

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

PAULO DAMBROS MENIN

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE
ESTRUTURAL POR ONDAS GUIADAS PARA TANQUES DE UNIDADES FPSO**

Porto Alegre

2022

PAULO DAMBROS MENIN

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE
ESTRUTURAL POR ONDAS GUIADAS PARA TANQUES DE UNIDADES FPSO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitor: Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Carla Schwengber ten Caten

Vice-diretor: Afonso Reguly

Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGE3M

Coordenador: Afonso Reguly

Coordenador substituto: Andréa Moura Bernardes

Menin, Paulo Dambros

Desenvolvimento de Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural por Ondas Guiadas para tanques de unidades FPSO / Paulo Dambros Menin. – 2022.

163 f.:il.

Orientador: Thomas Gabriel Rosauro Clarke.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. FPSO. 2. Monitoramento de Integridade Estrutural. 3. Ondas Guiadas. 4. Algoritmos de Imagem. I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauro, orient.

PAULO DAMBROS MENIN

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE
ESTRUTURAL POR ONDAS GUIADAS PARA TANQUES DE UNIDADES FPSO**

Esta Tese foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

Prof. Dr. Afonso Reguly

BANCA EXAMINADORA

Dr. Fernando Dotta – EMBRAER S.A. – São José dos Campos, Brasil

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz – UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Dr. Lúcio de Abreu Corrêa – UFRGS – Porto Alegre, Brasil

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao orientador do presente trabalho Professor Thomas Clarke, que me disponibilizou a oportunidade de desenvolver esta pesquisa, pelos conselhos e suporte prestados durante todo este período.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aos professores do programa de pós-graduação PPGE3M pelo ensino público e de qualidade.

Aos colegas do Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF, pelo companheirismo, amizade e auxílio em variadas atividades.

A todos os colegas do grupo GEND que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa. Agradeço especialmente ao Evandro, que esteve trabalhando junto comigo durante todo o desenvolvimento do projeto que originou o presente trabalho e desempenhou papel fundamental em diversas atividades que foram realizadas, e ao Lúcio, que acompanhou de perto a reta final de minha pesquisa e muito contribuiu com seus conselhos, incentivos e suporte técnico altamente qualificado.

Agradeço por fim à minha família, meus pais, meus irmãos e minha namorada, por todo o apoio e incentivo para concluir mais esta grande etapa e por fazerem parte de minha vida.

RESUMO

Um sistema de monitoramento por ondas guiadas para tanques de cargas de unidades FPSO (*floating production storage and offloading*) foi projetado e testado em um painel representativo de uma região desta estrutura. Inicialmente, foram realizados estudos para definir o melhor modelo de transdutor e condições de operação para utilização neste tipo de estrutura. Em seguida, foi instalado um arranjo de transdutores no painel de teste, onde sinais de base desta estrutura em estado íntegro foram adquiridos dentro de um intervalo representativo de temperaturas. Após a usinagem de defeitos com dimensões controladas no painel, sinais foram adquiridos e então processados com os algoritmos OBS (*optimal baseline subtraction*), OS (*optimal stretch*) e PSC (*phase-shift compensation*). O algoritmo de imagem DAS (*delay-and-sum*) foi aplicado aos sinais residuais para avaliar a capacidade de localização dos defeitos pelo sistema. Dois índices de dano distintos foram gerados a partir dos resultados de imagem para verificar a capacidade de detecção dos defeitos pelo sistema. As imagens obtidas foram então pós-processadas através de três diferentes métodos, um baseado em uma abordagem probabilística, outro em decomposição em valores singulares (SVD), e o terceiro sendo uma combinação dos outros dois métodos. O ganho obtido na relação sinal-ruído (SNR) através da aplicação das estratégias de pós-processamento foi calculado e comparado com as imagens originais. Os resultados demonstraram que o sistema é capaz de detectar perdas de espessura localizadas e de indicar sua correta posição para danos maiores de 20% de perda de espessura de parede. Os resultados também mostraram que os métodos de pós-processamento aplicados melhoraram a relação sinal-ruído das imagens, levando a ganhos maiores de 15 dB para a relação entre a indicação do defeito e artefatos.

Palavras-chave: FPSO, Monitoramento de Integridade Estrutural, Ondas Guiadas, Algoritmos de Imagem.

ABSTRACT

A guided wave monitoring system for storage tanks of floating production storage and offloading (FPSO) units was projected and tested on a panel which is representative of a region of such structures. Initially, studies were performed to define the best type of transducer and operation conditions to be used in this kind of structure. Then, an array of transducers was installed in such structure, where baseline signals of the undamaged structure were acquired within a representative temperature range. After the machining of controlled defects on the panel, signals were acquired and subsequently processed with the optimal baseline subtraction (OBS), optimal stretch (OS) and phase-shift compensation (PSC) algorithms. A delay-and-sum (DAS) image algorithm was then applied to the residual signals in order to evaluate the defect localization capabilities of the system. Two distinct damage indexes were generated from the resulting images in order to verify the detection capability of the system. The images were then post-processed with three different methods, one based on a probabilistic approach, another on singular value decomposition (SVD), and the third with a combination of these two methods. The signal-to-noise ratio (SNR) gain obtained by applying the post-processing strategies was calculated and compared to the original images. Results demonstrate that the system is capable of detecting localized wall loss and indicating its correct position for damage larger than 20% wall thickness loss. Results also show that the post-processing methods helped to improve the SNR, leading to gains of more than 15dB in damage to artifact amplitude ratios.

Keywords: FPSO, Structural Health Monitoring, Guided Waves, Imaging Algorithms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Seção transversal típica do casco de uma unidade FPSO	21
Figura 2 – Plataforma FPSO Petrobras P-68 em fabricação – Estaleiro Jurong – Aracruz (ES)	25
Figura 3 – Curvas de dispersão para os modos de Ondas de Lamb para uma chapa de 1mm de espessura. (a) Número de onda. (b) Velocidade de Fase. (c) Velocidade de Grupo.	33
Figura 4 – Curvas de dispersão para os modos SH para uma chapa de 1mm de espessura. (a) Número de onda. (b) Velocidade de Fase. (c) Velocidade de Grupo.	35
Figura 5 – Formato de deslocamentos dos Modos Fundamentais. (a) A_0 . (b) S_0 . (c) SH_0	35
Figura 6 – Arranjo de sensores esparsos de ondas guiadas. Exemplo com um transdutor emitindo no canto superior esquerdo e os demais operando como receptores.	40
Figura 7 – Modelo numérico para avaliação de índices de transmissão e reflexão. (a) Chapa plana contendo perfil bulbo. (b) Detalhe de seção do perfil bulbo HP400x12.	52
Figura 8 – Modelo numérico para avaliação da interação dos modos fundamentais com um defeito de perda de espessura.	54
Figura 9 – Defeitos de perda de espessura testados para interação dos modos. (a) Perda de 20% de parede. (b) Perda de 40% de parede. (c) Perda de 60% de parede.	55
Figura 10 – Cerâmica piezoelétrica. (a) Não deformada. (b) Deformada quando submetida à campo elétrico uniforme.	56
Figura 11 – Disposição dos principais componentes do transdutor.	57
Figura 12 – Conjunto completo do transdutor. (a) Invólucro de proteção em ABS.	58
Figura 13 – Sensores acoplados à chapa de 16,5mm.	59
Figura 14 – Equipamentos utilizados para o ensaio. (a) Sistema de geração e aquisição de sinais. (b) Fonte amplificadora. (c) Módulos de controle dos vibrômetros. (d) Par de vibrômetros em ângulo de 30°.	60
Figura 15 – Diagrama de configuração do procedimento experimental	61
Figura 16 – Desenho esquemático do painel e seus reforços estruturais. Dimensões em [mm].	63
Figura 17 – Corpo de prova construído.	64
Figura 18 – Disposição dos transdutores instalados no corpo de prova. Dimensões em [mm].	65
Figura 19 – Sensores instalados no corpo de prova. (a) Invólucro fechado. (b) Sensores em operação.	66

Figura 20 – Defeitos introduzidos no corpo de prova. (a) Defeito 1. (b) Defeito 2.	67
Figura 21 – Equipamentos utilizados para ensaio no corpo de prova.	69
Figura 22 – Etapas do procedimento de mudança na distribuição de probabilidade da imagem.	73
Figura 23 – Etapas do procedimento de reconstrução da imagem utilizando SVD.	74
Figura 24 – Modelo numérico para avaliação de índices de transmissão e reflexão. (a) Chapa plana contendo perfil bulbo. (b) Detalhe de seção do perfil bulbo HP400x12.	76
Figura 25 – Interação do modo A_0 com o perfil bulbo em função do ângulo de incidência e frequência de excitação. (a) Índice de Transmissão. (b) Índice de reflexão.	77
Figura 26 – Interação do modo S_0 com o perfil bulbo em função do ângulo de incidência e frequência de excitação. (a) Índice de Transmissão. (b) Índice de reflexão.	78
Figura 27 – Interação do modo SH_0 com o perfil bulbo em função do ângulo de incidência e frequência de excitação. (a) Índice de Transmissão. (b) Índice de reflexão.	78
Figura 28 – Interação do modo SH_0 emitido a 45kHz com o defeito de 20% de perda de espessura. (a) Magnitude dos deslocamentos. (b) Relação $f \times k$ apresentada pela FFT2D na direção avaliada.	79
Figura 29 – Padrão de espalhamento do modo SH_0 à 45kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.	80
Figura 30 – Padrão de espalhamento do modo SH_0 à 75kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.	81
Figura 31 – Padrão de espalhamento do modo S_0 à 45kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.	82
Figura 32 – Padrão de espalhamento do modo S_0 à 75kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.	82
Figura 33 – Padrão de espalhamento do modo A_0 à 45kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.	83
Figura 34 – Padrão de espalhamento do modo A_0 à 75kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.	84
Figura 35 – Padrão de espalhamento do modo A_0 para 40% de perda de espessura. (a) Emissão a 45kHz. (b) Emissão a 75kHz.	84
Figura 36 – Curvas de Dispersão para uma chapa de aço carbono de 20mm de espessura. ..	85
Figura 37 – Relação $f \times k$ apresentada pela FFT2D dos deslocamentos na direção transversal no plano da chapa.	90

Figura 38 – Relação $f \times k$ apresentada pela FFT2D dos deslocamentos na direção longitudinal no plano da chapa.	90
Figura 39 – Relação $f \times k$ apresentada pela FFT2D dos deslocamentos fora do plano da chapa.	91
Figura 40 – Sinais adquiridos em emissão a 35kHz. (a) Escala em Volts. (b) Escala em dB..	92
Figura 41 – Sinais adquiridos em emissão a 65kHz. (a) Escala em Volts. (b) Escala em dB..	93
Figura 42 – Relação entre os modos SH_0 e A_0 emitidos pelo transdutor.	94
Figura 43 – Curva de decaimento da amplitude do modo SH_0 em 50kHz . (a) Primeira frente de onda medida pelos vibrômetros. (b) Curva de ajuste ao decaimento da amplitude dos picos em função da distância percorrida.	94
Figura 44 – Curva de decaimento da amplitude de recepção do modo SH_0 pelo transdutor. (a) Emissão de sinal a 50kHz. (b) Emissão de sinal a 60kHz.	95
Figura 45 – Projeção da distância percorrida pela frente de onda do modo SH_0 até atingir nível de -47dB de amplitude do sinal.	96
Figura 46 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Arranjo 1.	97
Figura 47 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Arranjo 2.	98
Figura 48 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Arranjo 3.	98
Figura 49 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Emissão: 35kHz.	100
Figura 50 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Emissão: 50kHz.	101
Figura 51 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Emissão: 55kHz.	101
Figura 52 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Emissão: 75kHz.	102
Figura 53 – Resultado DAS para corpo de prova íntegro com 0% de perda de espessura.	103
Figura 54 – Resultado DAS para Defeito 1 com 10% de perda de espessura.	104
Figura 55 – Resultado DAS para Defeito 1 com 20% de perda de espessura.	104
Figura 56 – Resultado DAS para Defeito 1 com 30% de perda de espessura.	105
Figura 57 – Resultado DAS para Defeito 1 com 40% de perda de espessura.	105
Figura 58 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.	106
Figura 59 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (10%) de perda de espessura.	107
Figura 60 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (20%) de perda de espessura.	107
Figura 61 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (30%) de perda de espessura.	108

Figura 62 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (40%) de perda de espessura.	108
Figura 63 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (50%) de perda de espessura.	109
Figura 64 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (60%) de perda de espessura.	109
Figura 65 – Índices de Dano (ID) calculados, considerando o corpo de prova íntegro e as perdas de espessura de parede geradas para o Defeito 1 e para o Defeito 2.	110
Figura 66 – Mudança na Função Distribuição de Probabilidade da imagem. Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Imagem original. (b) Histograma da função distribuição de probabilidade da imagem original. (c) Imagem com distribuição Gama modificada. (d) Histograma da função distribuição de probabilidade da imagem modificada.	112
Figura 67 – Distância do defeito dos 10% maiores pixels da imagem. Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Pixels da imagem original. (b) Pixels da imagem com distribuição Gama modificada.	113
Figura 68 – Testes com fator de forma e escala alterados. Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Fator de forma com valor 1. (b) Fator de escala com valor 1.	114
Figura 69 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para corpo de prova íntegro com 0% de perda de espessura.	115
Figura 70 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 10% de perda de espessura.	115
Figura 71 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 20% de perda de espessura.	116
Figura 72 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 30% de perda de espessura.	116
Figura 73 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 40% de perda de espessura.	117
Figura 74 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.	117
Figura 75 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(10%) de perda de espessura.	118
Figura 76 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(20%) de perda de espessura.	119
Figura 77 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(30%) de perda de espessura.	119

Figura 78 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(40%)de perda de espessura.	120
Figura 79 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(50%)de perda de espessura.	120
Figura 80 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(60%) de perda de espessura.	121
Figura 81 – Imagens reconstruídas com aplicação de SVD utilizando um componente único – Exemplo para resultado do Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Componente 1. (b) Componente 2. (c) Componente 3. (d) Componente 4.	122
Figura 82 – Aplicação da reconstrução SVD na imagem – Exemplo para resultado do Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Reconstrução utilizando os 4 primeiros componentes singulares. (b) Reconstrução utilizando o somatório dos componentes 5 ao 150.	123
Figura 83 – Distância do defeito dos 10% maiores pixels da imagem após a reconstrução utilizando SVD. Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.	123
Figura 84 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para corpo de prova íntegro com 0% de perda de espessura.	124
Figura 85 – Resultado mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 10% de perda de espessura.	124
Figura 86 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 20% de perda de espessura.	125
Figura 87 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 30% de perda de espessura.	125
Figura 88 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 40% de perda de espessura.	126
Figura 89 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.	126
Figura 90 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(10%) de perda de espessura.	127
Figura 91 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(20%) de perda de espessura.	128
Figura 92 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(30%) de perda de espessura.	128
Figura 93 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(40%)de perda de espessura.	129

Figura 94 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(50%)de perda de espessura.	129
Figura 95 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(60%) de perda de espessura.	130
Figura 96 – Aplicação do método de pós-processamento com estratégias combinadas – Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Imagem resultante. (b) Distância do defeito dos 10% maiores pixels da imagem.	131
Figura 97 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para corpo de prova íntegro com 0% de perda de espessura.	132
Figura 98 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 10% de perda de espessura.	132
Figura 99 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 20% de perda de espessura.	133
Figura 100 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 30% de perda de espessura.	133
Figura 101 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 40% de perda de espessura.	134
Figura 102 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.	134
Figura 103 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60%(10%) de perda de espessura.	135
Figura 104 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60%(20%) de perda de espessura.	135
Figura 105 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60%(30%) de perda de espessura.	136
Figura 106 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60%(40%)de perda de espessura.	136
Figura 107 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60%(50%)de perda de espessura.	137
Figura 108 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60%(60%) de perda de espessura.	137
Figura 109 – Processamento utilizando conjunto de dez transdutores – Exemplo para Defeito 1 com 20% de perda de espessura. (a) Imagem original do algoritmo DAS. (b) Imagem resultante do pós-processamento.	139

Figura 110 – Processamento utilizando conjunto de dez transdutores – Exemplo para Defeito 2 com 60%(50%) de perda de espessura. (a) Imagem original do algoritmo DAS. (b) Imagem resultante do pós-processamento.	140
Figura 111 – Relação Sinal-Ruído (SNR) para cada resultado de processamento de imagem.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas dos transdutores instalados no corpo de prova	65
Tabela 2 – Profundidades dos defeitos 1 e 2 para cada etapa do experimento.....	67
Tabela 3 – Número de ciclos do sinal <i>Toneburst</i> para cada frequência de emissão.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

END	Ensaaios não destrutivos
SH ₀	Modo <i>Shear Horizontal</i> 0
S ₀	Modo Simétrico 0
A ₀	Modo Antissimétrico 0
Ondas P	Ondas Primárias
Ondas S	Ondas Secundárias
Ondas SV	Ondas <i>Shear Vertical</i>
Ondas SH	Ondas <i>Shear Horizontal</i>
Modo S	Modos de propagação Simétricos
Modo A	Modos de propagação Antissimétricos
PZT	Zirconato-titanato de chumbo
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ABS	<i>American Bureau of Shipping</i>
FR-4	Laminado de Cobre com Fibra de Vidro e Epóxi
ABS (material)	Acrilonitrila butadieno estireno
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
ID	Índice de Dano
RAPID	<i>Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Defects</i>
DAS	<i>Delay-and-Sum</i>
MV	<i>Minimum Variance</i>
OBS	<i>Optimal Baseline Selection</i>
BSS	<i>Baseline Signal Stretch</i>
PSC	<i>Phase Shift Compensation</i>
FDA	Função Distribuição Acumulada
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

c_1	Velocidade de propagação ondas P
c_2	Velocidade de propagação ondas S
\bar{u}	Vetor de deslocamento tridimensional
λ_L	Primeira constante de Lamé
μ_L	Segunda constante de Lamé
ρ	Massa específica
∇^2	Operador de Laplace tridimensional
ϕ	Campo escalar
Φ	Vetor campo potencial
z	Coordenada espacial da onda
A	Constante de amplitude da onda
t	Tempo
b	Espessura da placa
k	Número de onda na direção de propagação da onda guiada
k_{tl}	Componente do número de onda relativo à onda longitudinal
k_{ts}	Componente do número de onda relativo à onda transversal
ω	Frequência angular
n	Número da ordem do modo de propagação da onda guiada
c_p	Velocidade de fase do modo de propagação
c_g	Velocidade de grupo do modo de propagação
λ	Comprimento de Onda
$\{T\}$	Vetor de tensões

$\{D\}$	Vetor de deslocamentos elétricos
$\{S\}$	Vetor de deformações
$\{E\}$	Vetor de campo elétrico
$[e]$	Matriz de constantes piezoelétricas – tensão mecânica/campo elétrico
$[d]$	Matriz de constantes piezoelétricas – deformação mecânica/campo elétrico
$[\varepsilon^S]$	Matriz de constantes dielétricas com deformações constantes
$[\varepsilon^T]$	Matriz de constantes dielétricas com tensões constantes
$[C^E]$	Matriz de rigidez com campo elétrico constante
$[s^E]$	Matriz de flexibilidade com campo elétrico constante
$r_{i,j}(t)$	Envelope do sinal residual da subtração medido pelo par de sensores i, j
$u_{i,j}(t)$	Sinal residual da subtração medido pelo par de sensores i, j
H	Operador da Transformada de Hilbert
I^{DAS}	Amplitude da imagem gerada pelo algoritmo DAS
I^{HIP}	Amplitude da imagem gerada pelo algoritmo da hipérbole
N_p	Número de pares de transdutores
$\Delta t_{i,j}$	Diferença no tempo de chegada para dois receptores i, j
$b_n(t)$	Sinal de base original
$\hat{b}_n(t)$	Sinal de base modificado pelo fator β
β	Fator de multiplicação para contrair ou expandir o sinal em função do tempo
$\hat{\Phi}$	Variável aleatória
$f_{\hat{\Phi}}$	Função densidade de probabilidade de variável aleatória
$F_{\hat{\Phi}}$	Função distribuição acumulada de variável aleatória

