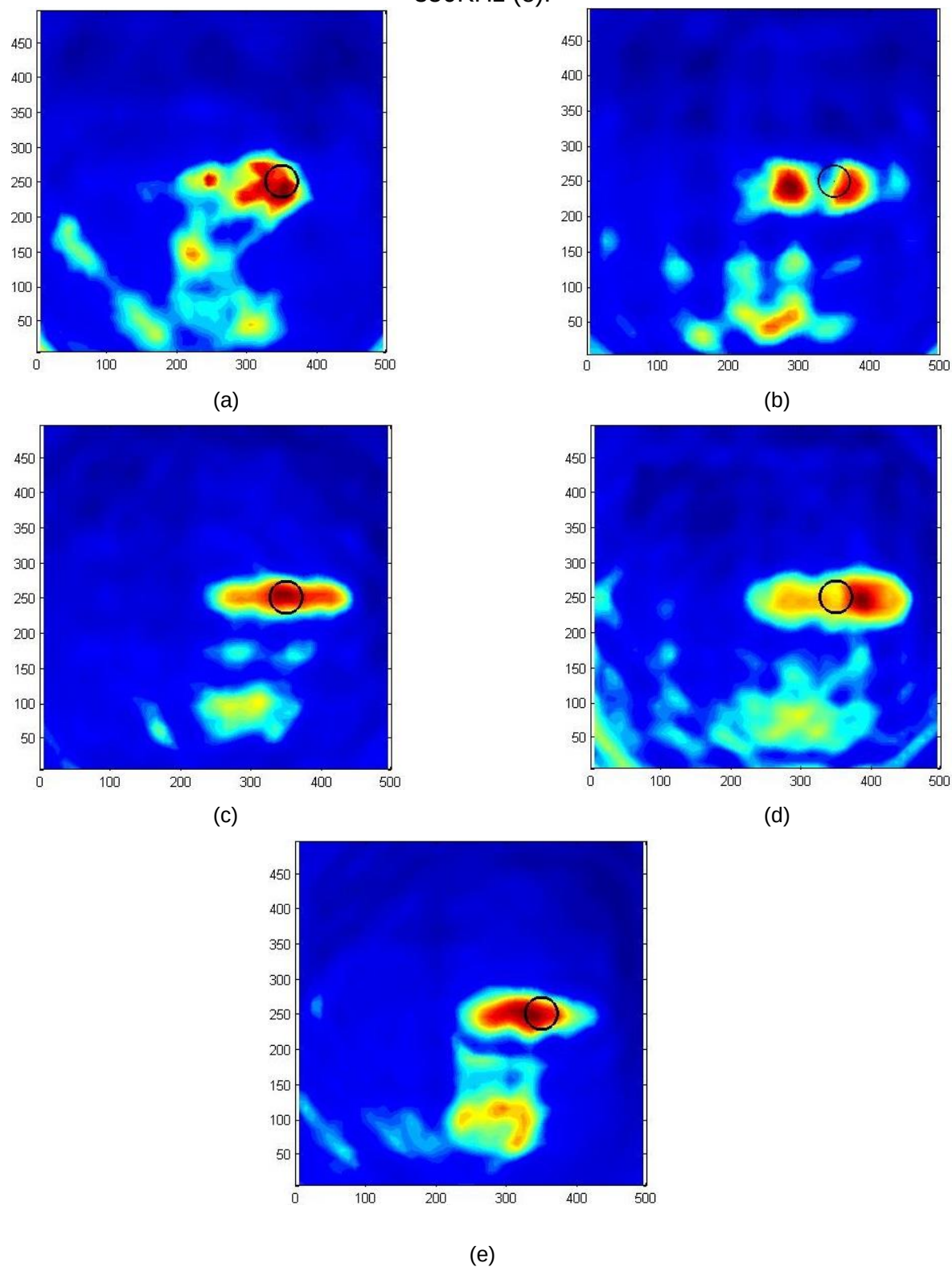
Figura 41 – Valores da função erro para o dano 1 na placa de material compósito baseado nos caminhos P_{12} e P_{19} para frequências de 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).