$\gamma(\hat{k}, \frac{x}{\theta})$	Função Gama incompleta inferior
$\Gamma(\hat{k})$	Função Gama
\hat{k}	Parâmetro de forma da função Gama
θ	Parâmetro de escala da função Gama
M	Matriz de imagem de dimensões $m \times n$
U	Matriz unitária de dimensões $m \times m$
Σ	Matriz retangular diagonal $m \times n$
V	Matriz unitária de dimensões $n \times n$
α	Fator alfa para amortecimento de Rayleigh
K	Constante K para definição de α
P	Constante P para definição de α
n^{ABS}	Número da linha da zona de absorção do modelo numérico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Inspeção e Monitoramento de unidades FPSO.....	24
2.2	Monitoramento de Integridade Estrutural.....	27
2.3	Ondas Guiadas	29
2.4	Transdutores Piezoelétricos	36
2.5	Técnicas de detecção de defeitos em estruturas planas utilizando Ondas Guiadas..	39
2.5.1	Algoritmos de imagem	41
2.5.2	Compensação de temperatura e efeitos ambientais	45
2.6	Técnicas de Reconstrução de Imagens	47
2.6.1	Alteração da função distribuição de probabilidade de uma imagem.....	47
2.6.2	Reconstrução da imagem através da decomposição em valores singulares	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1	Seleção e Caracterização do Sistema de Transdução	50
3.1.1	Interação dos Modos Fundamentais com Elementos Estruturais	50
3.1.2	Interação dos Modos Fundamentais com Perda de Espessura	53
3.1.3	Descrição do Transdutor Utilizado.....	56
3.1.4	Avaliação do Transdutor – Modos Emitidos e Relação de Amplitudes.....	58
3.1.5	Avaliação de Atenuação e Alcance do Sinal	61
3.2	Estudo de Caso – Teste em Estrutura em Escala Real	62
3.2.1	Corpo de prova em escala real.....	63
3.2.2	Instrumentação do corpo de prova – Arranjo de Transdutores	64
3.2.3	Defeitos introduzidos no corpo de provas	66
3.2.4	Medições realizadas no corpo de prova.....	68
3.2.5	Processamento dos sinais e algoritmos aplicados para geração de resultados	70

3.3	Estratégias para Pós-Processamento dos Resultados de Imagem.....	71
3.3.1	Modificação da distribuição probabilística da imagem.....	71
3.3.2	Reconstrução da imagem utilizando SVD.....	73
3.3.3	Combinação de Métodos e Avaliação de Ganhos	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1	Seleção e Caracterização do Sistema de Transdução	76
4.1.1	Interação dos Modos Fundamentais com Elementos Estruturais	76
4.1.2	Interação dos Modos Fundamentais com Perda de Espessura	79
4.1.3	Seleção de Transdutor Adequado	86
4.1.4	Avaliação do Transdutor – Modos Emitidos e Relação de Amplitudes.....	89
4.1.5	Avaliação de Atenuação e Alcance do Sinal	94
4.2	Testes em Estrutura em Escala Real.....	96
4.2.1	Avaliação do arranjo de transdutores	97
4.2.2	Avaliação da frequência de operação	99
4.2.3	Localização de Defeitos através do Algoritmo DAS.....	103
4.2.4	Detecção dos defeitos através de Índices de Dano	110
4.3	Aplicação de Pós-Processamento nos Resultados de Imagem	111
4.3.1	Modificação da mudança probabilística da imagem	112
4.3.2	Reconstrução da imagem utilizando SVD.....	121
4.3.3	Combinação de Estratégias.....	130
4.3.4	Avaliação dos Níveis de Sinal Ruído	140
5	CONCLUSÕES	142
6	TRABALHOS FUTUROS	143
	REFERÊNCIAS.....	144
	APENDICE A – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO SH_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 20% DE PERDA DE ESPESSURA.....	153
	APENDICE B – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO SH_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 40% DE PERDA DE ESPESSURA.....	154

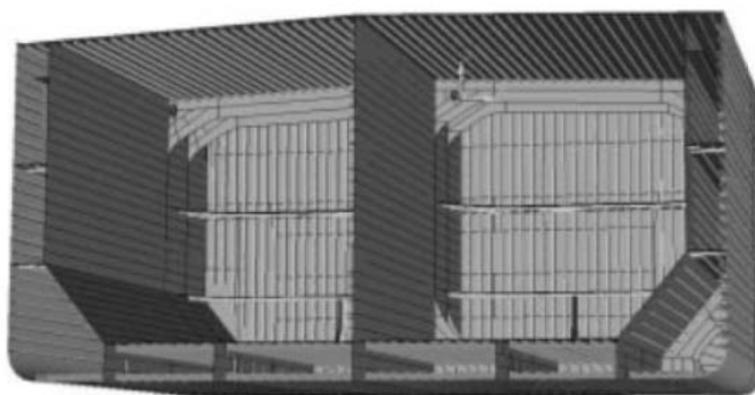
APENDICE C – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO SH_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 60% DE PERDA DE ESPESSURA.....	155
APENDICE D – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO S_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 20% DE PERDA DE ESPESSURA.....	156
APENDICE E – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO S_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 40% DE PERDA DE ESPESSURA.....	157
APENDICE F – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO S_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 60% DE PERDA DE ESPESSURA.....	158
APENDICE G – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO A_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 20% DE PERDA DE ESPESSURA.....	159
APENDICE H – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO A_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 40% DE PERDA DE ESPESSURA.....	160
APENDICE I – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO A_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 60% DE PERDA DE ESPESSURA.....	161

1 INTRODUÇÃO

O crescente número de unidades FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) em uso na indústria de óleo e gás ao longo da última década trouxe desafios para os operadores deste tipo de plataforma, os quais se depararam com a alta complexidade de manter a integridade estrutural destes ativos. Comparando-se com plataformas tradicionais, unidades FPSO possuem a função adicional de estocar o óleo e subprodutos corrosivos do processo de extração em seus tanques. Este aspecto impõe importantes restrições operacionais relacionadas a atividades de inspeção e reparo dos tanques de carga e tanques de lastro da embarcação (BIASOTTO, ROUHAN, 2004; DUGGAL et al., 2017).

O casco de uma unidade FPSO pode ser considerado como um dos principais componentes que exige inspeções e monitoramento, pois o estado do mesmo é um indicativo da vida útil remanescente da estrutura. Na Figura 1 é apresentada uma seção típica do casco de uma unidade FPSO, onde são indicadas as regiões dos tanques de água de lastro e tanques de carga. Diferentemente dos navios petroleiros, onde inspeções e reparos dos tanques de carga são realizados com a embarcação docada, nas unidades FPSO estas inspeções e reparos devem ser feitos durante a operação da plataforma, no local onde a mesma estiver operando (BIASOTTO, ROUHAN, 2004).

Figura 1 – Seção transversal típica do casco de uma unidade FPSO



Fonte: WANG, SARRATELLA, KALGHATGI, 2008.

O gerenciamento da integridade estrutural do casco de grande parte das plataformas FPSO é baseado em risco, com inspeções planejadas de acordo com regulações de sociedades classificadoras (DUGGAL et al., 2017). Entretanto, técnicas alternativas de inspeção e de monitoramento estão sempre sendo estudadas para se desenvolver maneiras mais eficientes e seguras de se gerir a integridade do casco. Entre os pontos que ainda podem ser melhorados está a diminuição (ou mesmo a eliminação) da entrada de operadores dentro de tanques de carga ou de lastro. Este tipo de procedimento envolve operações perigosas, que levam tempo para serem realizadas e são caras como, por exemplo, o esvaziamento e limpeza dos tanques de carga anteriormente ao trabalho de inspeção (CALDWELL, 2017). Tais operações envolvem riscos para inspetores como trabalho em altura e trabalho em espaço confinado.

Para evitar os riscos citados, técnicas de inspeção remota vêm sendo testadas e desenvolvidas (CALDWELL, 2017; HUANG, 2017; POGGI et al., 2020), no entanto, muitas das técnicas testadas necessitam de uma abertura e limpeza dos tanques para operar de forma satisfatória. Somado a isso, algumas delas não são capazes de avaliar os níveis de perda de espessura nas paredes do casco, enquanto que outras apresentam dificuldades em lidar com a natureza da estrutura interna do casco, a qual é composta por grandes perfis estruturais soldados e geometrias complexas. Além disto, tais geometrias variam conforme o modelo e região do casco em análise, tornando um procedimento geral de inspeção muito difícil de obtido.

Uma alternativa a estes métodos é a utilização de um sistema baseado em ondas guiadas, técnica que atualmente já se encontra em uso em distintas aplicações de monitoramento de integridade estrutural. Estudos com a utilização de ondas guiadas já foram realizados para o monitoramento da integridade de pontes (PARK et al., 2006), fuselagem de aeronaves (ZHAO et al., 2007), dutos (ALLEYNE et al., 2001), estruturas planas com elementos complexos (CLARKE, 2009), entre outras (MITRA, GOPALAKRISHNAN, 2016). Um sistema de ondas guiadas é baseado na emissão de uma onda elástica, a qual se propaga ao longo da estrutura de interesse inspecionando uma região específica da mesma. Para uma estrutura plana, como as paredes ou anteparas do casco de uma unidade FPSO, um sistema de ondas guiadas pode ser instalado através de um arranjo de sensores esparsos de maneira a inspecionar uma extensa área da estrutura.

Dentro de um tanque de uma unidade FPSO podem ocorrer diferentes tipos de falhas, dependendo da posição e método de proteção para corrosão utilizado. Corrosões generalizadas ou localizadas com a presença de perdas de espessura ocorrem mais

frequentemente em estruturas do tipo chapa e próximas da conexão de reforços estruturais. Pitting localizado pode ocorrer em chapas planas pintadas (RIZZO et al., 2007; RIZZO, 2008), enquanto que trincas aparecem mais frequentemente em pontos com concentração de tensões. A motivação para o desenvolvimento de um sistema de ondas guiadas para este tipo de estrutura ocorre com o intuito de avaliar a integridade estrutural das paredes do tanque de um FPSO sem a necessidade prévia de uma parada operacional completa, com esvaziamento e limpeza dos tanques, envolvendo riscos e custos adicionais.

O presente trabalho tem como primeiro objetivo o desenvolvimento e teste de um sistema de monitoramento de integridade estrutural por ondas guiadas para tanques de unidades FPSO. O foco deste sistema será a detecção e localização de perdas de espessura localizadas nas paredes dos tanques de carga e lastro das unidades FPSO, as quais podem ser geradas a partir de efeitos de corrosão. A detecção e localização se dará a partir do processamento dos sinais emitidos e recebido pelos transdutores do sistema, utilizando-se algoritmos de localização e índices de dano.

O segundo objetivo do trabalho é aplicar métodos de pós-processamento dos resultados de imagem utilizados para localização dos defeitos, de maneira a gerar imagens mais nítidas e melhorar a interpretação dos resultados. Desta forma, busca-se obter uma redução de artefatos indesejados presentes nos resultados de imagem e aumentar a relação sinal-ruído entre a indicação de defeitos e artefatos oriundos de reflexões benignas da estrutura.

A organização deste trabalho segue a seguinte estrutura: após a introdução, é realizada no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica dos assuntos abordados no trabalho, tratando de aspectos sobre monitoramento de integridade estrutural, inspeções de unidades FPSO, ondas guiadas, transdutores piezoelétricos e técnicas de detecção e localização de defeitos utilizando ondas guiadas. No Capítulo 3 é detalhada a metodologia aplicada, a qual é dividida em três partes distintas: na primeira parte são descritos os procedimentos e testes realizados para a seleção e caracterização do sistema de transdução, na segunda parte são apresentados os detalhes do experimento em escala real realizado em um painel simulando parte da estrutura do tanque de um FPSO para o teste deste sistema e na terceira parte é apresentada a metodologia utilizada para o pós-processamento dos resultados de imagem obtidos. Os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 4, e são organizados de acordo com cada parte da metodologia descrita. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são abordados e revisados os principais temas envolvidos no trabalho. A presente revisão contextualiza a respeito das técnicas empregadas no monitoramento e inspeção de tanques de unidades FPSO, descreve fundamentos sobre avaliação de integridade estrutural, introduz conceitos fundamentais para o entendimento de técnicas com ondas guiadas, descreve as formas de transdução empregadas para a utilização de ondas guiadas em ensaios não-destrutivos e apresenta algoritmos para detecção de defeitos utilizando ondas guiadas e suas principais características. Por fim, são apresentadas duas técnicas de reconstrução de imagem que podem ser empregadas para melhorar resultados de localização de defeitos.

2.1 Inspeção e Monitoramento de unidades FPSO

Os FPSO's consistem em plataformas flutuantes de produção que possuem a capacidade de produzir e armazenar petróleo bruto e gás, bem como realizar a transferência do óleo para navios aliviadores. Estas unidades são divididas em duas partes principais: o convés principal e o casco (HWANG, ROH, LEE, 2009). Sobre o convés principal encontram-se os módulos de produção, de geração de energia, de separação de água e óleo, o alojamento, o heliponto e demais subsistemas da plataforma de produção. A principal função do casco é armazenar o óleo bruto produzido.

A construção de um FPSO é realizada tradicionalmente a partir de navios petroleiros adaptados, de maneira que as adequações realizadas são planejadas para uma vida útil de no mínimo mais 25 anos (FARIAS, 2010). Na Figura 2 pode ser vista uma unidade FPSO docada em estaleiro, em processo de fabricação a partir de uma antiga unidade de navio petroleiro. O gerenciamento da integridade estrutural deste tipo de plataforma é realizado tipicamente pela indústria *offshore* de óleo e gás através de análises de risco, onde as inspeções do casco são definidas através de regras, regulações e procedimentos previstos por Sociedades Classificadoras (CALDWELL, 2017).

Figura 2 – Plataforma FPSO Petrobras P-68 em fabricação – Estaleiro Jurong – Aracruz (ES)



Fonte: Acervo Pessoal, 2022.

Devido à similaridade de suas estruturas, os procedimentos definidos tradicionalmente para inspeções em FPSO's são baseados em procedimentos típicos de navios petroleiros. Tais inspeções são tipicamente feitas em regiões de mais fácil acesso ao vistoriador e raramente são realizadas em regiões altas ou de difícil acesso (FARIAS, 2010). Os intervalos entre inspeções são realizados de maneira anual ou quinquenal, dependendo do tipo de inspeção e região a ser inspecionada.

A inspeção dos tanques de unidades FPSO envolvem riscos como trabalho em altura e trabalho em espaço confinado, por estes motivos, são tomadas diversas medidas de segurança para a realização deste serviço nestes espaços (CALDWELL, 2017). De maneira geral, a inspeção de um tanque de carga envolve as seguintes etapas: esvaziamento do tanque, lavagem com óleo e com água, isolamento das válvulas, ventilação do tanque, abertura do tanque, organização de acesso por cordas, limpeza manual de resíduos de hidrocarbonetos, instalação de luzes em todos os níveis, realização da inspeção, remoção de todos os itens instalados, inertização do tanque e retorno ao serviço. Todas estas operações envolvem um tempo de aproximadamente seis semanas para a inspeção de dois tanques, e necessitam de pelo menos seis pessoas adicionais a bordo. A inspeção realizada tipicamente durante a

abertura dos tanques é visual. Medições de pontos de espessura do casco por ultrassom também são frequentemente realizadas durante a abertura do tanque. Técnicas de inspeção alternativas são consideradas em casos onde se faz necessário investigar localmente algum defeito identificado, como por trincas, onde podem ser utilizadas técnicas como líquidos penetrantes ou partículas magnéticas (RIZZO, 2008).

Diferentes tipos de dano podem estar presentes dentro de um tanque de carga de uma unidade FPSO. Alguns exemplos de dano que podem ser encontrados são trincas, corrosão substancial, corrosão severa, corrosão por pontos (*pitting*), desgaste, falhas na proteção e amassamentos. Em um levantamento realizado por (FARIAS, 2010) em 124 tanques de 5 unidades FPSO operando na Bacia de Campos na costa brasileira, foram identificados os principais tipos de danos presentes nos tanques, identificados durante as aberturas para inspeção. Neste estudo, foi verificado que 48% dos danos identificados correspondem a danos de corrosão, 44% correspondem à trincas e os demais são referentes à outros tipos de danos. Entre os danos por corrosão, as maiores ocorrências correspondem à corrosão severa e corrosão substancial, as quais ocorrem geralmente em chapas de anteparas, em longarinas longitudinais e elementos da caverna. A corrosão por *pitting* também ocorre, esta mais frequentemente em superfícies pintadas (RIZZO et al., 2007), como na região do fundo do tanque.

A proteção contra corrosão nos tanques de água de lastro e tanques de carga é feita através da utilização de revestimento a base de epóxi e em algumas regiões por anodos de sacrifício (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 2005). Os tanques de lastro são normalmente protegidos totalmente por revestimento, já os tanques de carga são revestidos apenas no fundo e no teto. O fundo do tanque de carga é uma região exposta ao acúmulo de água produzida, a qual se separa do petróleo. O teto é exposto ao gás inerte que possui CO e CO₂ em sua composição, os quais são corrosivos para a estrutura desprotegida. Por não serem revestidas, anteparas do tanque de carga próximas ao teto e ao fundo do tanque correm também riscos de corrosão. De acordo com a regra definida pela *American Bureau of Shipping* (ABS), são definidos valores limites para a margem de corrosão permitida em embarcações com mais de 90 metros de comprimento. Os valores permitidos variam entre 20%, 25% e 30% dependendo do ano de fabricação, tipo da embarcação e da região do casco (AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, 2010).

Metodologias para melhorar a operação de inspeção dos tanques de carga e de lastro dos FPSO's estão constantemente em estudo. A entrada de pessoas nos tanques para realizar o

procedimento de inspeção apresenta altos riscos, visto que os tanques se tratam de espaços confinados e a entrada nos mesmos também exige que seja realizado um trabalho em altura. Além disso, a operação de preparação para a entrada de pessoas demanda muito tempo com o tanque fora de operação, gerando custos operacionais consideráveis. Técnicas de inspeção remota como a utilização de câmeras acopladas a ferramentas (CALDWELL, 2017), a utilização de robôs escaldadores com ferramentas de inspeção (HUANG et al., 2017), o uso de drones com câmeras acopladas (POGGI et al., 2020) para inspeção visual foram propostas recentemente. Tais técnicas melhoram a questão da segurança durante a inspeção, e melhoram o acesso a áreas mais altas onde o inspetor teria dificuldades de acesso. No entanto, tais técnicas ainda exigem que uma limpeza completa seja realizada para a inspeção visual, um procedimento que custa dias com o tanque fora de operação para que seja realizado. A possibilidade de se utilizar técnicas com emissão de ondas acústicas foi estudada em (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 2005), onde foi levantada a hipótese de se utilizar técnicas de emissão acústica para monitorar o crescimento de trincas no casco e técnicas de ondas guiadas com conjuntos de sensores esparsos para o monitoramento de trincas ou corrosão.

2.2 Monitoramento de Integridade Estrutural

O processo de monitoramento de integridade estrutural de um determinado equipamento, sistema ou estrutura consiste na implementação de uma estratégia de identificação de danos, a qual envolve a observação desta estrutura ou sistema em intervalos periódicos ao longo do tempo, a extração de características sensíveis ao dano durante estas observações, e a análise das mesmas para determinar o estado atual da integridade desta estrutura (FARRAR, WORDEN, 2007). Em um monitoramento de longa duração, a saída deste processo fornece periodicamente uma atualização a respeito da possibilidade de determinada estrutura continuar operando normalmente considerando um inevitável envelhecimento ou acúmulo de danos resultantes de sua condição operacional. O principal objetivo de um sistema de monitoramento de integridade estrutural é alertar sobre a presença de danos em estados iniciais e evitar falhas através do monitoramento contínuo da estrutura com sensores (ALOKITA et al., 2019).

A definição e a diferença entre os termos falhas, danos e defeitos adotadas no presente trabalho são descritas por (WORDEN, DULIEU-BARTON, 2004). Uma falha ocorre quando a estrutura não pode mais operar de forma satisfatória. Um dano ocorre quando a estrutura não se encontra mais em um modo de operação ideal mas ainda assim pode funcionar de maneira satisfatória. Um defeito é algo inerente do material (o qual irá conter uma quantidade desconhecida de defeitos) isto significa que a estrutura pode operar dentro de suas condições de projeto mesmo que o material possua defeitos.

A presença de um dano pode ser considerada como uma alteração que afete negativamente o desempenho ou segurança de determinado sistema, podendo ser esta uma alteração física, geométrica ou de outra natureza. De maneira geral, todos os materiais possuem defeitos ou imperfeições que se apresentam em níveis nano ou microestruturais, como vacâncias, inclusões e impurezas (WORDEN et al., 2007). Eventualmente, tais imperfeições podem evoluir para pequenos danos oriundos de processos de fabricação ou de condições de operação. Uma falha ocorre no momento em que tais danos passam a crescer até atingir dimensões que levem o sistema a operar em condições não mais aceitáveis (FARRAR, WORDEN, 2007).

Embora muitos sistemas possam operar e tolerar uma certa quantidade de danos, mantendo-se em funcionamento de forma segura, é fundamental detectar, diagnosticar e monitorar o crescimento de tais danos. Desta maneira pode-se prever a vida operacional remanescente de um sistema e minimizar o risco de falhas inesperadas, as quais podem resultar em desastres ambientais, perdas econômicas e acidentes com trabalhadores (GALVAGNI, 2013).

A manutenção de grande parte dos sistemas mecânicos e estruturais é realizada baseando-se em intervalos de tempo pré-definidos. Tal intervalo de tempo e locais de inspeção para determinado sistema são definidos muitas vezes através de uma análise baseada em risco (*Risk Based Inspection*)(AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008, 2009). A inclusão de um sistema de monitoramento de integridade estrutural é uma tecnologia que possibilita que uma filosofia de manutenção baseada em tempo evolua para uma filosofia baseada em condição da estrutura, a qual potencialmente apresentará um custo mais eficaz (FARRAR, WORDEN, 2007). Para que um sistema nestes moldes funcione da maneira desejada, torna-se necessária a adoção de um hardware de monitoramento e um sistema de análise que transforme os dados coletados em uma informação sobre o atual estado da estrutura em análise. A utilização de sensores permanentemente acoplados à estrutura em um

sistema de monitoramento estrutural podem trazer vantagens, como a possibilidade de monitoramento contínuo, de detecção de dano em tempo real, de utilizar redes de sensores ou atuadores, de automatizar o processo de inspeção e a possibilidade de avaliar condições operacionais e ambientais do sistema (BURGOS et al., 2020).

Diferentes níveis de diagnóstico de dano são descritos por (RYTTER, 1993), os quais são diferenciados com base no tipo de informação gerada no processo de identificação deste dano. A detecção do dano é o primeiro nível do diagnóstico, o qual pode indicar um comportamento irregular da estrutura. Os níveis seguintes são a localização do dano, a classificação do dano e o prognóstico do dano, que indica qual o tempo de vida remanescente do sistema. Na literatura também é listado um quinto nível, que corresponde à estruturas inteligentes (BURGOS et al., 2020), as quais teriam a capacidade de se adequar a novos limites de operação para permitir uma extensão de sua vida útil.

Diferentes metodologias e algoritmos foram desenvolvidos para a identificação e diagnóstico destes diferentes níveis do dano, várias das quais são descritas por (AMAFABIA et al., 2017; KRALOVEC, SCHAGERL, 2020; SURACE, 2021). De maneira geral, um sistema de monitoramento de integridade estrutural requer um arranjo adequado de sensores para avaliar possíveis mudanças que afetem o desempenho da estrutura. Para cada tipo de sistema de monitoramento, os sensores instalados devem possuir uma boa interação com a estrutura a ser inspecionada, devem ser capazes de medir as variáveis de interesse e devem ser sensíveis o suficiente para diferenciar alterações na resposta referentes à estrutura de alterações ambientais ou de degradação do próprio sensor.

2.3 Ondas Guiadas

A técnica de inspeção por ondas guiadas consiste na emissão de uma onda mecânica que possui a capacidade de percorrer grandes distâncias ao se propagar em determinada estrutura. Esta característica permite que uma determinada área possa ser inspecionada a partir de um único ponto de acesso, a partir do qual a onda é transmitida. Sistemas que utilizam um arranjo de transdutores de ondas guiadas fixados permanentemente em uma estrutura podem ser utilizados para realizar um monitoramento contínuo da mesma ao longo do tempo. Para um melhor entendimento da origem do equacionamento de ondas guiadas em meios

isotrópicos, será inicialmente introduzida a teoria da propagação de ondas de corpo em meios isotrópicos infinitos, a qual é descrita por (ROSE, 2014). Uma breve descrição das equações envolvidas neste fenômeno é apresentada a seguir.

Para um meio elástico isotrópico com ausência de forças de corpo, a equação de movimento pode ser descrita pela equação de Navier abaixo:

$$(\lambda_L + \mu_L)\nabla\nabla \cdot \bar{u} + \mu_L\nabla^2\bar{u} = \rho\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

onde \bar{u} é o vetor de deslocamentos tridimensional, ρ é a massa específica do corpo, λ_L e μ_L correspondem às constantes de Lamé e ∇^2 é o operador de Laplace tridimensional.

Aplicando a decomposição de Helmholtz, e substituindo \bar{u} por um somatório do gradiente de um escalar ϕ com o rotacional de um vetor potencial Φ , conforme a seguinte relação:

$$\bar{u} = \nabla\phi + \nabla \times \Phi, \nabla \cdot \Phi = 0, \quad (2)$$

a equação de movimento pode ser separada em duas novas equações independentes. Uma delas irá representar o movimento dilatacional através de ϕ e a outra irá representar o movimento rotacional através de Φ . Estas duas equações são representadas por:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} = c_1^2\nabla^2\phi \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = c_2^2\nabla^2\Phi \quad (4)$$

onde c_1 corresponde à velocidade de propagação da onda de corpo longitudinal e c_2 corresponde à velocidade de propagação da onda transversal. As velocidades são descritas conforme as equações abaixo.

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda_L + 2\mu_L}{\rho}} \quad (5)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu_L}{\rho}} \quad (6)$$

As duas formas de ondas de corpo representadas pelas equações 2 e 3 também são conhecidas como ondas P (primárias) ou ondas S (secundárias), respectivamente. Ondas P são caracterizadas pelo movimento das partículas do sólido na direção de propagação da onda,

onde ocorrem tensões compressivas e trativas. Já nas ondas S, o movimento das partículas ocorre perpendicularmente à propagação da onda, gerando tensões cisalhantes durante este movimento (GRAFF, 1991). A solução para as equações 3 e 4 que descreve a propagação de ambas as ondas em uma dada direção (direção z no exemplo abaixo) é descrita pelas seguintes equações:

$$\phi = Ae^{i(k_1z - \omega t)} \quad (7)$$

$$\Phi = Ae^{i(k_2z - \omega t)} \quad (8)$$

onde z é a coordenada espacial da onda, t é a variável de tempo, A é uma constante que representa a amplitude da onda, ω corresponde à frequência angular e k_1 e k_2 são os números de onda das ondas longitudinais e das ondas transversais. Estes números de onda são descritos pelas equações apresentadas a seguir.

$$|k_1|^2 = \frac{\omega^2}{c_1^2} \quad (9)$$

$$|k_2|^2 = \frac{\omega^2}{c_2^2} \quad (10)$$

Ondas de corpo que se propagam em estruturas finitas irão interagir com os limites físicos da estrutura do material, refletindo nas fronteiras do mesmo. Esta reflexão é regida pela Lei de Snell para meio sólidos, onde uma onda transversal S incidente sobre uma superfície livre irá refletir uma onda transversal S e uma onda longitudinal P, refletidas em ângulos distintos (MOORE et al, 2005). As interações das ondas de corpo nas interfaces da estrutura levam ao desenvolvimento de ondas guiadas mecânicas que se propagam em um meio elástico. Como condição para o seu desenvolvimento está a presença de fronteiras na estrutura, as quais servirão como um guia para que a onda se desenvolva e se propague. Estruturas laminares como chapas, além de tubos, barras ou hastes são exemplos de guias de onda pois possuem uma ou mais de suas dimensões comparáveis ao comprimento da onda emitida, que é uma condição favorável ao surgimento de um modo de propagação. De acordo com a geometria do meio, propriedades do material e frequência com que a perturbação é excitada na estrutura, pode ocorrer a propagação de modos específicos de onda, as quais apresentarão uma velocidade de propagação em função destas variáveis.

Existem diferentes tipos de ondas, como por exemplo ondas de Rayleigh, as quais propagam através da superfície de um sólido semi-infinito (LORD RAYLEIGH, 1888), ondas de Stoneley, que se propagam pela interface de dois meios e decaem ao se afastar desta

interface (STONELEY, 1924), ondas de Lamb, que ocorrem em placas considerando um estado plano de deformação (LAMB, 1917), entre outras. Neste trabalho serão apresentadas em maiores detalhes as soluções para ondas propagando em uma placa livre, que correspondem às ondas de Lamb e às ondas SH (*Shear Horizontal*).

As ondas de Lamb resultam da solução encontrada para as Equações de Rayleigh-Lamb para uma placa livre, as quais resultam da combinação de ondas cisalhantes transversais SV (*Shear Vertical*) e ondas longitudinais (P). Esta combinação resulta em dois modos distintos de propagação, modos simétricos e modos antissimétricos (AULD, 1973), representados pelas equações 11 e 12, respectivamente.

$$\frac{\tan\left(k_{ts} \frac{b}{2}\right)}{\tan\left(k_{tl} \frac{b}{2}\right)} = -\frac{4k^2 k_{tl} k_{ts}}{\left(k_{ts}^2 - k^2\right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{\tan\left(k_{ts} \frac{b}{2}\right)}{\tan\left(k_{tl} \frac{b}{2}\right)} = -\frac{\left(k_{ts}^2 - k^2\right)^2}{4k^2 k_{tl} k_{ts}} \quad (12)$$

A variável b corresponde à espessura da placa, k é o número de onda na direção de propagação, k_{ts} e k_{tl} representam, respectivamente, as componentes do número de onda referentes à ondas transversais e longitudinais propagando no guia de ondas. Os números de onda k_{tl} e k_{ts} são representados por:

$$|k_{tl}|^2 = \left(\frac{\omega}{c_1}\right)^2 - |k|^2 \quad (13)$$

$$|k_{ts}|^2 = \left(\frac{\omega}{c_2}\right)^2 - |k|^2 \quad (14)$$

onde as constantes c_1 e c_2 representam as velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais, respectivamente.

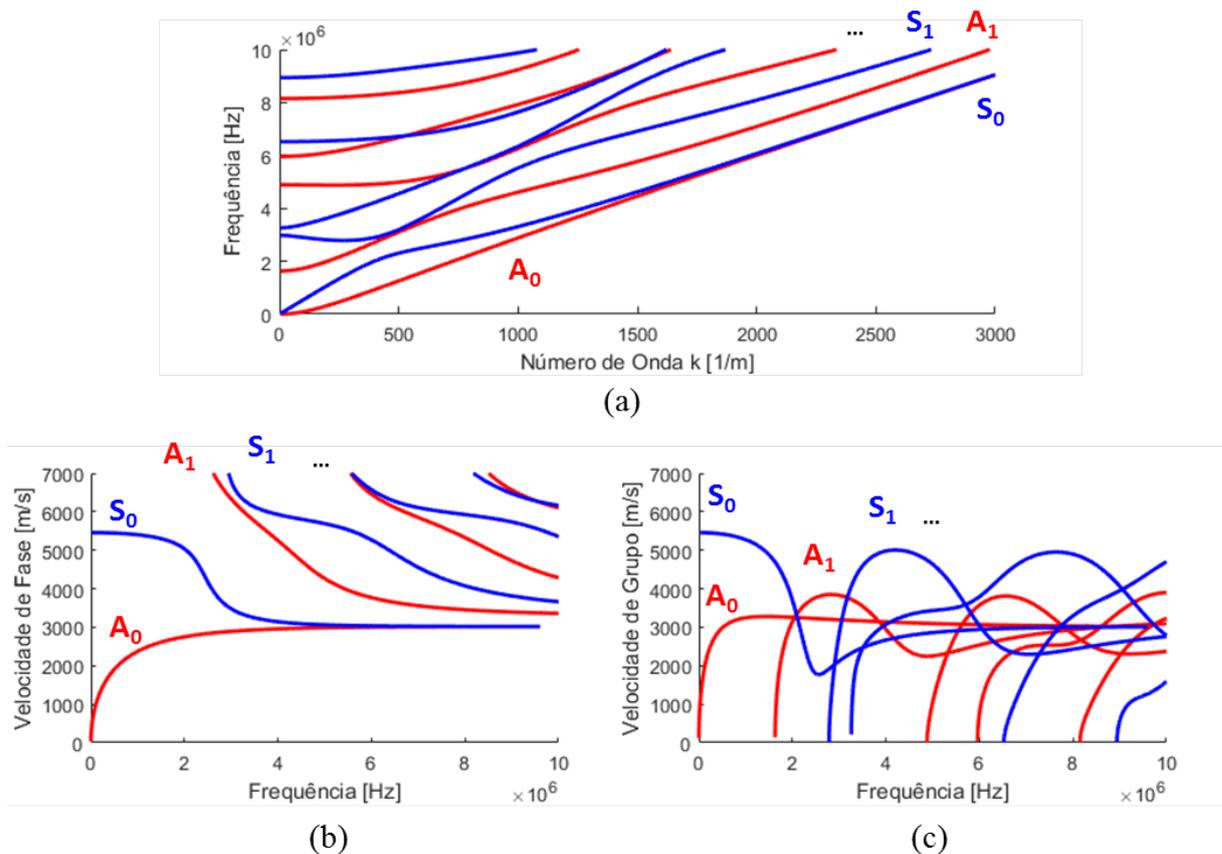
Os pares de valores k e ω que possuem solução puramente real para as equações de Rayleigh-Lamb descritas acima, e que correspondem a modos propagantes, são apresentados através das curvas de dispersão como modos simétricos (S) e antissimétricos (A). As curvas de dispersão são utilizadas para representar os diferentes modos de propagação para uma dada geometria e material, onde é tipicamente apresentada uma relação entre a frequência e a velocidade de propagação de cada modo apresentado (ROSE, 2003). Os modos S possuem simetria em relação à linha central do guia de ondas e os modos A possuem anti-simetria em relação à mesma linha.

Os diferentes modos de propagação também podem ser representados pela sua velocidade de energia, também conhecida como velocidade de grupo (c_g). A velocidade de grupo refere-se à velocidade média com que um pacote de ondas com frequências distintas se propaga através de uma estrutura (ROSE, 2014). O valor da velocidade de grupo pode ser obtido através da derivada presente na Equação 15.

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (15)$$

As curvas de dispersão para as ondas de Lamb em uma chapa de aço ($c_1 = 5960$ m/s, $c_2 = 3260$ m/s, $\rho = 7930$ kg/m³) de 1mm de espessura podem ser vistas na Figura 3, onde são apresentados os números de onda, as velocidades de fase e velocidades de grupo dos modos A e S até uma frequência de 10MHz.

Figura 3 – Curvas de dispersão para os modos de Ondas de Lamb para uma chapa de 1mm de espessura. (a) Número de onda. (b) Velocidade de Fase. (c) Velocidade de Grupo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Em placas isotrópicas livres, considerando que a solução para as equações 2 e 3 envolva apenas os movimentos relacionados ao potencial Φ , os modos obtidos por essa solução são conhecidos como *Shear Horizontal* (SH). Considerando a propagação da onda na direção z , a solução apresentada na equação 7 pode ser descrita como:

$$\Phi = \Phi_0(y)e^{i(k_z z - \omega t)} \quad (16)$$

onde k_z é o número de onda na direção de propagação. A solução da equação acima é descrita através de:

$$\Phi_0 = A \sin(k_y y) + B \cos(k_y y) \quad (17)$$

onde:

$$k_y^2 = k_{ts}^2 + k_z^2 \quad (18)$$

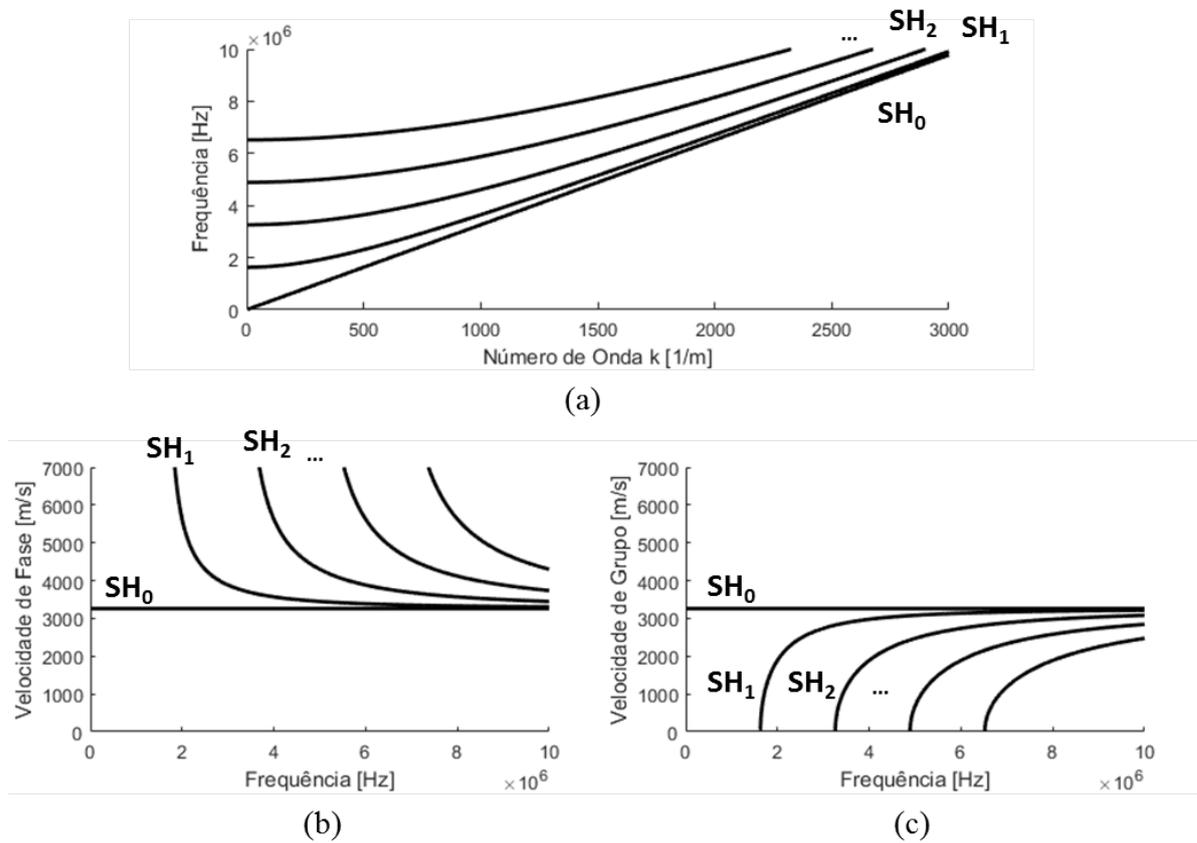
A partir desta solução, realizando substituições algébricas e considerando a condição das superfícies livre de tração, é obtida a relação apresentada pela equação 19, onde n é um número inteiro referente ao modo representado e c_p é a velocidade de fase do modo de propagação.

$$\frac{\omega^2}{c_2^2} - \frac{\omega^2}{c_p^2} = \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \quad (19)$$

Os modos SH possuem movimento cisalhante perpendicular ao plano onde ocorre o movimento gerado pelas ondas de Lamb. As curvas de dispersão até uma frequência de 10MHz para uma chapa de aço de 1mm de espessura podem ser visualizadas na Figura 4.