Fonte: Elaborado pelo Autor

Finalmente, a função erro é calculada para todas as combinações de caminhos. Isso significa que para cada frequência de excitação existem 2556 valores de erro para cada componente da malha. A função erro final é a soma de todas as funções erro de cada combinação de caminhos. A figura 42 mostra os resultados obtidos para o dano 1 considerando as frequências de 150, 200, 250, 300 e 350KHz. A aquisição dos dados foi realizada em um ambiente controlado com temperatura fixa em 25°C.

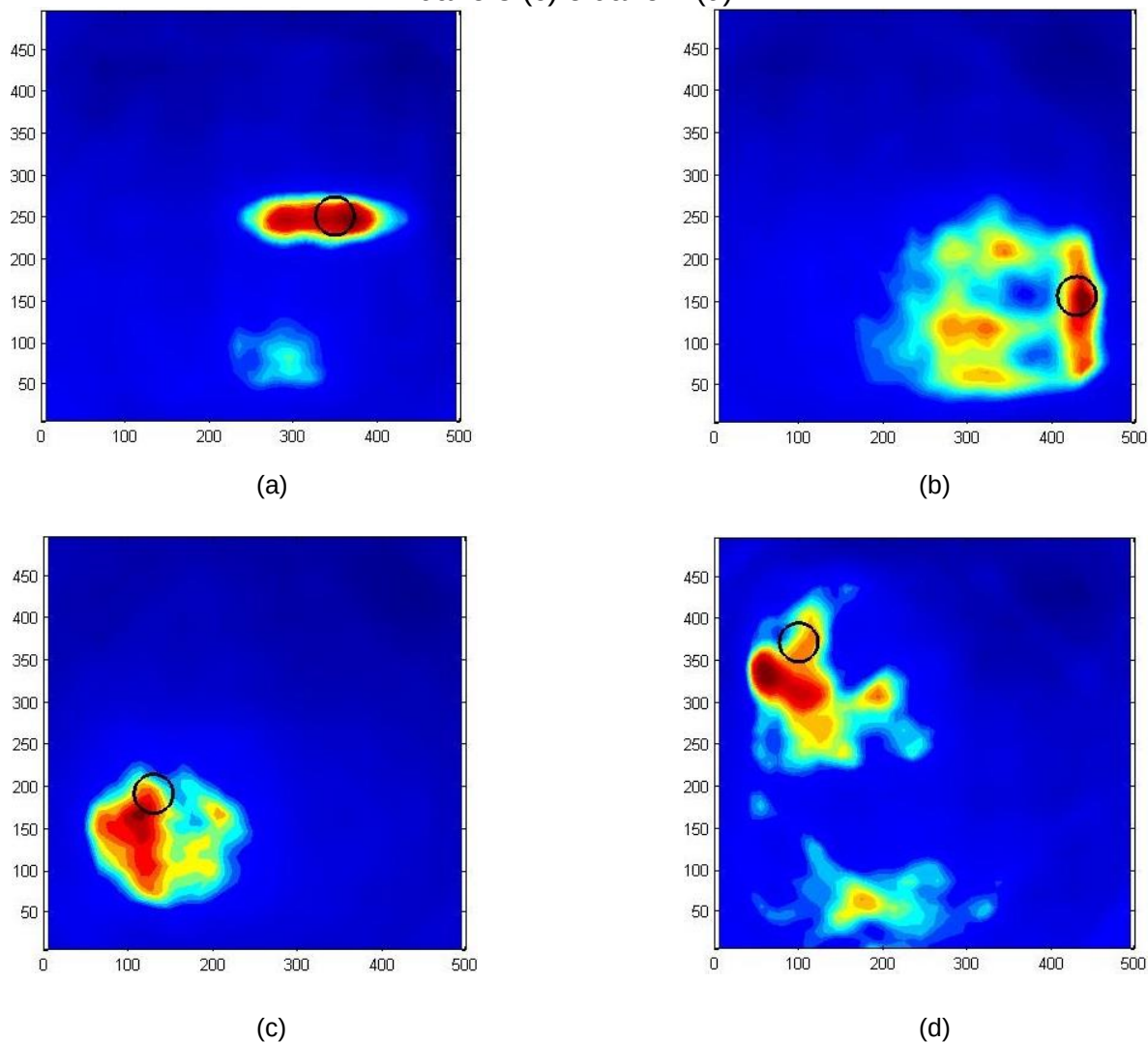
Figura 42 – Valores da função erro final para a placa de material compósito para o dano 1 para as frequências de 150KHz (a), 200KHz (b), 250KHz (c), 300KHz (d) e 350KHz (e).



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados podem ser melhorados quando combinamos todas as frequências de excitação. A mesma abordagem foi realizada para todos os danos mostrados na figura 27. As figuras 43a, 43b, 43c e 43d mostram os resultados para os quatro danos testados e com as frequências de excitação combinadas.

Figura 43 – Valores da função erro final para a placa de material compósito com as cinco frequências de excitação combinadas para o dano 1 (a), dano 2 (b), dano 3 (c) e dano 4 (d).



Fonte: Elaborado pelo Autor

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Este trabalho analisa um método de monitoramento da integridade de estruturas para materiais isotrópicos (Alumínio) e propõe adaptações para que o método seja também aplicado para materiais anisotrópicos (Material Compósito).

As imagens geradas são construídas de acordo com a diferença entre o sinal obtido da estrutura saudável e o sinal obtido da estrutura com dano. O intervalo de tempo onde a energia do sinal é calculada é baseado na velocidade de propagação do primeiro modo simétrico (S_0) de propagação. A energia é calculada neste intervalo, que é o intervalo imediatamente depois em que o sinal refletido chega ao sensor (teórico), afim de diminuir o efeito de reverberação do sinal.

Embora o método apresentado neste trabalho mostrou ser confiável para localização de delaminação, o modo de propagação utilizado (S_0) tem uma maior sensibilidade para danos como trincas e furos. Este método apresenta boa sensibilidade em trincas e furos pois é baseado na reflexão das ondas guiadas do modo S_0 nos danos. Como as trincas e furos são transversais a propagação, isto causa uma reflexão maior das ondas de Lamb.

Nas placas analisadas foram utilizados nove transdutores de PZT, que atuam como atuadores e sensores gerando um total de 72 caminhos e 2556 funções de erro. Notou-se que a utilização de apenas dois pares de atuadores/sensores e uma frequência de excitação não forneceram bons resultados. Os melhores resultados foram obtidos utilizando todas as funções de erro possíveis e as cinco frequências de excitação, no entanto, acredita-se que este número é muito grande e pode ser reduzido

6.1. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

O método discutido neste trabalho deu bons resultados para as condições testadas, isto é, condições controladas de temperatura e operação. Sabe-se que um dos principais problemas em métodos SHM é a variação dos sinais devido as condições ambientais. Portanto, sugere-se que esta metodologia seja também testada considerando a variação de temperatura do corpo de prova.

Outro ponto a ser considerado é sobre a necessidade de grande número de funções de erro e diferentes frequências de excitação. Acredita-se que este número pode ser reduzido.

Sugere-se, ainda, o estudo de outros modos de excitação. Neste trabalho foi usado apenas o modo S0, no entanto, outros modos podem contribuir positivamente para a exatidão do método.