Tanto as ondas de Lamb quanto as ondas SH apresentam modos de propagação que ocorrem de maneira única quando excitados em frequências menores, abaixo da frequência de corte dos modos de maior ordem. Estes modos são conhecidos como modos fundamentais, sendo estes os modos A_0 e S_0 para ondas de Lamb e o modo SH_0 para as ondas SH. Por ser possível de se excitar os modos fundamentais de forma única em determinado guia de ondas, a utilização de frequências menores em ensaios com ondas guiadas se torna interessante, visto que a ausência de um elevado número de modos propagando concomitantemente na estrutura facilita o tratamento de dados e diminui o ruído gerado por modos de propagação emitidos de forma indesejada.

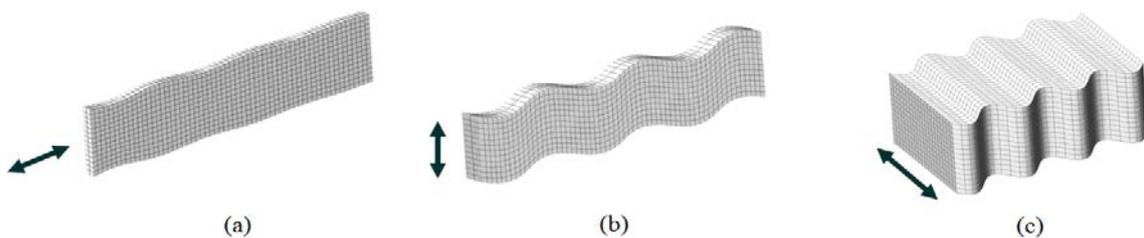
Figura 4 – Curvas de dispersão para os modos SH para uma chapa de 1mm de espessura. (a) Número de onda. (b) Velocidade de Fase. (c) Velocidade de Grupo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Cada um dos modos fundamentais apresentados possui padrões distintos de deslocamento, o que interfere na forma com que cada um deles interage com determinado tipo de descontinuidade ou defeito em uma estrutura. O padrão típico de deslocamentos para estes três modos fundamentais pode ser visto através da Figura 5.

Figura 5 – Formato de deslocamentos dos Modos Fundamentais. (a) A₀. (b) S₀. (c) SH₀.



Fonte: Adaptado de GUIDEDWAVE, 2017

2.4 Transdutores Piezoelétricos

A formação de uma onda em determinado guia de ondas ocorre após existência de uma perturbação na estrutura. Em técnicas de emissão acústica, tais ondas podem ser geradas a partir de um evento como o aumento de uma trinca (ROBERTS, TALEBZADEH, 2002). Em técnicas de ondas guiadas com um arranjo de sensores, as ondas são geradas normalmente através de transdutores eletromecânicos, os quais convertem energia elétrica em mecânica servindo para transformar sinais elétricos em fenômenos físicos, e vice-versa.

Os transdutores eletromecânicos podem utilizar diferentes princípios físicos para gerar as ondas na estrutura como, por exemplo, piezoelectricidade (GUO et al., 1992; GIURGITIU, ZAGRAI, 2000), magnetostricção (SEUNG et al., 2016) e eletromagnetismo (WILCOX et al., 2005; RIBICHINI et al., 2011). No presente trabalho são apresentados conceitos envolvendo a utilização de materiais cerâmicos piezoelétricos para a geração das ondas em estruturas, os quais são descritos nos parágrafos a seguir.

Materiais piezoelétricos possuem a capacidade de se deformar quando submetidos à um campo elétrico e, de forma análoga, se tornam eletricamente polarizados quando submetidos à uma deformação mecânica. Estes materiais podem ser encontrados na natureza na forma de cristais, ou então fabricados na forma de cerâmicas ou polímeros. Em comparação a cristais piezoelétricos encontrados na natureza, as cerâmicas piezoelétricas possuem alta sensibilidade à deformações mecânicas. Esta característica, além da possibilidade de fabricação em diversos formatos e tamanhos, faz das cerâmicas piezoelétricas um material utilizado em diversas aplicações, como em acelerômetros, equipamentos médicos, detectores de movimento e transdutores de ensaios não-destrutivos (FERROPERM PIEZOCERAMICS, 2016).

Materiais que não possuem um centro de simetria em sua estrutura cristalina podem apresentar o efeito piezolétrico. Quando este material é deformado de forma elástica, o centro de gravidade das cargas positivas e negativas é deslocado, e a falta de simetria da estrutura impede que as cargas elétricas se cancelem umas com as outras. Cerâmicas piezoelétricas em sua forma natural são materiais dielétricos, pois estas não possuem partículas livres que conduzam corrente elétrica. Materiais dielétricos podem ser formados por moléculas polares, que apresentam dipolos elétricos, no entanto, tal material se apresenta macroscopicamente como um material neutro devido à distribuição aleatória destas moléculas. Em um processo de

polarização, uma cerâmica deste tipo é submetida à altas temperaturas e a um forte campo elétrico, de forma que suas moléculas se alinhem na direção do campo e torne este material em uma cerâmica polarizada (JORDAN, OUNAIES, 2001). Este processo também pode ser realizado em materiais dielétricos que não possuam moléculas polares, visto que a aplicação de um forte campo elétrico externo poderá induzir dipolos elétricos na estrutura.

Determinados materiais piezoelétricos possuem cada célula unitária de sua rede cristalina com um momento de dipolo elétrico permanente, são, portanto, materiais ferroelétricos. Quando estes materiais são submetidos a um processo de polarização passam a apresentar um efeito piezoelétrico permanente na direção da polarização, propriedade que só será desfeita caso o material seja submetido à temperaturas superiores a temperatura de Curie, pois as direções do dipolo se tornariam aleatórias novamente (KINO, 1987). Um material cerâmico ferroelétrico muito utilizado na fabricação de transdutores é o zirconato-titanato de chumbo ($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ou PZT), o qual apresenta propriedades piezoelétricas permanentes na direção desejada ao passar por um processo de polarização.

As relações constitutivas das cerâmicas piezoelétricas descrevem o comportamento mecânico e elétrico do material quando este é submetido a algum tipo de carregamento. No presente trabalho estas relações são apresentadas através de uma versão vetorizada dos tensores. As equações 20 e 21 apresentam estas relações constitutivas, as quais relacionam o vetores de deformações $\{S\}$ e de deslocamento elétrico $\{D\}$ com os vetores de campo elétrico $\{E\}$ e com o de tensões $\{T\}$.

$$\{T\} = [C^E]\{S\} - [e]\{E\} \quad (20)$$

$$\{D\} = [e]^T\{S\} + [\varepsilon^S]\{E\} \quad (21)$$

Para as duas equações apresentadas, $[e]$ é a matriz de constantes piezoelétricas que relaciona tensão mecânica com o campo elétrico, $[\varepsilon^S]$ é a matriz de constantes dielétricas obtida mantendo deformações constantes e $[C^E]$ é a matriz de rigidez obtida mantendo um campo elétrico constante. Após o processo de polarização, o material cerâmico passa a apresentar um comportamento transversalmente isotrópico. Desta forma, considerando um sistema de coordenadas onde os eixos cartesianos tridimensionais são descritos pelos índices 1, 2 e 3, e considerando os índices 4,5 e 6 para descrever a rotação em cada um destes eixos, as matrizes de rigidez, de constantes dielétricas e de constantes piezoelétricas podem ser

descritas através das equações 22, 23 e 24, respectivamente. O sentido de polarização do material para esta notação ocorre no sentido do eixo 3.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}, \text{ onde } C_{66} = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{22}) \quad (22)$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Quando a anisotropia do material na direção de polarização (direção 3) é considerada, as equações 20 e 21 podem ser representadas de maneira matricial a partir das matrizes acima. A equação 25 apresenta esta representação.

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^E & C_{12}^E & C_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ C_{12}^E & C_{22}^E & C_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ C_{13}^E & C_{13}^E & C_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}^E & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55}^E & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & -\varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{11}^S & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{23} \\ S_{13} \\ S_{12} \\ -E_1 \\ -E_2 \\ -E_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

As relações constitutivas do material piezoelectrico também podem ser descritas conforme as equações 26 e 27.

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad (26)$$

$$\{D\} = [d]^T\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \quad (27)$$

Nas equações acima, $[d]$ é a matriz de coeficientes piezoelétricos que relaciona deformações mecânicas com o campo elétrico, $[\varepsilon^T]$ é a matriz de constantes dielétricas obtida mantendo tensões constantes e $[s^E]$ é a matriz de flexibilidade obtida mantendo um campo elétrico constante. Os coeficientes piezoelétricos d_{ij} relacionam deslocamento elétrico com tensão mecânica ou deformação com campo elétrico. Tipicamente são utilizados materiais com altos coeficientes d_{ij} para aplicações em transdutores, devido à maior resposta elétrica ou mecânica obtida.

Os efeitos eletromecânicos dos materiais piezoelétricos apresentam variações de acordo com a composição do material utilizado e do sentido em que é aplicado o campo elétrico. As dimensões físicas e formato do material também irão influenciar na resposta a estímulos elétricos, visto que estes terão grande influência na resposta mecânica do sistema em função da frequência de excitação. Picos de ressonância do sistema são alterados de acordo com os fatores acima, de modo que a seleção das propriedades e geometria do material deve ser apropriada conforme a faixa da frequência de operação desejada (KINO, 1987). Em ensaios de ondas guiadas é interessante que transdutores piezoelétricos sejam operados em uma faixa de frequências que não esteja próxima a grandes ressonâncias em sua resposta, visto que a presença de pequenas variações ambientais poderá apresentar alterações consideráveis nas medidas próximas destas ressonâncias, podendo dificultar uma posterior etapa de processamento de dados.

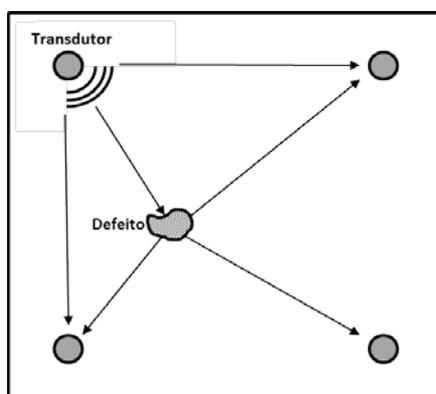
2.5 Técnicas de detecção de defeitos em estruturas planas utilizando Ondas Guiadas

A propagação de ondas guiadas em uma estrutura plana do tipo chapa ocorre tipicamente através de uma fonte pontual de energia finita, sendo assim, uma frente de onda propagando na estrutura sofrerá uma atenuação geométrica em sua amplitude na forma de um espalhamento cilíndrico, conforme a distância que percorreu. Esta característica implica em uma limitação no alcance de ondas oriundas de uma fonte pontual, ou de um arranjo

compacto formado por transdutores muito próximos, poderá apresentar inspecionando uma área de grandes dimensões. Para aumentar a abrangência de uma área inspecionada utiliza-se um arranjo de sensores esparsos, os quais poderão ser distribuídos e fixados ao longo de uma região da estrutura. Desta maneira, cada transdutor emite uma onda por vez e os demais recebem o sinal emitido após este ter interagido com reforços estruturais e possíveis danos presentes na estrutura.

Em um arranjo esparsos são utilizados normalmente sensores que emitem uma onda de forma omnidirecional, desta forma, locais com um dano em potencial podem ser interrogados a partir de múltiplos ângulos de incidência. Esta diversidade angular apresenta vantagens quando o local do dano se encontra dentro do arranjo de sensores, pois assim tanto ondas retroespalhadas como ondas com espalhamento frontal formadas a partir do local do dano poderão ser observadas (FROMME, 2010). Em comparação, apenas ondas retroespalhadas poderiam ser detectadas caso seja utilizado um arranjo compacto (CROXFORD et. al., 2007). Na Figura 6 é exemplificado um esquema de arranjo com sensores esparsos de ondas guiadas, onde cada transdutor opera de cada vez como um emissor e os demais como receptores, recebendo a onda contendo informações da presença de um possível defeito.

Figura 6 – Arranjo de sensores esparsos de ondas guiadas. Exemplo com um transdutor emitindo no canto superior esquerdo e os demais operando como receptores.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os métodos de detecção de defeitos envolvendo ondas guiadas fazem, em grande parte, o uso de sinais de base. Estes sinais de base são medidas realizadas anteriormente à inspeção de interesse, servindo como um parâmetro de comparação entre os sinais da estrutura no estado atual e num estado anterior, podendo este ser com a estrutura totalmente

íntegra. Em estruturas complexas, contendo elementos estruturais fixados na chapa que serve como guia de onda, a utilização de técnicas com sinais de base apresentam melhorias na sensibilidade de detecção em relação à análise direta dos sinais recebido, permitindo a detecção de danos menores na estrutura (MICHAELS, 2016).

Técnicas que fazem o uso de sinais de base possuem a característica de detectar defeitos de maneira incremental, ou seja, apenas defeitos que tenham surgido após a coleta dos sinais de base deverão ser detectados através destas técnicas. Outra característica que exige atenção durante o processamento e comparação de dados com sinais de base é a grande sensibilidade das técnicas de ondas guiadas à efeitos ambientais e operacionais, como mudanças de temperatura, tensões sobre a superfície inspecionada ou mesmo o envelhecimento do adesivo que fixa os transdutores em suas posições (HERDOVICS, CEGLA, 2019). Diferentes métodos para compensar e reduzir efeitos ambientais nas técnicas que utilizam sinal base foram propostos, alguns dos quais serão detalhados ao longo deste capítulo.

Diferentes abordagens existem para realizar a extração de características no sinal recebido pelos transdutores com a finalidade de detectar um defeito. Entre os métodos e algoritmos utilizados com esta função podem ser destacados os índices de dano (ID), os quais consistem normalmente na comparação de dois sinais e no retorno de um valor escalar a partir desta comparação, que deverá indicar o nível de dano presente na estrutura (BARRETO et al., 2021). Como exemplos de características dos sinais de ondas guiadas que podem ser utilizadas no desenvolvimento de IDs estão o tempo de propagação, o valor médio quadrático, a variância (RIZZO, DI SCALEA, 2006), amplitude pico-a-pico (SU, YE, 2009), entre outros. Grande parte dos IDs encontrados na bibliografia são baseados em características entre os sinais avaliados como correlações cruzadas, amplitudes de um máximo local, energia e formato dos sinais e no argumento de um máximo local. Exemplos de IDs baseados nestas características são apresentados em (LIZÉ, 2018).

2.5.1 Algoritmos de imagem

Imagens obtidas por ondas guiadas podem ser aplicadas para detectar, localizar e também caracterizar defeitos em uma estrutura. A geração de uma imagem a partir de um arranjo de sensores de ondas guiadas é tipicamente definida em uma região de interesse da

estrutura, dentro da área de atuação do arranjo de sensores utilizados. Esta área é normalmente dividida em uma matriz de pixels, de modo que cada pixel apresentará uma amplitude referente ao resultado obtido nas coordenadas do mesmo. Em imagens geradas a partir de um arranjo de sensores esparsos, algumas informações preliminares são necessárias, como a posição correta de cada sensor do arranjo e a velocidade de propagação da onda que foi emitida. De uma maneira geral, os algoritmos de imagem utilizando arranjos esparsos podem fornecer uma indicação da posição com maior probabilidade de apresentar um defeito, no entanto, não é esperado que o formato indicado na representação dos defeitos reproduza o formato de algum defeito presente na estrutura (MICHAELS, 2016).

Um dos métodos de geração de imagem com ondas guiadas de menor complexidade se trata do algoritmo RAPID (*reconstruction algorithm for probabilistic inspection of defects*) (ZHAO, 2007). Através deste, é calculado um coeficiente proveniente da diferença entre os sinais de base e sinais coletados para cada par de transdutores, em seguida este coeficiente é atrelado à amplitude dos pixels de uma região elíptica entre os dois transdutores do par, onde o local de cada transdutor do par serve como foco desta elipse. O resultado final é obtido com a soma das elipses de cada par de sensores. Este método é de fácil aplicação por não necessitar de muitas informações a respeito dos modos emitidos e velocidade dos mesmo, porém sua aplicabilidade é restrita à região de dentro do arranjo de transdutores, além de necessitar de uma grande quantidade de sensores para a obtenção de um resultado de boa qualidade.

Entre os métodos mais aplicados para geração de imagens está o algoritmo DAS (*delay-and-sum*), o qual é aplicado utilizando os sinais residuais da subtração do sinal coletado de sua respectiva base (WANG et al., 2004; MICHAELS, 2008). Este algoritmo também utiliza uma regra elíptica para geração da imagem, onde um arranjo de pelo menos três transdutores são necessários para detectar e localizar o ponto de interação da onda com algum defeito. Para a construção da imagem utilizando este método, além da posição dos transdutores, é necessário o conhecimento da velocidade de grupo da onda emitida. A imagem é construída inicialmente calculando o envelope dos sinais residuais através de uma transformada de Hilbert, conforme a equação 28.

$$r_{i,j}(t) = \sqrt{u_{i,j}(t)^2 + H(u_{i,j}(t))^2} \quad (28)$$

onde $r_{i,j}(t)$ é o envelope do sinal residual, $u_{i,j}(t)$ é o sinal residual da subtração medido pelo par de sensores i, j , e o operador H representa a transformada de Hilbert. Para cada pixel

(x, y) da matriz de coordenadas da imagem é calculado o tempo de vôo $t_{i,j}(x, y)$, considerando um sinal emitido pelo transdutor i e recebido pelo transdutor j , conforme a equação 29.

$$t_{i,j}(x, y) = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{c_g} + \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{c_g} \quad (29)$$

Por fim, o cálculo da amplitude da imagem em cada pixel $I^{DAS}(x, y)$ é realizado relacionando a amplitude de cada pixel da imagem com o valor do envelope do sinal residual atrasado pelo tempo de vôo calculado. Em seguida, todos os valores obtidos são somados para obtenção do resultado final, conforme equação 30.

$$I^{DAS}(x, y) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N r_{i,j}(t_{i,j}(x, y)) \quad (30)$$

onde N_p é o número de pares de transdutores. Um melhor desempenho do método DAS também é obtido quando o dano detectado na estrutura se encontra dentro do arranjo de sensores. Embora também seja possível de se detectar a presença de danos fora deste arranjo, a sensibilidade do sistema se torna reduzida. Nestas regiões é comum o aumento da quantidade de artefatos nas imagens, em decorrência principalmente da presença de múltiplos modos se propagando e reflexões em bordas da estrutura.