Referências

- ADAMS, R. D.; CAWLEY, P. A review of defect. Types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. **NDT International**, Londres, v.12, n.4, p. 208-222, 1988.
- BAPTISTA, F. G. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de Integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica**. 2010. .. f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.
- BRANDT, S. A. (Ed.). **Introduction to aeronautics: a design perspective**. New York: Aiaa, 2004. 391 p.
- CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. Boca Raton: CRC, 2012. 504 p.
- CROXFORD, A. J.; WILCOX, P. D.; DRINKWATER, B. W.; KONSTANTINIDIS, G. Strategies for guided-wave structural health monitoring. **Proceedings of the Royal Society**, Londres, v. 483, n. 287, p. 2961-2981, 2007
- FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMENT, M. T. An introduction to damage prognosis. In: INMAN, D. J.; FARRAR, C. J.; LOPES JUNIOR, V.; STEFFEN JUNIOR, V. **Damage prognosis for aerospace, civil and mechanical systems**. England: John & Sons, 2005. p. 1-12.
- FLYNN, E. B. et al. Maximum-likelihood estimation of damage location in guided-wave structural health monitoring. **The Royal Society**, Londres, v. 467, n. 2133, p. 2575-2596, 2011
- FORNARI JUNIOR, C. C. M.; GRISON, E. C.; HOINACKI, E. **Identificação de materiais poliméricos e substâncias correlatadas**. Rio de Janeiro: Wak Editora e Publicações, 2012. ... p.
- FRANÇA, A. A. **Deteção e localização de danos em materiais compósitos aplicado em aeronaves utilizando redes neurais artificiais**. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014
- FRANCO, V. R. **Monitoramento da integridade em estruturas aeronáuticas**. 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2009.
- GARCIA, A.; SPIN, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 247 p.
- GIURGIUTIU, V. Tuned lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 16, n. 4, p. 291–305, 2005.

GONSALEZ, C. et al. Structural damage detection in an aeronautical panel using analysis of variance. **Mechanical systems and signal processing**, Lugar de Publicação, v. 52-53, p. 206-216, 2015.

GORGIN, R. et al. Probability-based diagnostic imaging technique using error functions for active structural health monitoring. **Journal of Engineering Research and Applications**, India, v. 4, n. 7, p. 112-118, 2014.

GRAFF, K. F. **Wave motion in elastic solids**. New York: Oxford University, 1975. 649 p.

GRANJA, S. C. G. **Inspeção de materiais compósitos utilizando ondas acústicas guiadas**. 225 f. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

GUILLAUMIN, V.; MANKOWSKI, G. Localized corrosion of 2024 t351 aluminium alloy in chloride media. **Corrosion Science**, Londres, v. 41, n. 3, p.412-438, 1999.

HEXCEL. **Prepreg technology**. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2015

HIGUTI, R.T. et al. Damage characterization using guided-wave linear arrays and image compounding techniques. **IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control**, Piscataway, , v. 57, n. 9, p. 1985-1995, 2010.

HOUSTON, S. **Aircraft profile: airbus A350XWB**. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <<http://aviation.about.com/od/New-Aircraft/p/Aircraft-Profile-Airbus-A350-Xwb.htm>>. Acesso em: 7 ago 2015.

KAGAWA, Y. et al. Discrete huygens' model approach to sound wave propagation. **Journal of Sound and Vibration**, Londres, v. 218,n. 3,p. 419-444, 1998.

KESSLER, S. S. Certifying a structural health monitoring system: characterizing durability, reliability and longevity. In: INTERNATIONAL FORUM ON INTEGRATED SYSTEMS HEALTH ENGINEERING AND MANAGEMENT IN AEROSPACE, 1., 2005, Napa. **Proceeding...** Napa: [s.n.], 2005. p. ...-...

KONSTANTINIDIS, G.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. The temperature stability of guided wave structural health monitoring systems. **Smart Materials and Structures**, Bristo, v. 15, n. 5, p. 967-976, 2006

LEO, D. J. et al. **Engineering analysis of smart material systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 449 p.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 313 p.

LIPPMANN, G. On the principle of energy conservation. **Analysis Chemistry and Physics**, Londres, v. 24, p. 145-178, 1881.

LOWE, M. J. S.; Alleyne, D. N.; Cawley, P. Defect detection in pipes using guided waves. **Ultrasonics**, Londres, v. 36, n. 1-5, p. 147-154, 1998

LU YE, MICHAELS, J. E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variation. **Ultrasonics**, Londres, v. 43, n. 9, p. 717-731, 2005

MALMONGE, J. A.; MALMONGE, L. F.; FUZARI, G. C.; MALMONGE, S. M.; SAKAMOTO, W. K. Piezo and dielectric properties of PHB-PZT composite. **Polymer Composites**, Hoboken, v. 30, n. 9, p. 1333 - 1337, 2008.

MARQUI, C. R. **Modelagem de estruturas piezelétricas para aplicação em localização de falhas**. 2007. 220 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2007.

MICHAELS, J. E. Detection, localization and characterization of damage in plates with an in situ array of spatially distributed ultrasonic sensors. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 14, n. 3, p. 15, 2008.

MICHAELS, J. E.; MICHAELS, T. E. Guided waves signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates. **Wave Motion**, Londres, v. 44, n. 6, p. 482-492, 2007

PRADO, V. T. Lamb mode diversity imaging for non-destructive testing of plate-like structures. **NDT&E International**, Londres, v. 53, p. 86-95, 2013.

RAZZINI, A.H. **Análise da propagação de ondas de Lamb para aplicações em monitoramento de estruturas**. 2015. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2015

REYNOLDS, W. N. Nondestructive testing (NDT) of fibre-reinforced composite materials. **Material and Design**, Londres, v. 5, n. 6, p. 256-270, 1985

SHACKELFOR, J. F. **Introdução a ciência dos materiais para engenheiros**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 321 p.

SCOTT, I. G.; SCALA, C. M. A review of non-destructive testing of composite materials. **NDT international**, Londres, v. 15, n. 2, p. 75-86, 1982

SOHN, H. Statistical Pattern Recognition paradigm applied to defect detection in composite plates. In: INMAN, D. J.; FARRAR, C. R.; LOPES JUNIOR., V.; STEFFEN JUNIOR., V. (Ed.). **Damage prognosis: for aerospace, civil and mechanical systems**. Hoboken: John Wiley, 2005. p. 293 – 303.

STASZEWSKI, W.; BOOLER, C.; TOMLINSON, G. R. (Ed.). **Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing**. Chichester: John Wiley and Sons, 2004. 266 p.

VENET, M. E.; PEREIRA, A. H. P. **Materiais e dispositivos piezoelétricos: fundamentos e desenvolvimento**. São Carlos: ATPC do Brasil, 2004. 18 p. Apostila 1 do curso. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/ultra-som/ceramicas-piezoeletricas.html>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

WILCOX, P. LOWE, M. J. S.; CAWLEY, P. The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves. **NDT and E International**, Londres, v. 34, n. 1, p. 1-9, 2001.

WORLTON, D. C. Experimental confirmation of Lamb waves at megacycles frequencies. **Journal of Applied Physics**, Londres, v. 32, n.32 p. 967-971, 1961

XIAOLIANG ZHAO, ... et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. defect detection, localization and growth monitoring. **Smart Materials and Structures**, Bristol,, v.16, n. 4, p. 1208-1217, 2007

ZHONGQING SU, ...; LIN YE; Y. L. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. **Journal of Sound and Vibration**, Londres, v. 295, n. 3-5, p. 753-780, 2006.

ZHONGQING SU, ... et al. On selection of data fusion schemes for structural damage evaluation. **Structural Health Monitoring**, Stanford, v. 8, n. 3, p. 223-241, 2009.

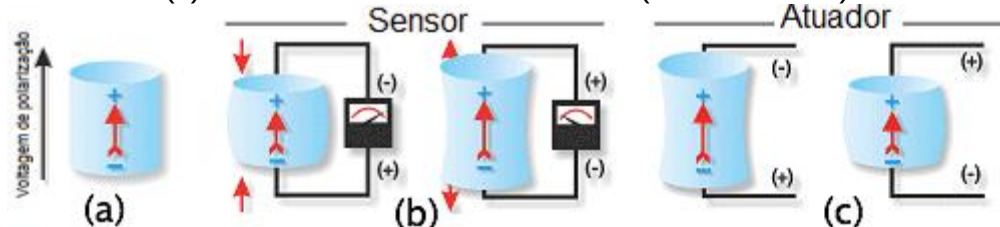
ZHONGQING, S. U. ; LIN, Y. **Identification of damage using lamb waves**. New York: Springer, 2009. 346 p. (Lecture Notes in Applied and Computational, 48).