Como alternativa para o algoritmo DAS foi proposto o algoritmo MV (*minimum variance*), no qual são adicionados pesos aos sinais residuais obtidos pelo DAS de forma adaptativa (HALL, MICHAELS, 2010). Este algoritmo busca reduzir a amplitude de artefatos em regiões da imagem onde a detecção de um defeito não é esperada. Embora possa reduzir artefatos não desejados na imagem, este método possui limitações quando utilizado em áreas com muitos elementos estruturais ou bordas, visto que a interação da onda com estas poderá simular a reflexão de um defeito, resultando em artefatos na imagem.

Outro algoritmo de imagem proposto na literatura é o algoritmo da hipérbole (CROXFORD et al., 2008). Enquanto que os algoritmos já citados utilizam a informação gerada por um par de sensores, gerando a imagem a partir do tempo de vôo do resíduo da subtração do sinal adquirido, o algoritmo da hipérbole faz o uso da diferença no tempo de chegada de uma onda espalhada em dado pixel com coordenada (x, y) da imagem entre um

sensor i e um segundo sensor j . A diferença no tempo de chegada para dois receptores $\Delta t_{i,j}(x, y)$ é descrita por:

$$\Delta t_{i,j}(x, y) = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{c_g} - \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{c_g} \quad (31)$$

Considerando que esta diferença de tempo pode ser calculada para cada N transdutores operando como emissores, a amplitude da imagem $I^{HP}(x, y)$ é construída a partir do somatório da correlação cruzada de várias combinações de sinais recebidos, conforme a equação 32.

$$I^{HP}(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^{N-1} \sum_{\substack{j=i+1 \\ j \neq n}}^N X_{ni,nj}(\Delta t_{i,j}(x, y)) \quad (32)$$

onde $X_{ni,nj}(x, y)$ é a correlação cruzada entre o envelope dos sinais residuais dos pares de transdutores pares número de pares de transdutores n, i e n, j onde n é o emissor e i e j são os dois receptores. Esta forma de construção de imagem permite que uma maior combinação de pares de sinais seja somada (até $N(N-1)(N-2)/2$), podendo resultar em uma melhor relação sinal ruído na região de um possível defeito.

Algoritmos de imagem que fazem uso de um padrão de espalhamento esperado para dado tipo de defeito também foram propostos na literatura. Assumindo uma propagação teórica de uma fonte pontual até um ponto de espalhamento, uma propagação deste ponto até um receptor, levando em consideração a dispersão da onda propagada e a sua atenuação geométrica, é possível construir uma imagem comparando estes sinais teóricos com sinais residuais obtidos pelos transdutores. O método ‘Excitelet’ apresentado por (QUAEGEBEUR et al., 2011) correlaciona um sinal refletido de forma perfeitamente omnidirecional para cada pixel da matriz da imagem com os sinais residuais para realizar a construção da imagem. Métodos que realizam a construção da imagem a partir de sinais previamente computados levando em consideração a posição de um refletor ou mesmo a dispersão de uma onda também são propostos em (LEVINE, MICHAELS, 2013) e (HARLEY, MOURA, 2014). O comportamento dos sinais residuais que são obtidos anteriormente e posteriormente ao espalhamento da onda também foram utilizados como base para o desenvolvimento de um algoritmo de imagem baseado em um estimador de máxima verossimilhança, como o proposto por (FLYNN et al., 2011). Diversas variações dos métodos citados podem ser encontradas na literatura, a maioria baseadas em correções da dispersão e redução de efeitos

de borda. No entanto, em estruturas complexas que apresentam diversas reflexões vindas de elementos estruturais tais técnicas apresentam limitações, visto que foram desenvolvidas para estruturas isotrópicas e muitas vezes apenas testadas apenas em ambientes controlados de laboratório.

2.5.2 Compensação de temperatura e efeitos ambientais

Sinais residuais provenientes da subtração de um sinal de base são utilizados por grande parte dos algoritmos de imagem apresentados. No entanto, a alta sensibilidade da técnica de ondas guiadas permite que variações ambientais alterem os sinais medidos, resultando na geração de amplitudes no sinal residual que não correspondem à indicação de um defeito. Variações de temperatura na estrutura resultam em uma mudança na velocidade de propagação das ondas, causando uma dilatação ou contração do sinal recebido pelos transdutores (WEAVER, LOBKIS, 2000). Ainda, variações de temperatura, umidade e a ação do tempo tipicamente resultam em mudanças da rigidez da camada de adesivo utilizada para a fixação dos transdutores na estrutura, modificando a resposta em frequência dos transdutores. Estas variações ocasionam em mudanças de amplitude, velocidade e defasagens do ângulo fase no sinal recebido, aumentando a amplitude de elementos indesejados (ruído) no sinal residual (ATTARIAN et al., 2014).

Os métodos de compensação de efeitos ambientais apresentados na literatura levam em consideração que tais efeitos são minimizados quando a subtração do sinal de sua respectiva base for a que apresentar as menores amplitudes no sinal residual, considerando-se assim uma situação ambiental muito próxima nas duas situações de aquisição. O método mais comum e utilizado para realizar a compensação de efeitos ambientais e de temperatura é o OBS (*Optimal Baseline Selection*) (LU, MICHAELS, 2005; KONSTANTINIDIS et al., 2006). Neste método, uma grande quantidade de medidas de base com a estrutura em um estado conhecido é armazenada e, posteriormente, os sinais de base mais adequados são utilizados para comparação com os sinais atuais. A seleção da medida de base mais adequada é realizada através da subtração de cada sinal de base armazenado do seu respectivo sinal atual, sendo escolhido o sinal de base cuja subtração apresentar as menores amplitudes. Como parâmetro de escolha do menor sinal residual, pode ser adotado o valor do erro quadrático médio dado pela subtração entre os dois sinais.

Embora uma grande quantidade de medidas de base possa ser armazenada, a obtenção de uma medida que corresponda exatamente às mesmas condições ambientais da época em que foi realizada a medida de base é muito difícil. A ação do tempo, além de degradar a estrutura, pode também gerar alguma pequena alteração na resposta dos transdutores e estas variações podem resultar em mudanças de amplitude e no tempo de resposta. Desta forma, técnicas que modificam os sinais de base foram desenvolvidas para realizar ajustes e compensar estes efeitos. Uma variação na temperatura de determinada estrutura resulta em mudanças dimensionais e de propriedades do material da mesma, estas mudanças causam alterações na velocidade e na distância que a onda se propaga, alterando o tempo de chegada dos sinais recebidos. O efeito causado por estas mudanças resulta em uma contração ou expansão do sinal no tempo, podendo ser compensado através da multiplicação de um fator β aplicado no sinal de base, para que este se aproxime do sinal adquirido, conforme equação 33.

$$\hat{b}_n(t) = b_n(\beta t) \quad (33)$$

onde $b_n(t)$ é o sinal de base original e $\hat{b}_n(t)$ é o sinal de base modificado pelo fator β . Existem variadas estratégias para adotar um fator β que se melhor se adeque ao sinal, a técnica mais utilizada se trata do BSS (*baseline signal stretch*) (WILCOX et al., 2008; CROXFORD et al., 2010), onde β é selecionado de maneira que minimize o valor do erro quadrático médio da diferença entre os sinais. No caso de um incremento de temperatura, o parâmetro β será menor do que 1 (ocorrerá uma dilatação do sinal), e no caso de uma redução na temperatura ele será maior do que 1 (ocorrerá uma compressão do sinal). A aplicação da combinação das técnicas de OBS+BSS é utilizada na literatura (CLARKE et al., 2009) e demonstra ser uma estratégia mais efetiva em relação à utilização de apenas uma das duas de forma única.

Além da alteração nas propriedades de meio de propagação, a variação da temperatura também modifica características de transdução do sensor. Tais alterações resultam em variações no ângulo de fase do sinal recebido ou emitido, gerando imperfeições na subtração dos sinais que não são corrigidas diretamente pelos métodos já apresentados. Para corrigir esta alteração, novos métodos que consideram a compensação do ângulo de fase juntamente com a compensação da variação de velocidade foram desenvolvidos. O método apresentado por (HERDOVICS, CEGLA, 2019) realiza uma compensação de forma iterativa para corrigir efeitos da variação de resposta do sensor e variação de velocidade de propagação de forma

concomitante. Outro método proposto por (MARIANI et al., 2020) busca a melhor combinação de variação de ângulo de fase com uma compressão ou dilatação do sinal realizando uma varredura entre um intervalo de ângulos e aplicando a compensação de velocidade para cada um deles. A melhor opção será aquela que apresentar os menores valores de erro quadrático normalizado na subtração do sinal base modificado de seu respectivo sinal atual. Ambos os métodos propostos apresentaram ganhos significativos na relação sinal-ruído obtida com o resíduo da subtração em relação à resultados que utilizaram apenas a combinação das técnicas de OBS+BSS.

2.6 Técnicas de Reconstrução de Imagens

No presente subcapítulo são introduzida técnicas de processamento e reconstrução de imagens utilizadas ao longo do presente trabalho. Inicialmente é apresentada a teoria envolvida na modificação de uma imagem através da mudança em sua distribuição probabilística. Em seguida é introduzida a teoria de reconstrução de uma imagem através da decomposição da mesma em valores singulares.

2.6.1 Alteração da função distribuição de probabilidade de uma imagem

Modificações na distribuição do histograma da imagem se trata de um campo já explorado para diferentes aplicações (KHOLMOVSKI et al., 2002; KHAN et al., 2013; AL-AMEEN et al., 2015). O processo de alteração na função de distribuição amostral é explicado em (ROSENBLATT, 1952). Para uma determinada imagem, a mudança na função de distribuição acumulada da mesma pode ser realizada considerando-se a distribuição de amplitude dos pixels da mesma. O procedimento para mudança na distribuição começa através do cálculo da função distribuição acumulada (FDA) das amplitudes dos pixels. A FDA de uma variável aleatória $\hat{\Phi}$ pode ser expressa como a integral de sua função densidade de probabilidade ($f_{\hat{\Phi}}$), conforme a seguinte equação:

$$F_{\hat{\Phi}}(x) = \int_{-\infty}^x f_{\hat{\Phi}}(x)dx. \quad (34)$$

A partir da obtenção da FDA de determinada distribuição, é possível retornar para uma distribuição de probabilidade distinta da original através de uma transformação isoprobabilística inversa partindo-se da FDA obtida. Diferentes distribuições são definidas na literatura, cada qual apresentando um formato e características distintas. No presente trabalho será exemplificado o procedimento de transformação inversa utilizando-se uma função distribuição Gama. O cálculo inverso da função distribuição Gama acumulada, utilizando a FDA ($F_{\hat{\phi}}(x)$) obtida anteriormente é descrito por:

$$x = F_{\hat{\phi}}^{-1}(p | \hat{k}, \theta) = \{x : F_{\hat{\phi}}(p | \hat{k}, \theta) = p\}, \quad (35)$$

onde

$$p = F_{\hat{\phi}}(x | \hat{k}, \theta) = \frac{1}{\Gamma(\hat{k})} \gamma(\hat{k}, \frac{x}{\theta}), \quad (36)$$

sendo $\gamma(\hat{k}, \frac{x}{\theta})$ a função Gama incompleta inferior, $\Gamma(\hat{k})$ a função Gama avaliada em \hat{k} , \hat{k} como parâmetro de forma e θ como parâmetro de escala.

Ao final do processo descrito, é obtida uma nova imagem com características próprias de uma distribuição Gama com os parâmetros de forma \hat{k} e de escala θ adotados.

2.6.2 Reconstrução da imagem através da decomposição em valores singulares

A técnica de processamento de uma imagem através de sua reconstrução utilizando uma decomposição em valores singulares é conhecida por SVD (*Singular Value Decomposition*). Um resumo a respeito da técnica é encontrado em (STEWART, 1993). A utilização da técnica de SVD já foi explorada na redução de artefatos de imagem em variados campos de aplicação (MAULDIN JR. et al., 2011; EPPS, KRIVITZKY, 2019; REDDY, KUMAR, 2007; SCHANZE, 2018). Em uma imagem, a decomposição da mesma pode ser realizada a partir da matriz de pixels que compõe a mesma.

O processo de decomposição em valores singulares é feito a partir da fatoração da matriz M (matriz de pixels da imagem) de dimensões $m \times n$ no seguinte formato:

$$M = U\Sigma V^* \quad (37)$$

onde U corresponde à uma matriz unitária $m \times m$, Σ corresponde à uma matriz $m \times n$ retangular diagonal e V corresponde a uma matriz unitária $n \times n$. Quando a matriz M é real, U e V também são matrizes reais ortogonais. Esta representação da matriz M permite que os dados originais sejam apresentados em um sistema de coordenadas onde a matriz de covariância é diagonal. Desta maneira, os valores singulares da matriz M são representados através das entradas da diagonal da matriz Σ .

A partir da obtenção da matriz Σ com os valores singulares de determinada imagem, é possível de se aplicar uma função de pesos para estes valores e posteriormente reconstruir a mesma, modificando-se a imagem conforme a aplicação desejada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos detalhes e características do desenvolvimento do sistema de Ondas Guiadas para inspeção dos cascos e dos testes realizados para avaliar o comportamento e os resultados apresentados pelo mesmo. A seção é dividida em três subseções principais: na primeira delas são descritos os procedimentos e testes realizados para a seleção e caracterização do sistema de transdução, na segunda são apresentados os detalhes do experimento em escala real realizado para o teste deste sistema e por fim é apresentada uma metodologia alternativa para o pós-processamento dos resultados de imagem obtidos com os testes do sistema.

3.1 Seleção e Caracterização do Sistema de Transdução

O planejamento do sistema de transdução envolve a adoção de um modo de propagação apropriado, que apresente sensibilidade adequada aos tipos de defeito que se busca encontrar e que apresente baixa atenuação durante a interação com reforços inerentes da estrutura analisada. A caracterização do sistema de transdução adotado foi realizada de modo a definir o alcance e disposição do mesmo para instalação. Os subcapítulos a seguir apresentam, em ordem cronológica, a metodologia aplicada para a seleção e caracterização do sistema de transdução empregado.

3.1.1 Interação dos Modos Fundamentais com Elementos Estruturais

A estrutura interna do casco de uma plataforma FPSO possui uma série de reforços estruturais necessários para atingir a rigidez de necessária da embarcação. Na região dos tanques de carga, as chapas de anteparas que definem os limites entre os tanques de carga e de lastro possuem diversos enrijecedores longitudinais. Este tipo de elemento presente na chapa que atua como uma guia de ondas gera uma interferência da onda durante a sua passagem, resultando em reflexões na direção contrária à propagação da onda e uma atenuação da frente de onda que transpassou por este obstáculo. Além disso, esta interação poderá resultar em uma conversão de modos, podendo resultar em uma redução na energia do modo originalmente emitido.

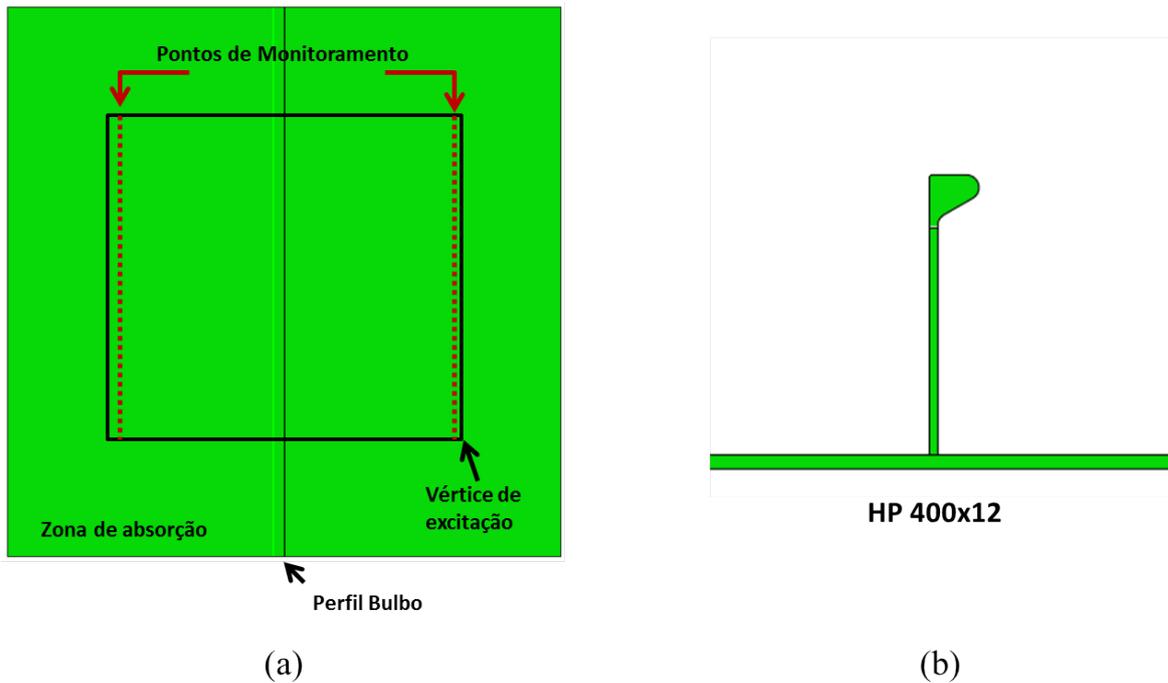
Para o estudo da interação dos diferentes tipos de ondas em chapas com estes elementos estruturais, foram utilizados os três modos fundamentais: S_0 , A_0 e SH_0 . Um perfil bulbo do tipo HP 400x12 (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1997) foi utilizado para este estudo por se tratar de um perfil com dimensões típicas na região do tanque em análise, o qual é soldado em chapas de antepara com dimensões entre 18 e 22mm de espessura. Os estudos foram realizados através de modelos elásticos dinâmicos explícitos utilizando o software comercial de elementos finitos ABAQUS (ABAQUS DOCUMENTATION, 2016). A chapa modelada possui dimensões de 1800 x 1800 x 20mm e contém uma zona de absorção de 600mm ao longo de todos os seus lados. A zona de absorção foi dimensionada de maneira que seu tamanho fosse o suficiente para atenuar os movimentos de todos os modos que foram emitidos neste modelo, sendo limitado pelo comprimento de onda do modo S_0 na menor frequência testada. O amortecimento da zona de absorção corresponde a um amortecimento de Rayleigh, onde o fator α foi definido para cada linha de elementos que compõe a zona de absorção de acordo com a seguinte regra:

$$\alpha(n^{ABS}) = K(n^{ABS} / 150)^P \quad (38)$$

onde $K = 1E6$, $P = 3$ e n^{ABS} corresponde ao número da linha de absorção a partir da região com material sem absorção até as bordas do modelo.