APÊNDICE

A- Materiais Piezelétricos

Piezeletricidade é definida como uma energia elétrica que é acumulada em certos sólidos (cristais, cerâmicas, entre outros) em resposta a uma tensão mecânica aplicada no material. A palavra piezeletricidade significa eletricidade resultante da aplicação de tensão e este fenômeno foi descoberto em 1880 em cristais de quartzo pelos irmãos Pierre e Jacques Curie. No ano seguinte à descoberta, o efeito piezelétrico inverso foi verificado por Lippman (1881) e consiste na ocorrência de deformação no material quando este é submetido a um campo elétrico.

Figura A1 – Ilustração da ocorrência da piezeletricidade. (a) Cristal sem aplicação de campo elétrico ou deformação. (b) Cristal atuando como sensor (efeito direto) (c) Cristal atuando como atuador (efeito inverso).



Fonte: Razzini (2015)

Nos dias atuais os materiais piezelétricos são utilizados como elementos sensores e/ou atuadores em aplicações tecnológicas tanto para baixas frequências (na faixa de Hz) como para altas frequências (da ordem de GHz). Os efeitos direto e indireto permitem que estes materiais sejam usados como sensores e atuadores, respectivamente.

Além dos materiais naturais que exibem o efeito *piezo* (como o quartzo e a turmalina), existem também materiais cerâmicos policristalinos ferroelétricos tal como o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), que tem sido objeto de muitas pesquisas nas últimas décadas. Estas cerâmicas ferroelétricas têm se mostrado uma ferramenta versátil por apresentar propriedades piezelétricas mais elevadas que outros materiais e também podem assumir uma vasta variedade de formas e

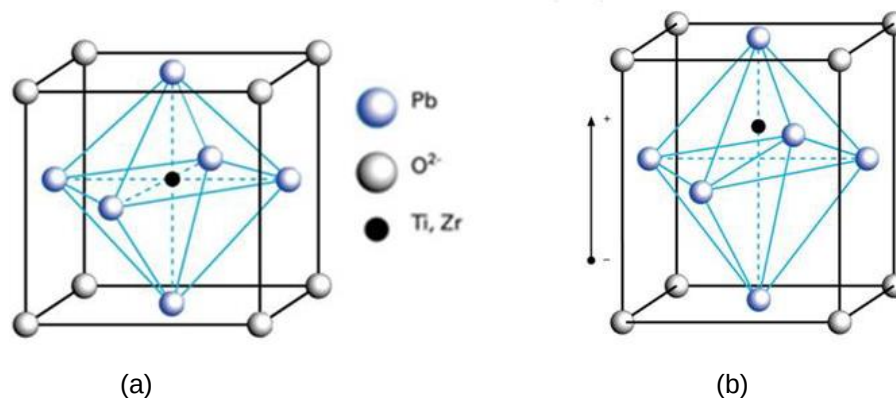
tamanhos devido ao seu processo de produção, que é a sinterização de pó cerâmico conformado via prensagem ou extrusão (VENET; PEREIRA, 2004).

Dentre os fatores desfavoráveis ao uso de cerâmica como material piezelétrico estão aqueles relacionados com à alta rigidez e baixa resiliência mecânica. Como alternativa são utilizados os polímeros PVDF em forma de finos filmes. Este material possibilita a formação de uma estrutura mais complexa e podem ser fixados em superfícies irregulares.

A aplicação do PVDF (Fluorido de Polivinilideno) tem aumentado na engenharia e isso se deve a fatores como: densidade específica baixa, flexibilidade, baixa impedância mecânica e acústica, entre outras. Porém também existem desvantagens: faixa de temperatura de operação limitada e estabilidade química baixa em ambientes extremos. Por estes fatores a combinação de cerâmicas e polímeros com propriedades piezelétricas é uma alternativa interessante e vem sendo amplamente utilizada na engenharia (MALMONGE, 2008).