O modelo da chapa foi composto por elementos cúbicos lineares com 8 nós e com arestas de 4mm de dimensão, de modo que os comprimentos de onda do modo A_0 na maior frequência de emissão pudessem ser representados. O tempo total do modelo dinâmico foi fixado em 1.5ms e o incremento de tempo foi fixado em 3E-7s. Cada modo fundamental foi excitado no modelo de uma maneira diferente, o modo A_0 foi excitado aplicando-se uma carga unitária perpendicular à chapa em cada nó de uma linha de nós ao longo da espessura da chapa do modelo. O modo S_0 foi excitado através da aplicação de uma carga unitária perpendicular à chapa em dois nós, um em cada superfície da chapa, em sentidos contrários. O modo SH_0 foi gerado através da excitação unitária de 8 regiões pontuais ao longo da espessura do modelo, formando uma região circular discretizada, sendo o sentido da excitação tangencial ao círculo formado pelos 8 pontos. O raio do círculo formado pelos nós de excitação é de aproximadamente 12,65mm. A excitação de cada diferente modo fundamental foi feita a partir da mesma região da chapa, conforme mostra a Figura 7 (a), na Figura 7 (b) pode ser visto um detalhe do modelo contendo o perfil bulbo.

Figura 7 – Modelo numérico para avaliação de índices de transmissão e reflexão. (a) Chapa plana contendo perfil bulbo. (b) Detalhe de seção do perfil bulbo HP400x12.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

As propriedades adotadas para o material da chapa e do perfil correspondem a um aço carbono com massa específica de 7800kg/m^3 , módulo de elasticidade de 200GPa e coeficiente de Poisson de $0,29$. Para cada um dos modos excitados, foram gerados modelos equivalentes sem a presença do perfil bulbo, desta forma foi possível avaliar a diferença no campo de deslocamentos da frente de onda com o sem a presença do perfil. Os pontos de monitoramento indicados na Figura 7 (a) foram definidos a cada 8mm na superfície da chapa e utilizados tanto para calcular o coeficiente de transmissão como o coeficiente de reflexão da onda emitida em função do ângulo de incidência em que a mesma interage com o perfil bulbo. A amplitude dos sinais do modo originalmente emitido que se refletiram e que transpassaram o perfil foram registradas pelos pontos de monitoramento e foram relacionadas com as amplitudes dos sinais propagados sem a presença do bulbo. Através desta relação levantaram-se os índices de reflexão e de propagação para ângulos de incidência entre 0 e 45° . O sinal emitido em cada modelo e frequência em estudo foi uma *Toneburst* (sinal senoidal janelado por uma função Hanning) de 5 ciclos, com frequência central entre 25 e 80kHz , em intervalos de 5kHz . Pelo fato de cada um dos modos fundamentais apresentarem deslocamentos com maiores amplitudes em direções distintas, os dados avaliados em cada modo foram diferentes.

Para avaliar as amplitudes dos sinais do modo A_0 foram utilizados os deslocamentos fora do plano nos pontos de monitoramento. Para o modo S_0 foram utilizados os deslocamentos no plano coincidentes com a direção de propagação da onda a partir do ponto de excitação, e para o modo SH_0 foram utilizados os deslocamentos no plano perpendiculares à direção de propagação da onda a partir deste mesmo ponto de excitação.

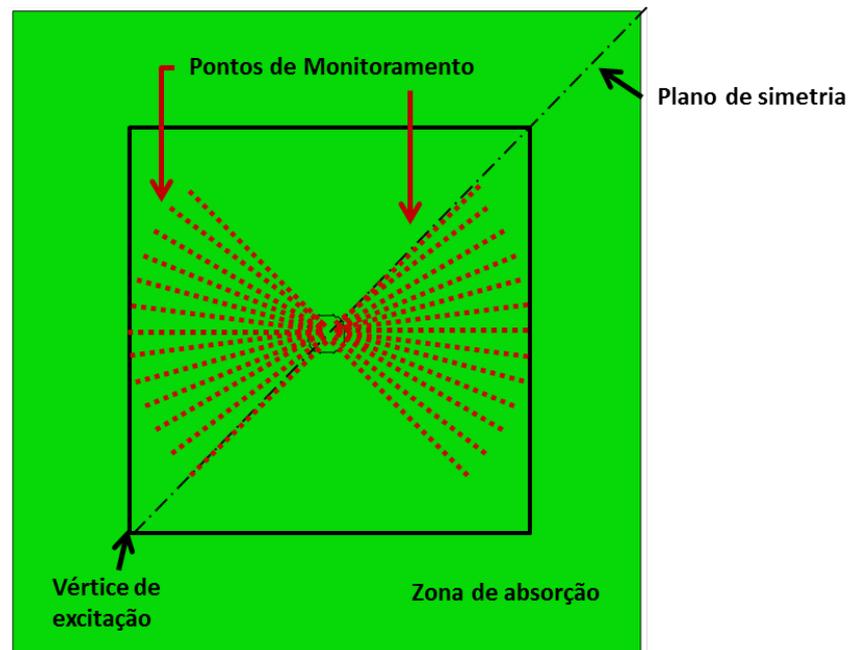
3.1.2 Interação dos Modos Fundamentais com Perda de Espessura

Cada modo fundamental que se propaga em uma guia de ondas apresenta movimentos de suas partículas diferentes entre si durante a propagação da onda. Devido à esta característica, cada modo apresenta um tipo de interação distinto ao encontrar uma falha na estrutura, podendo se refletir ou se espalhar a partir do ponto de interação com o defeito. Nesta interação é possível também que ocorra uma conversão de modos, de maneira que a energia se propagando no formato de um modo específico poderá se propagar a partir da interação com o defeito na forma de outros modos, com movimentos distintos do modo inicialmente emitido. Visto que o sistema de transdução é normalmente projetado para a emissão e recepção de um modo específico, é interessante conhecer a característica de interação dos modos com possíveis defeitos presentes na estrutura monitorada, pois esta informação é relevante para prever o funcionamento adequado do sistema de monitoramento.

Para estudar o tipo de interação que os modos fundamentais apresentam ao atingir um defeito por perda de espessura, foi utilizado um modelo numérico por elementos finitos gerado pelo software comercial ABAQUS. Assim como no estudo da interação com o perfil bulbo, foi utilizado um modelo elástico dinâmico explícito contendo uma chapa de dimensões 1800 x 1800 x 20mm e uma zona de absorção de 600mm ao longo de todos os seus lados. O amortecimento da zona de absorção foi definido da mesma maneira da análise da interação com elementos estruturais. Novamente o modelo foi composto por elementos cúbicos lineares com 8 nós e com arestas de 4mm de dimensão. O tempo total do modelo dinâmico foi fixado em 1.5ms e o incremento de tempo foi fixado em 3E-7s. A excitação de cada um dos modos fundamentais também foi definida conforme descrito na metodologia para a análise da interação com elementos estruturais. Foi atribuído ao material do modelo uma massa específica de 7800kg/m³, módulo de elasticidade de 200GPa e coeficiente de Poisson de 0,29. No centro da chapa do modelo foram introduzidos defeitos com diferentes profundidades através da remoção de elementos, estes defeitos possuem um formato circular com diâmetro

de 200mm, que servirá para simular uma região com perdas de espessura por corrosão na estrutura. A partir do centro do defeito foram definidas linhas de monitoramento espaçadas a cada $7,5^\circ$, metade das quais servirão para monitorar as reflexões oriundas do defeito e a outra metade para monitorar o espalhamento frontal das ondas após a interação com o defeito, conforme mostrado na Figura 8. Um intervalo de 90° foi coberto pelos pontos de monitoramento tanto para monitorar os deslocamentos de sinais refletidos e espalhados para frente, visto que a frente de onda interage de forma perpendicular ao defeito e, portanto, considera-se que o comportamento desta interação seja simétrico.

Figura 8 – Modelo numérico para avaliação da interação dos modos fundamentais com um defeito de perda de espessura.



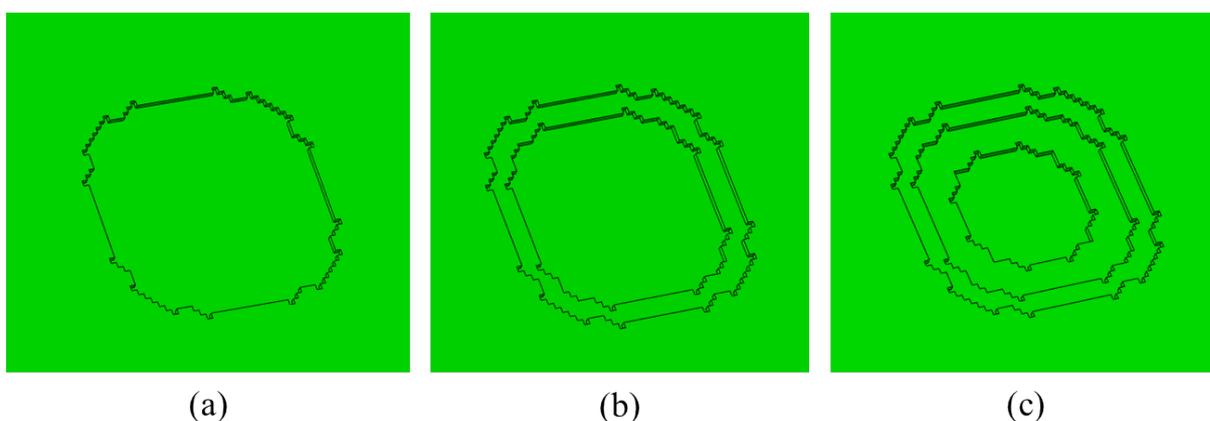
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para cada modelo com defeito gerado foi executado também um modelo equivalente sem a presença do defeito, de modo que apenas os deslocamentos da frente de onda originalmente emitida foram salvos pelos pontos de monitoramento. A análise dos modos provenientes da interação da onda com o defeito foi realizada utilizando a subtração entre deslocamentos obtidos com e sem a presença do defeito. Através dos pontos de aquisição para cada ângulo, foi realizada uma transformada de Fourier espacial (ALLEYNE, CAWLEY, 1991), obtendo-se assim a amplitude de cada modo gerado em dada direção em função da

frequência e do seu respectivo número de onda. O processamento dos resultados gerados pelos modelos numéricos foi realizado através do software Matlab, utilizando a função *fft* (*Fast Fourier Transform*) para a realização da transformada de Fourier espacial (MATLAB DOCUMENTATION, 2020). Os números de onda utilizados para identificação de cada modo obtido foram levantados através das curvas de dispersão geradas utilizando o software Disperse (DISPERSE, 2016). O critério utilizado para o levantamento da amplitude de cada modo foi definido conforme os seus deslocamentos principais: a indicação do modo S_0 foi feita através dos deslocamentos radiais no plano da chapa, a indicação do modo SH_0 foi feita através dos deslocamentos tangenciais no plano da chapa e a indicação do modo A_0 foi feita através dos deslocamentos fora do plano da chapa medidos nos pontos de monitoramento. Visto que o intervalo dos pontos medidos na malha do modelo da chapa apresenta pequenas variações conforme o ângulo escolhido, foi realizada uma interpolação de cada intervalo medido. A distância espacial avaliada para cada ângulo após a interpolação foi fixada, de forma que todos os resultados fossem obtidos dentro de um mesmo intervalo espacial.

Três diferentes defeitos foram testados para cada modo de propagação, todos com diâmetro de 200mm e com diferentes perdas de espessura: 20%, 40% e 60%. As dimensões definidas foram baseadas em (PIPELINE OPERATORS FORUM, 2009). A Figura 9 apresenta a geometria dos diferentes defeitos testados nos modelos numéricos. Todos os modelos gerados utilizaram um sinal de excitação *ToneBurst* de 5 ciclos com frequências centrais entre 25kHz a 80kHz, em intervalos de 5kHz.

Figura 9 – Defeitos de perda de espessura testados para interação dos modos. (a) Perda de 20% de parede. (b) Perda de 40% de parede. (c) Perda de 60% de parede.



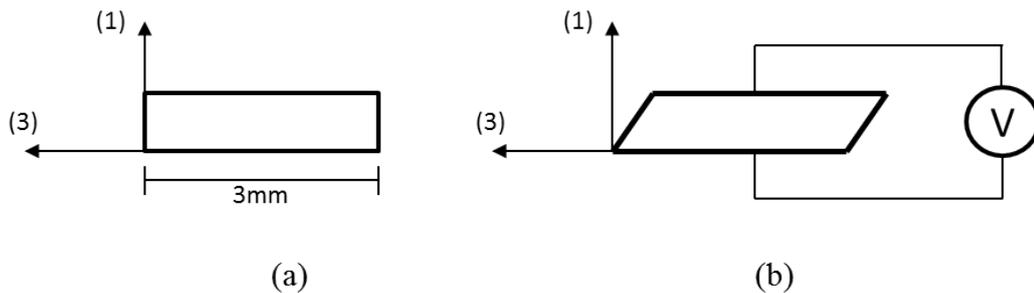
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.1.3 Descrição do Transdutor Utilizado

O transdutor utilizado no sistema de inspeção por ondas guiadas é composto por um arranjo de cerâmicas piezoelétricas, o qual emite e recebe o modo SH_0 de forma omnidirecional. O modelo adotado no presente trabalho foi desenvolvido e caracterizado em (MENIN, CLARKE, 2018). Para a aplicação em cascos de unidades FPSO, o sensor foi encapsulado por um invólucro de proteção. O dimensional do conjunto completo do sensor encapsulado e os materiais utilizados são descritos na presente subseção.

O arranjo de elementos cerâmicos piezoelétricos do transdutor é composto por 12 peças de zirconato-titanato de chumbo (PZT) com dimensões de 13x3x1 mm, polarizados na direção da dimensão de 3mm. O posicionamento dos eletrodos nas faces superior e inferior de cada elemento cerâmico gera um movimento de cisalhamento no sentido de polarização do material no eixo (3), conforme Figura 10.

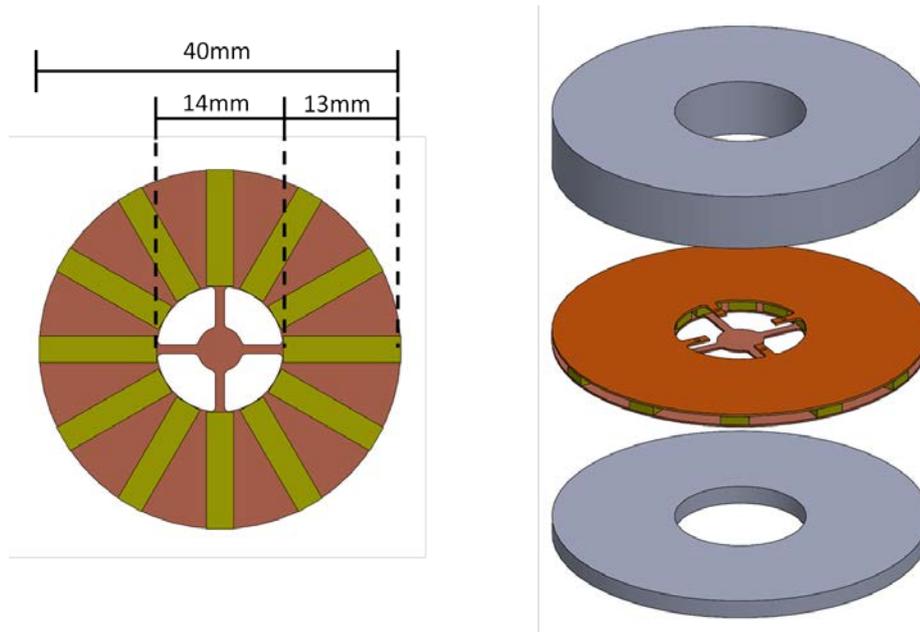
Figura 10 – Cerâmica piezoelétrica. (a) Não deformada. (b) Deformada quando submetida à campo elétrico uniforme.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na Figura 11 pode-se visualizar a configuração do transdutor, que é formado pelo arranjo de cerâmicas posicionado sobre uma base de material laminado de cobre com fibra de vidro e epóxi (FR-4), para realizar o contato elétrico entre as cerâmicas. Este material também é utilizado na parte superior do arranjo de cerâmicas, onde o contato é realizado através de brasagem com solda de estanho em pasta. O transdutor é composto ainda por duas massas metálicas de aço carbono ASTM A36 fixadas ao material FR-4 por adesivo epóxi, sendo que a massa superior possui espessura de 6,35mm e a massa inferior possui espessura de 2mm.

Figura 11 – Disposição dos principais componentes do transdutor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para realizar a proteção do transdutor durante os testes o mesmo foi encapsulado com um invólucro de proteção, o qual possui em sua face inferior uma chapa de aço carbono ASTM A36 circular de 1mm de espessura. O transdutor é aderido à esta chapa em sua face superior, e, em sua face inferior, o conjunto é aderido à estrutura. Todas as uniões foram realizadas utilizando adesivo epóxi. Na parte superior do invólucro foi instalado um conector BNC conectado ao transdutor. Dois tipos de invólucros distintos foram construídos para realizar a proteção do transdutor durante os testes, o primeiro deles foi fabricado por um processo de manufatura aditiva com ABS para testes de propagação em estrutura reduzida. O segundo foi fabricado em liga de alumínio para testes em escala real. Para ambos os tipos de encapsulamento foi mantida a mesma base metálica, a qual foi isolada das paredes por um elastômero, o que impede que a mudança de material do invólucro afete ou interfira com a transmissão da onda pelo transdutor. Na Figura 12 podem ser visualizados os dois modelos de invólucro fabricados.

Figura 12 – Conjunto completo do transdutor. (a) Invólucro de proteção em ABS.

(b) Invólucro de proteção em alumínio.



(a)

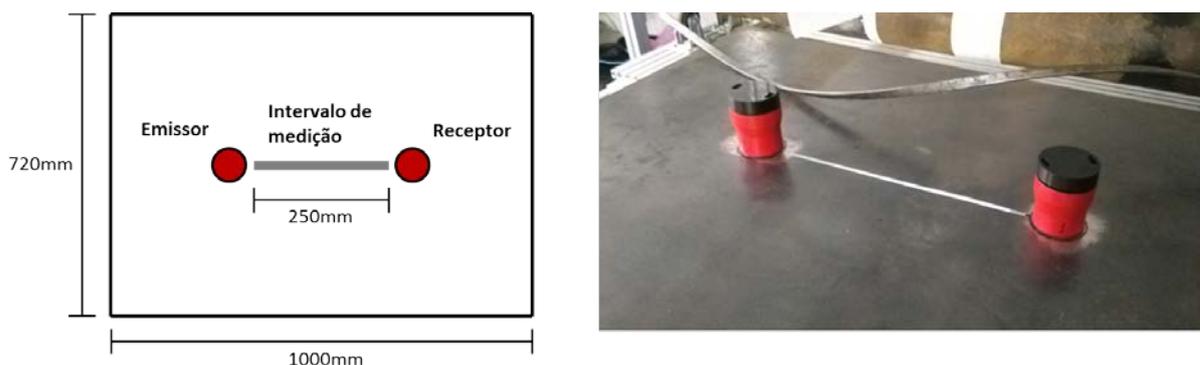
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.1.4 Avaliação do Transdutor – Modos Emitidos e Relação de Amplitudes

A resposta do transdutor adotado para o sistema de inspeção, tanto para a emissão quanto a para recepção, foi apresentada em (MENIN, CLARKE, 2018) considerando o sensor acoplado à estrutura sem a presença de componentes extras. Nos modelos encapsulados existe a presença de uma peça metálica circular na parte inferior do conjunto para possibilitar o fechamento do transdutor e facilitar sua instalação. Isso resulta em uma camada extra de material metálico e de adesivo epóxi entre o transdutor e a estrutura, podendo influenciar o desempenho do mesmo. Para validar o funcionamento do transdutor com a presença destes elementos, foi conduzido um experimento com um par de sensores com encapsulamento em ABS. O ensaio foi realizado em uma chapa de aço carbono ASTM A36 com dimensões de 1000x718x16,5mm, onde os dois transdutores foram fixados, conforme Figura 13. Este ensaio tem como objetivo avaliar os modos emitidos pelo conjunto e a resposta apresentada quando o transdutor opera como receptor.