As cerâmicas piezelétricas fazem parte de uma classe de dielétricos e não apresentam naturalmente propriedades piezelétricas. Para que as cerâmicas possam apresentar tais propriedades, primeiramente este material deve pertencer à classe dos ferroelétricos. Além disso, deve apresentar uma estrutura cristalina denominada perovkista (figura A2). Estas células passam a ter um momento dielétrico quando adquirem uma forma assimétrica (tetragonal ou romboédrica).

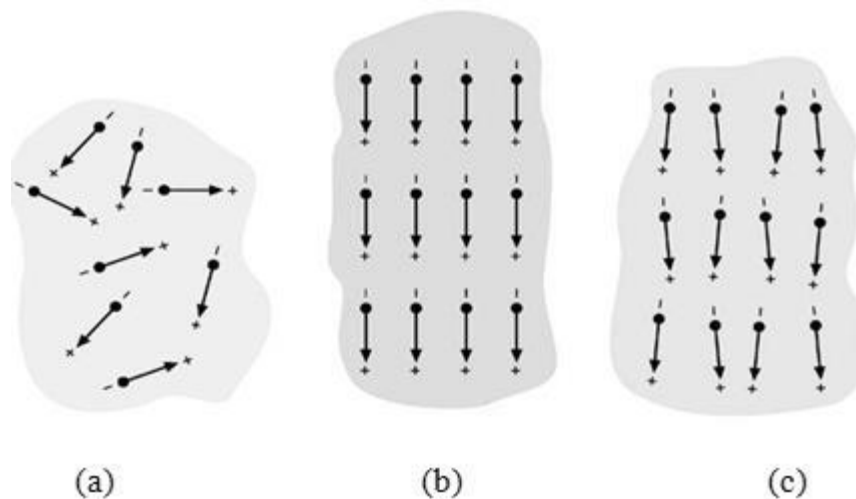
Figura A2 – Célula unitária de PZT: (a) Tipo perovskite Titanato de Chumbo (PZT), célula unitária no estado de simetria cúbica abaixo da temperatura de Curie. (b) célula unitária distorcida tetragonalmente acima da temperatura de Curie.



Fonte: Giurgiutiu (2008).

Devido a permanente assimetria elétrica e mecânica, estes tipos de células unitárias exibem deformação e polarização aleatórias. Grupos de células unitárias com a mesma orientação de polarização e deformação são chamados de domínios. Quando submetido a uma temperatura acima da Temperatura de Curie, a célula unitária do PZT apresenta uma estrutura cúbica isotrópica. Quando resfriada os domínios são modificados e devido a orientação aleatória dos mesmo o material não apresenta propriedades piezelétrica macroscópicas. Por causa da distribuição aleatória de orientação destes domínios no material cerâmico, um processo de polarização ferroelétrico é necessário para obter anisotropia macroscópica associada às propriedades piezelétricas. A figura A3 mostra a aleatoriedade dos domínios no PZT, onde o arranjo assimétrico dos íons positivos e negativos fornece o comportamento permanente de dipolo elétrico para os cristais. A figura A3b ilustra o material em um campo elétrico que é capaz de orientar o sentido dos íons (o que eleva a temperatura acima da Temperatura de Curie) fazendo com que o mesmo tenha expansão na direção do campo e contração na direção perpendicular. Após a aplicação do campo elétrico, os dipolos elétricos ficam direcionados, porém não alinhados, permitindo ao material uma polarização remanescente que pode ser degradada pelo excesso dos limites mecânico, elétrico e térmico do material.

Figura 3 – Dipolo elétrico nos domínios. (a) Cerâmica ferroelétrica não polarizada (sem aplicação de campo elétrico ou deformação), (b) durante a polarização e (c) após a polarização

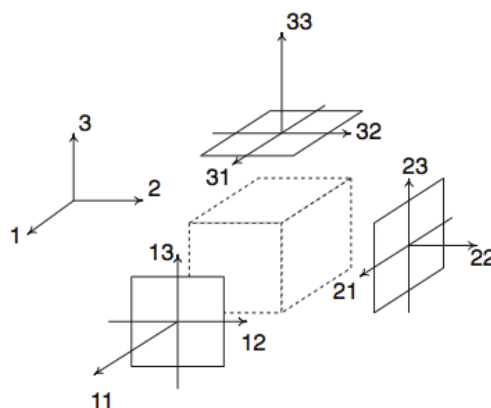


Fonte: Razzini (2015)

A.1. Equações Constitutivas

Usando a notação padrão IEE 176-1987 (LEO, 2007), que considera um cubo de material piezelétrico sem fazer proposições da direção na qual o campo elétrico é aplicado ou a direção na qual o material está produzindo tensão ou deformação, como mostrado na figura A4.