Figura 13 – Sensores acoplados à chapa de 16,5mm.



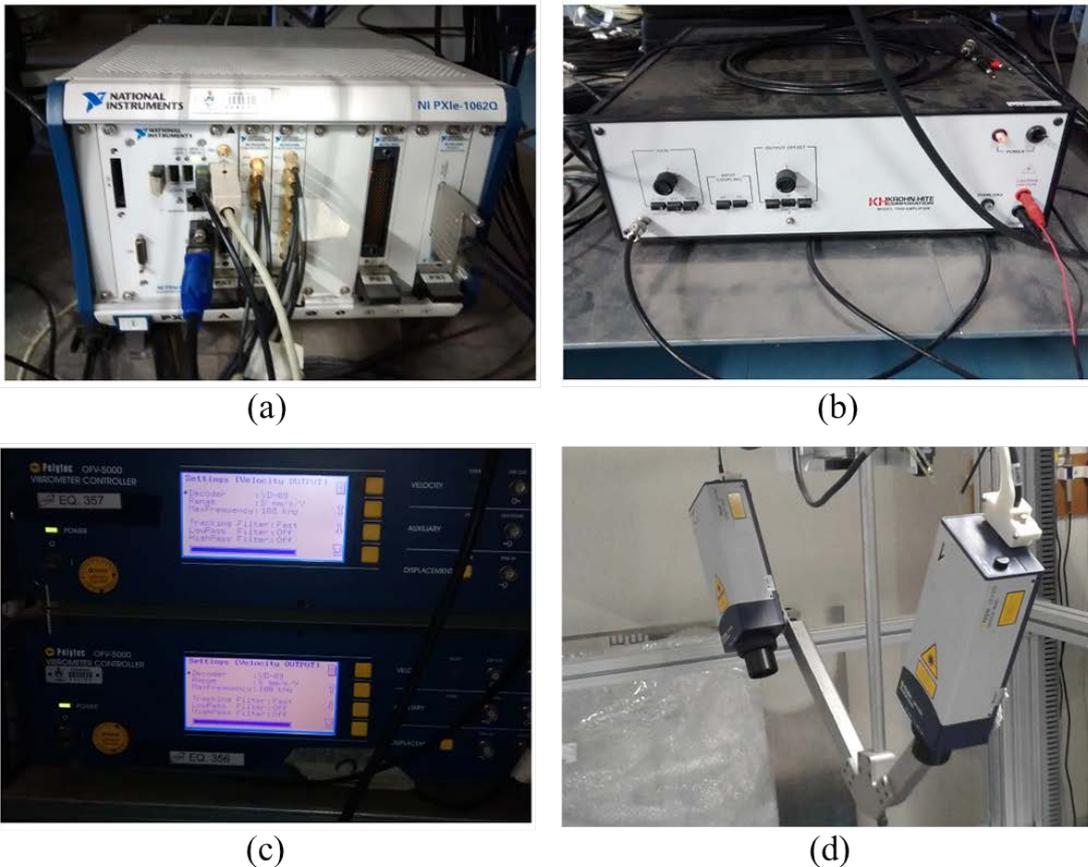
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para avaliar os modos emitidos pelo transdutor foi utilizado um sistema com dois vibrômetros por efeito laser-doppler Polytec OFV-505 (utilizando módulo controlador Polytec OFV-5000), posicionados em um ângulo de 30° em relação à vertical, os quais efetuaram a leitura dos deslocamentos presentes na chapa quando os modos emitidos atingem o ponto de medição. Esta configuração com dois cabeçotes de aquisição permite efetuar a leitura dos deslocamentos fora do plano e no plano da chapa, sendo possível, desta forma, identificar e separar os 3 modos fundamentais. Para cada ponto coletado, a posição dos interferômetros foi orientada tanto em 0° como em 90° , permitindo efetuar a leitura dos deslocamentos transversais e longitudinais das perturbações emitidas pelo transdutor. Um intervalo de 250mm entre os dois transdutores foi monitorado, onde foi feita a aquisição de 83 pontos espaçados a cada 3mm. Com estas medidas foi realizada uma transformada de Fourier espacial (após o janelamento dos sinais com uma janela Tukey de relação 0.5 entre comprimento da seção cônica e comprimento total da janela, a qual englobou os primeiros pacotes recebidos pelo vibrômetro sem as reflexões das bordas) e foram levantadas as amplitudes de cada um dos modos fundamentais emitidos pelo transdutor, utilizando a mesma metodologia apresentada na subseção 3.1.2.

Durante o ensaio, um dos transdutores foi excitado utilizando um sinal *Toneburst* de 5 ciclos com frequências centrais variando de 30kHz a 70kHz, em intervalos de 10kHz, enquanto que o outro transdutor efetuou a aquisição dos sinais emitidos. O sinal emitido pelo transdutor foi gerado através de um sistema de geração de sinais com placa National Instruments PXI-5422 e amplificado por uma fonte Krohn-Hite modelo 7500 que forneceu um sinal com 100V de pico a pico ao transdutor emissor. Os sinais adquiridos foram salvos após a realização de 150 médias para cada ponto de medição. Os sinais medidos com o

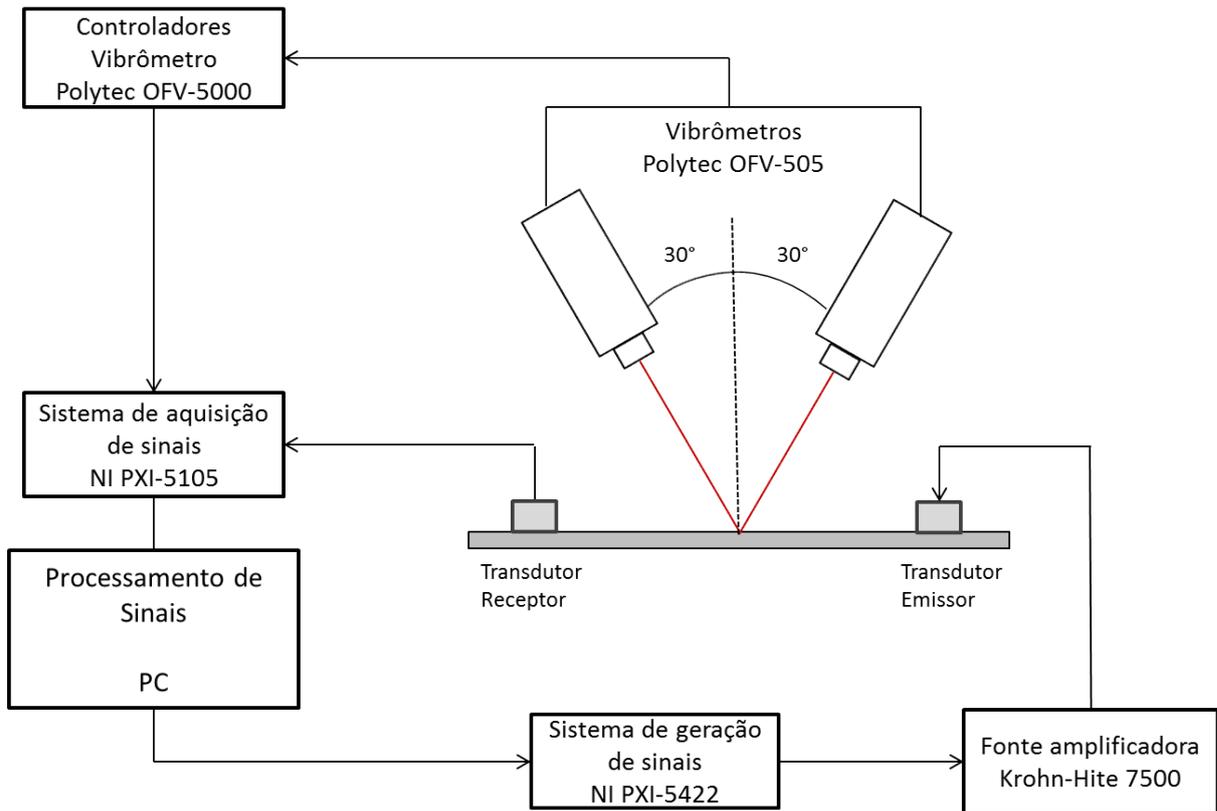
sistema de vibrômetros foram adquiridos utilizando sistema de aquisição com placa National Instruments PXI-5105. A sensibilidade do vibrômetro durante o ensaio foi mantida em 5mm/s/V. A medida de velocidade de vibração obtida diretamente pelo sistema de vibrômetros passou por uma integração no processo de pós-processamento para obtenção dos valores de deslocamento. O sistema de geração e aquisição utilizado para controle, a fonte utilizada para amplificar o sinal e o sistema de interferometria são mostrados na Figura 14. O esquema de ligação entre os equipamentos utilizados para a aquisição dos sinais pode ser visto na Figura 15.

Figura 14 – Equipamentos utilizados para o ensaio. (a) Sistema de geração e aquisição de sinais. (b) Fonte amplificadora. (c) Módulos de controle dos vibrômetros. (d) Par de vibrômetros em ângulo de 30°.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 15 – Diagrama de configuração do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A avaliação da relação de amplitudes entre os modos emitidos foi realizada utilizando o ponto mais próximo do transdutor receptor medido no intervalo considerado. Para esta análise foram realizadas medidas entre 30kHz e 80kHz, em intervalos de 5kHz. Cada modo foi avaliado levando-se em consideração a sua velocidade, para identificação do tempo de chegada do mesmo, e seu deslocamento preferencial: deslocamentos transversais à emissão para o modo SH_0 , deslocamentos longitudinais no plano da chapa para o modo S_0 e deslocamentos fora do plano para o modo A_0 . Através da identificação dos picos de cada modo, foi avaliada também a sua relação com o sinal recebido pelo segundo transdutor, sendo possível de se avaliar a sensibilidade de recepção do transdutor aos modos emitidos.

3.1.5 Avaliação de Atenuação e Alcance do Sinal

O presente estudo foi realizado para se avaliar o alcance do sinal emitido pelo transdutor. Um sinal emitido de maneira omnidirecional apresenta atenuação por efeitos

geométricos, com decaimento da amplitude proporcional ao inverso da distância de propagação. Além destes, efeitos por dissipação de energia para o meio onde se encontra a estrutura e efeitos de dispersão também contribuem para a redução da amplitude. Por se tratar de um modo não-dispersivo e com movimentos dentro do plano do guia de ondas, a dissipação apresentada para o modo SH_0 ocorre principalmente devido à efeitos geométricos.

Utilizando os dados gerados através das medições realizadas na chapa de aço de 16,5mm de espessura com o sistema de vibrômetros para o estudo anterior, foi estimado o decaimento do sinal emitido através do ajuste de uma curva exponencial aos dados medidos. Os valores de amplitude considerados para geração da curva foram estimados através dos valores máximos da primeira frente de onda detectada pelos vibrômetros em cada ponto do intervalo medido. Para cada frequência analisada, foi utilizada a função fit do *software* Matlab (MATLAB DOCUMENTATION, 2020) no modo exponencial, traçando-se uma curva de ajuste aos dados medidos. Esta análise foi realizada para as frequências de 30kHz, 40kHz, 50kHz, 60kHz e 70kHz.

Adotando-se a hipótese de que o sinal recebido pelo transdutor apresente o mesmo decaimento na amplitude em função da distância que o sistema de vibrômetros, as curvas de ajuste foram aplicadas ao transdutor. Considerando-se a distância entre o centro dos transdutores fixados na chapa (400mm) e a amplitude do sinal recebido pelo transdutor nesta coordenada espacial, a curva ajustada foi deslocada para corresponder às amplitudes de sinal recebidas pelo transdutor. Adotando-se uma escala em dB para a curva de decaimento do sinal do transdutor, foi possível estimar a distância que o sinal pode se propagar antes de atingir um nível de ruído pré-estabelecido.

3.2 Estudo de Caso – Teste em Estrutura em Escala Real

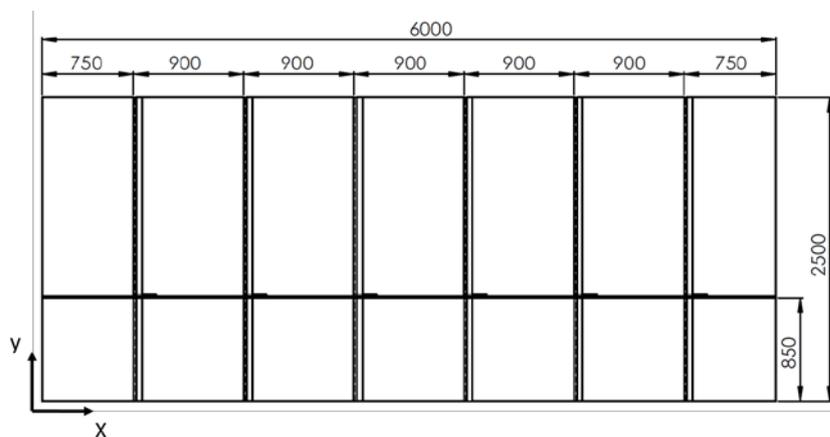
A presente seção apresenta a metodologia empregada para realizar testes de um arranjo de sensores de ondas guiadas em um corpo de prova em escala real. Os subcapítulos a seguir descrevem detalhes sobre o corpo de prova utilizado, sobre o arranjo e distribuição de sensores utilizados, sobre os defeitos gerados no corpo de prova, equipamentos utilizados para medições e algoritmos aplicados para a geração dos resultados.

3.2.1 Corpo de prova em escala real

O corpo de prova empregado para a realização dos testes do sistema foi composto por uma chapa plana contendo reforços estruturais tipicamente encontrados dentro de um tanque de carga de uma unidade FPSO. Este corpo de prova simula parte de uma antepara longitudinal do casco, presente na divisa entre um tanque de carga e um tanque de lastro. A chapa metálica utilizada possui espessura de 19,05mm e possui dimensões de 2500x6000mm. Seis reforços foram soldados ao corpo de prova de forma perpendicular ao plano da chapa para simular a presença de perfis bulbo HP400x12. Estes reforços consistem em chapas com 12mm de espessura, 2500mm de comprimento e 400mm de altura, sendo que a sua extremidade é curvada para se assemelhar a um perfil tipo bulbo. Cada um destes reforços foi soldado a uma distancia de 900mm um do outro. No sentido de maior dimensão da chapa principal foi soldado ainda um reforço de forma perpendicular aos demais. Este reforço possui espessura de 16mm, comprimento de 6000mm e altura de 600mm, e simula parte de um reforço transversal presente nos tanques de carga.

Todos os elementos da estrutura foram feitos com aço carbono ASTM A36 e foram pintados com tinta a base epóxi. O painel foi posicionado em uma estrutura metálica para facilitar o acesso a ambos os lados. A Figura 16 mostra um desenho esquemático do painel com os reforços e suas posições. Na Figura 17 pode-se visualizar o painel construído sobre o suporte metálico.

Figura 16 – Desenho esquemático do painel e seus reforços estruturais. Dimensões em [mm].



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 17 – Corpo de prova construído.

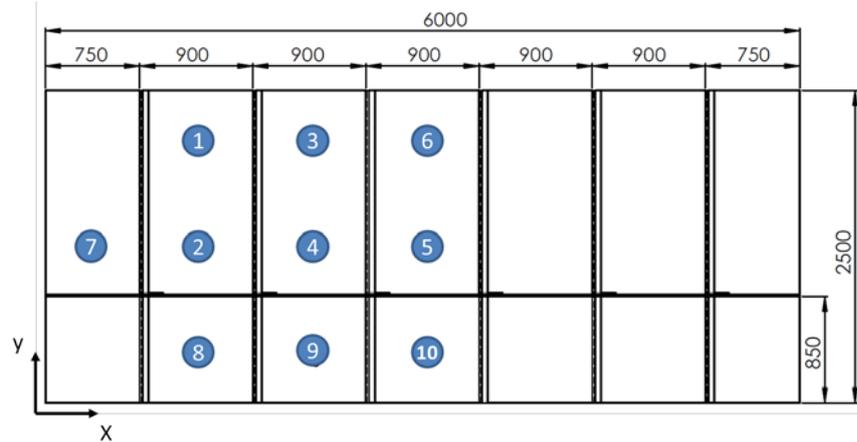


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.2.2 Instrumentação do corpo de prova – Arranjo de Transdutores

Para a realização dos testes no corpo de prova em escala real foram utilizados os sensores de modo SH_0 omnidirecional com invólucro em liga de alumínio. Com a utilização deste tipo de invólucro espera-se que a blindagem eletromagnética seja mais eficiente, reduzindo os níveis de ruído elétrico no sinal recebido e, conseqüentemente, aumentando o alcance da recepção do sinal. O corpo de prova construído foi instrumentado com 10 transdutores com esta configuração de invólucro utilizando adesivo epóxi comercialmente disponível. A disposição dos sensores instalados pode ser visualizada na Figura 18, com seus respectivos números de identificação. As coordenadas de cada transdutor são apresentadas pela Tabela 1.

Figura 18 – Disposição dos transdutores instalados no corpo de prova. Dimensões em [mm].



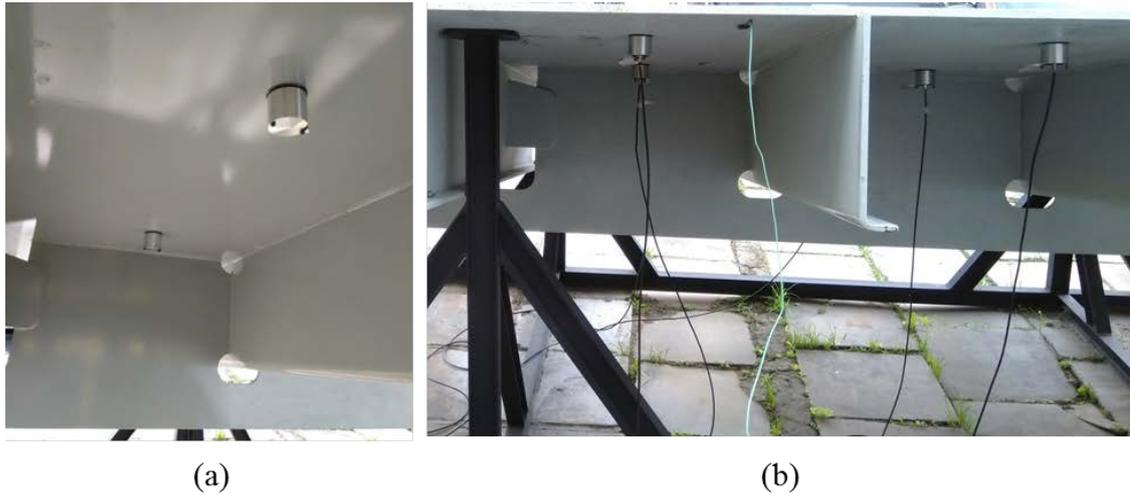
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 1 – Coordenadas dos transdutores instalados no corpo de prova

	Coordenada X [mm]	Coordenada Y [mm]
Transdutor 1	1250	2000
Transdutor 2	1250	1150
Transdutor 3	2150	2000
Transdutor 4	2150	1150
Transdutor 5	3000	1150
Transdutor 6	3000	2000
Transdutor 7	365	1150
Transdutor 8	1250	330
Transdutor 9	2150	330
Transdutor 10	3000	330

O arranjo utilizado foi adotado com base nos resultados dos experimentos realizados para caracterização dos sinais e alcance dos sensores. Um sensor de temperatura Pt100 foi fixado à estrutura para monitoramento da temperatura durante as medições. Na Figura 19 é possível visualizar os sensores instalados no corpo de prova.