Figura A4 – Ilustração do cubo piezelétrico para análise tridimensional



Fonte: Leo (2007).

O campo elétrico que pode ser aplicado neste cubo é denominado por:

$$\bar{E} = \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (A1)$$

Também, a deformação causada pela eletricidade pode ocorrer em três direções distintas. O vetor deformação elétrica é dado por:

$$\bar{D} = \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} \quad (A2)$$

A relação geral entre estas variáveis é dada por:

$$D_1 = \varepsilon_{11}^T E_1 + \varepsilon_{12}^T E_2 + \varepsilon_{13}^T E_3 \quad (A3)$$

$$D_2 = \varepsilon_{21}^T E_1 + \varepsilon_{22}^T E_2 + \varepsilon_{23}^T E_3 \quad (A4)$$

$$D_3 = \varepsilon_{31}^T E_1 + \varepsilon_{32}^T E_2 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (A5)$$

Essas equações, se reduzidas, podem ser mostradas como:

$$D_m = \varepsilon_{mn}^T E_n \quad (A6)$$

Para um material linearmente elástico, pode-se relacionar a deformação à tensão com a expressão do tensor abaixo:

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} \quad (A7)$$

Onde o termo s_{ijkl}^E representa os 81 termos de compliança mecânica.

Agora, é necessário descrever as relações constitutivas que especifica o acoplamento entre variáveis elétricas e mecânicas. Nove estados de deslocamento são relacionados com os campos elétricos aplicados através da equação A8:

$$S_{ij} = d_{ijn} E_n \quad (A8)$$

A deformação elétrica é relacionada com a tensão mecânica pela equação A9:

$$D_m = d_{mkl} T_{kl} \quad (A9)$$

Combinando as equações A6, A7, A8 e A9 as equações constitutivas para um material piezelétrico linear podem ser definidas como:

$$S_{ij} = s_{ijkl} E T_{kl} + d_{ijn} E_n \quad (A10)$$

$$D_m = d_{mkl} T_{kl} + \varepsilon_{mn} E_n \quad (A11)$$

Onde S_{ij} é o tensor deformação (m/m), T_{kl} é o tensor de tensões (N/m²), E_n o campo elétrico (V/m; N/C), d_{mkl} a constante piezelétrica (C/m), D_m a deformação elétrica ou indução (C/m²), s_{ijkl} o tensor compliança (m²/N) e ε_{mn} a permissividade dielétrica (C²/Nm²).

O conjunto completo de equações são escritos em notação tensorial devido ao fato de que elas representam uma relação entre nove variáveis de campo mecânico (tensão/deformação) e três variáveis associadas às propriedades elétricas.

As equações constitutivas podem ser escritas em uma notação muito mais compacta, sendo:

$$S_i = s_{ij} E T_j + d_{ik} E_k \quad (A12)$$

$$D_m = d_{mj} T_j + \varepsilon_{mk} E_k \quad (A13)$$

onde i e j assumem valores entre 1 e 6, m e n assumem valores entre 1 e 3. Esta notação destaca que há apenas 36 constantes elástica independentes, 18 coeficientes de deformação piezelétrica e 9 valores de permissividade elétrica que caracterizam um material piezelétrico.

As equações A12 e A13 podem ser expandidas para a seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{A14})$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{A15})$$

Para cerâmicas polarizadas ao longo do eixo 3, temos que (Leo, 2007):

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{13} \\ 0 & 0 & d_{23} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{42} & 0 \\ d_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{A16})$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{A17})$$