Figura 19 – Sensores instalados no corpo de prova. (a) Invólucro fechado. (b) Sensores em operação.



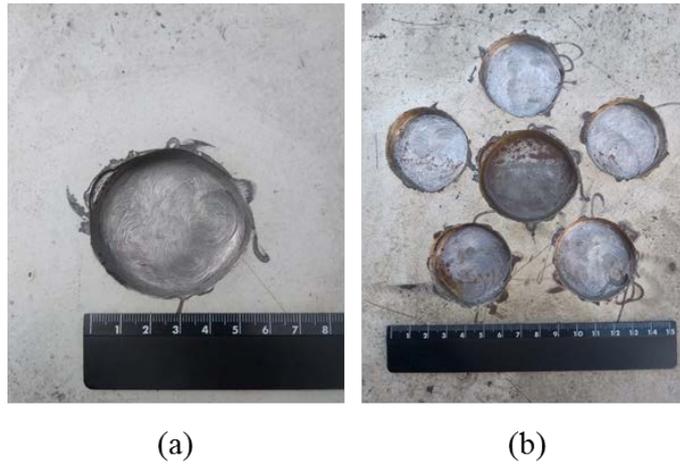
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.2.3 Defeitos introduzidos no corpo de provas

O teste do sistema frente à detecção de perdas de espessuras foi realizado através da introdução de dois defeitos distintos por perda de espessura. Ambos os defeitos foram usinados utilizando uma fresa com acoplamento magnético para melhor controle do avanço de remoção na espessura de parede. Os defeitos foram introduzidos no mesmo local do corpo de provas, dentro do arranjo de sensores acoplados, no par de coordenadas $(x,y) = (1820,1650)$ mm.

O primeiro defeito introduzido foi um furo com diâmetro fixo de 50mm e com profundidade variável de 10% a 50% de perda na espessura original da chapa do corpo de provas. O segundo defeito introduzido foi iniciado a partir do primeiro, porém, este foi composto por um grupo de seis furos com 50mm de diâmetro, sendo um deles centralizado e os demais circundantes a ele. Para o segundo defeito, o furo central teve sua profundidade fixada em 60% de perda na espessura da chapa, enquanto que os demais tiveram sua profundidade variada de 10% a 60% de perda de espessura. Na Figura 20 são apresentados os dois defeitos usinados no corpo de prova. Na Tabela 2 são listados os valores das profundidades dos defeitos para cada etapa de incremento dos mesmos.

Figura 20 – Defeitos introduzidos no corpo de prova. (a) Defeito 1. (b) Defeito 2.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 2 – Profundidades dos defeitos 1 e 2 para cada etapa do experimento

Defeito	Perda de Espessura	Profundidade do Furo Central	Profundidade dos Furos Circundantes
1	0%	-	-
	10%	1,9 mm	-
	20%	3,8 mm	-
	30%	5,7 mm	-
	40%	7,6 mm	-
	50%	9,5 mm	-
	60% (10%)	11,4 mm	1,9 mm
2	60% (20%)	11,4 mm	3,8 mm
	60% (30%)	11,4 mm	5,7 mm
	60% (40%)	11,4 mm	7,6 mm
	60% (50%)	11,4 mm	9,5 mm
	60% (60%)	11,4 mm	11,4 mm

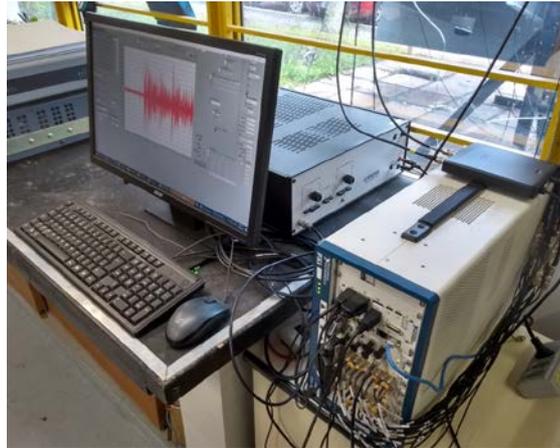
3.2.4 Medições realizadas no corpo de prova

Um conjunto de medidas de base para todas as combinações de emissão-recepção (*pitch-catch*) entre os pares de transdutores instalados foi realizada durante um período de 7 dias, de forma que enquanto um dos transdutores operava no modo de emissão, os demais operavam no modo de recepção simultaneamente. Todas as medidas de base foram realizadas com a chapa do corpo de provas na condição de 0% de perda de espessura. Os sinais de base foram salvos em intervalos de temperatura variando em cerca de 13°C a 35°C entre cada par de sensores, a temperatura registrada foi medida utilizando um sensor de temperatura Pt100 fixado à estrutura do corpo de prova. Aproximadamente 150 medições para cada par de sensores foram realizadas dentro do intervalo de temperaturas indicado.

Após a realização das medidas de base com o corpo de prova totalmente íntegro, foram feitas medidas para cada uma das etapas dos defeitos usinados. As medidas com a inclusão dos defeitos tiveram início 5 dias após o término das medidas de base e levaram um período de 45 dias desde a medição da primeira profundidade do Defeito 1 até a última profundidade do Defeito 2. Em todas as etapas de profundidades, as medições foram realizadas com o painel em temperatura que estivesse dentro do intervalo de temperaturas das medidas de base para cada combinação de pares de transdutores.

Todos os transdutores foram excitados através de um gerador de uma placa de geração National Instruments PXIe-5451 e de uma fonte amplificadora Krohn-Hite 7500. Os sinais de ondas guiadas foram adquiridos utilizando uma placa de aquisição National Instruments PXI-5105. Os sinais adquiridos foram digitalizados a uma frequência de 1MHz em vetores de 3067 pontos. Para cada aquisição foram realizadas 50 médias, com o intuito de reduzir ruído branco presente durante a aquisição. Foi também aplicado um filtro Butterworth para uma banda de frequências em um intervalo de 25% a 150% da frequência central do sinal emitido. Os sistemas utilizados para geração e aquisição dos sinais pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Equipamentos utilizados para ensaio no corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O sinal emitido foi uma *Toneburst* (onda senoidal modulada por uma função Hanning) com frequência central em um intervalo de 30kHz a 80kHz. O número de ciclos para cada sinal *Toneburst* foi condicionado de acordo com a frequência central de emissão, conforme Tabela 3. Esta variação no número de ciclos foi feita para se evitar uma grande diferença na largura da banda do sinal e, conseqüentemente, na energia do pacote emitido para cada diferente frequência.

Tabela 3 – Número de ciclos do sinal *Toneburst* para cada frequência de emissão

Frequência central da Toneburst	Número de Ciclos do Sinal
30 kHz	4
35 kHz	4
40 kHz	5
45 kHz	5
50 kHz	6
55 kHz	6
60 kHz	7
65 kHz	7
70 kHz	8
75 kHz	8
80 kHz	9

3.2.5 Processamento dos sinais e algoritmos aplicados para geração de resultados

Os sinais adquiridos para cada par de sensores e frequência passaram por uma etapa de pré-processamento para compensação de temperatura e efeitos ambientais. Visto que o processamento dos sinais para geração de resultados de imagem utiliza sinais residuais entre o estado da estrutura íntegra e o estado atual, inicialmente foi realizada a seleção da medida de base para cada etapa de profundidade através do algoritmo OBS (*Optimal baseline selection*), sendo que a base escolhida foi selecionada através do critério do menor erro quadrático médio do sinal residual apresentado. Após a aplicação do OBS, foram aplicados também os métodos de compensação de temperatura BSS (*Baseline signal stretch*) e compensação de fase PSC (*Phase shift compensation*) em conjunto no sinal de base selecionado. O método BSS utilizado aplicou um fator de multiplicação do sinal no eixo do tempo, comprimindo ou dilatando o mesmo nesta dimensão. O método PSC foi aplicado variando o ângulo de fase do sinal base em um intervalo de 0-360°, a cada 1°, até encontrar a variação que melhor correspondesse ao sinal atual, de maneira similar ao método aplicado por (MARIANI et al., 2019). Os parâmetros dos algoritmos de compensação BSS e PSC foram adotados a partir do critério do menor erro quadrático médio do sinal residual apresentado para cada sinal processado.

Após a realização do pré-processamento dos sinais para compensação de efeitos de temperatura, os sinais residuais provenientes da subtração entre sinais de base e sinais atuais foram utilizados através do algoritmo DAS para construção de imagens para localização do defeito. A velocidade de grupo aplicada no algoritmo DAS foi 3260m/s, que corresponde à velocidade da onda SH_0 em uma chapa de aço para todas as frequências analisadas. Todas as imagens foram geradas em uma matriz de 150x400 pixels.

Para avaliar o desempenho do arranjo de transdutores frente à detecção dos diferentes tamanhos de defeito, dois índices de dano (ID) distintos foram calculados. Ambos os IDs foram obtidos a partir da imagem gerada como resultado pelo algoritmo DAS. O primeiro ID utilizado corresponde à média das amplitudes de todos os pixels da imagem. O segundo ID corresponde ao valor de máxima amplitude encontrado entre os pixels do resultado da imagem. Através da utilização dos IDs busca-se apresentar uma correlação entre o crescimento dos defeitos e sua severidade de acordo com o ID encontrado, além de se buscar um valor limite no qual seja possível de se determinar a presença ou a ausência de um defeito.

3.3 Estratégias para Pós-Processamento dos Resultados de Imagem

Nesta seção são apresentadas estratégias alternativas para o processamento dos resultados obtidos através do algoritmo de imagem DAS. Estas imagens geradas a partir da subtração de sinais residuais usualmente apresentam ruídos de fundo que levam à geração de artefatos. Isso ocorre geralmente devido a subtrações de medidas de base imperfeitas ou a partir de fortes pontos de reflexão. Idealmente, indicações de defeitos apresentam valores maiores de amplitude do que reflexões provenientes de outros fatores, porém isso pode nem sempre ocorrer, principalmente onde existe a presença de defeitos pequenos, cuja indicação pode ser mascarada por reflexões indesejadas. Através das técnicas empregadas, busca-se obter um aumento na relação sinal-ruído para a indicação do defeito nos resultados de imagem, facilitando a visualização das mesmas e reduzindo a amplitude de artefatos indesejados que podem interferir na interpretação dos resultados. Os subcapítulos a seguir apresentam os métodos de pós-processamento dos resultados de imagem empregados: o primeiro baseado em uma mudança da distribuição probabilística da imagem, o segundo baseado em uma reconstrução da imagem após uma decomposição em valores singulares e o terceiro sendo uma combinação dos dois métodos anteriores.

3.3.1 Modificação da distribuição probabilística da imagem

A primeira estratégia empregada para redução da amplitude de artefatos indesejados consiste em modificar a função distribuição de probabilidade da imagem resultante do algoritmo DAS. No procedimento aplicado, considera-se a imagem resultante do algoritmo DAS, a qual apresenta uma determinada quantidade de pixels com diferentes amplitudes. As diferentes amplitudes apresentadas podem indicar regiões com ruído de fundo (menores amplitudes), com artefatos provenientes de uma subtração imperfeita ou de alterações nas reflexões do sinal devido à presença de um defeito (amplitudes intermediárias) e ainda indicações de algum tipo de defeito (amplitudes maiores oriundas de reflexões vindas diretamente do defeito). Em um cenário ideal, indicações do defeito se encontram bastante destacadas em relação à artefatos com amplitudes intermediárias, no entanto, muitas vezes

estas indicações possuem amplitudes muito próximas da média das amplitudes presentes na imagem, principalmente para defeitos menores.

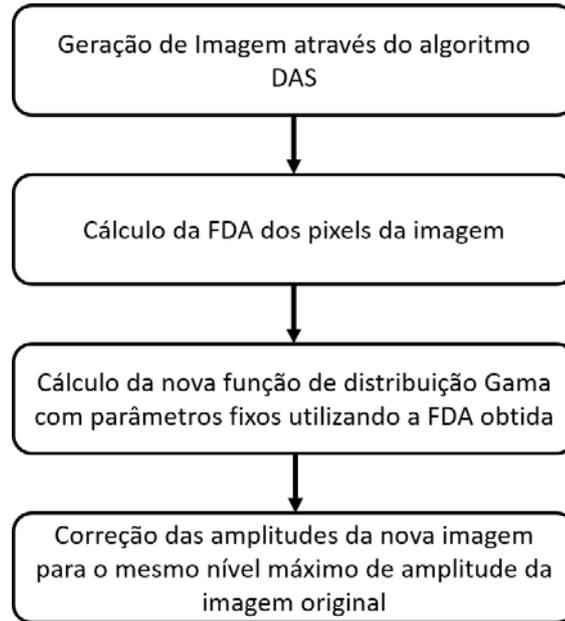
Para melhorar o processo de visualização e interpretação dos resultados de imagem de forma a realçar a real posição do defeito em detrimento de artefatos indesejados, foi proposta uma transformação isoprobabilística da distribuição amostral original da amplitude dos pixels da imagem para uma distribuição Gama com parâmetros fixos.

O procedimento proposto para mudança na distribuição começa através do cálculo da função distribuição acumulada (FDA) das amplitudes dos pixels da imagem. Visto que a função densidade de probabilidade ($f_{\hat{\phi}}$) é alterada de imagem para imagem, a mesma deve ser avaliada individualmente para cada resultado gerado.

A etapa seguinte consiste em realizar o cálculo inverso da função distribuição Gama acumulada, utilizando a FDA ($F_{\hat{\phi}}(x)$) obtida anteriormente. Neste processo, os parâmetros de forma \hat{k} e parâmetro de escala θ foram ajustados e calibrados de forma heurística, sendo mantido constantes para todas as imagens processadas. O valor do parâmetro de forma adotado foi 0.25, enquanto que o valor do parâmetro de escala foi mantido em 4.

Após a obtenção da nova imagem que segue uma função de distribuição Gama, a etapa final envolve um ajuste de amplitudes da imagem, de maneira que a mesma é deslocada por uma constante negativa para que a amplitude do pixel de máximo valor seja mantida a mesma da imagem original. O procedimento completo para alteração na função de distribuição da imagem pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Etapas do procedimento de mudança na distribuição de probabilidade da imagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3.2 Reconstrução da imagem utilizando SVD

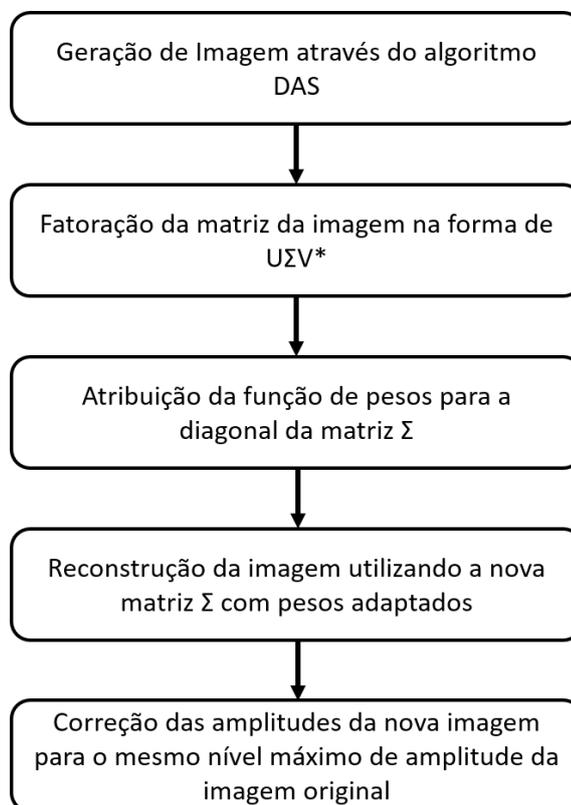
A segunda estratégia avaliada para o pós-processamento da imagem gerada pelo algoritmo DAS é baseado em uma reconstrução da imagem utilizando uma decomposição SVD. No presente trabalho é proposta a decomposição da matriz da imagem em valores singulares e, através da aplicação de pesos específicos para cada componente singular, busca-se reduzir artefatos na imagem que não correspondem a um defeito específico.

Inicialmente é realizada a decomposição da matriz da imagem em valores singulares, no presente trabalho são calculados 150 valores singulares para cada imagem, visto que a resolução utilizada para a geração das imagens pelo algoritmo DAS é 150x400.

A função de pesos adotada para os componentes singulares foi escolhida de forma heurística após uma calibração preliminar. A função de pesos adotada consiste na redução do primeiro componente singular pela metade, pela manutenção dos valores do segundo, terceiro e quarto componentes singulares e pela adoção do valor zero para o quinto componente em diante. Após a modificação da diagonal da matriz Σ , a imagem é reconstruída utilizando as mesmas matrizes U e V . Novamente, assim como para o método anterior, a última etapa consiste em corrigir os valores máximos de amplitude da nova imagem para os níveis da

imagem original. O procedimento completo para o processamento da imagem utilizando a reconstrução SVD pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Etapas do procedimento de reconstrução da imagem utilizando SVD.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.3.3 Combinação de Métodos e Avaliação de Ganhos

O terceiro método proposto para melhorar a avaliação dos resultados de imagem para localização de defeitos consiste na aplicação dos dois métodos descritos anteriormente em conjunto, um após o outro. O procedimento adotado considera inicialmente a aplicação da reconstrução da imagem através do SVD com os pesos propostos. Após a correção das amplitudes para os mesmos níveis de amplitude da imagem original, é realizada a mudança na distribuição probabilística da nova imagem, conforme descrição anterior. A correção da amplitude é realizada novamente ao final do processo.

Os ganhos obtidos com cada uma das técnicas propostas foram mensurados através da comparação da relação sinal-ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*) entre as imagens originais e

após a aplicação do pós-processamento, considerando também a distância absoluta das amplitudes indicadas na imagem para a real posição do defeito em cada imagem. Para esta avaliação, o SNR é definido pela diferença em decibel (dB) entre a indicação do defeito e os artefatos de maior amplitude presentes fora da região do defeito. Desta maneira, torna-se possível avaliar a influência dos algoritmos de pós-processamento na correta indicação do defeito e também permite relacionar a amplitude da indicação do defeito com a indicação de artefatos indesejados. Para o presente trabalho, esta relação foi construída utilizando-se um conjunto de 10% dos pixels da imagem, sendo estes os que representam as maiores amplitudes presentes na mesma. Os pixels de maior amplitude terão a tendência de ocorrer próximos à origem do gráfico desta avaliação, onde a distância para o defeito deverá se aproximar de zero.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

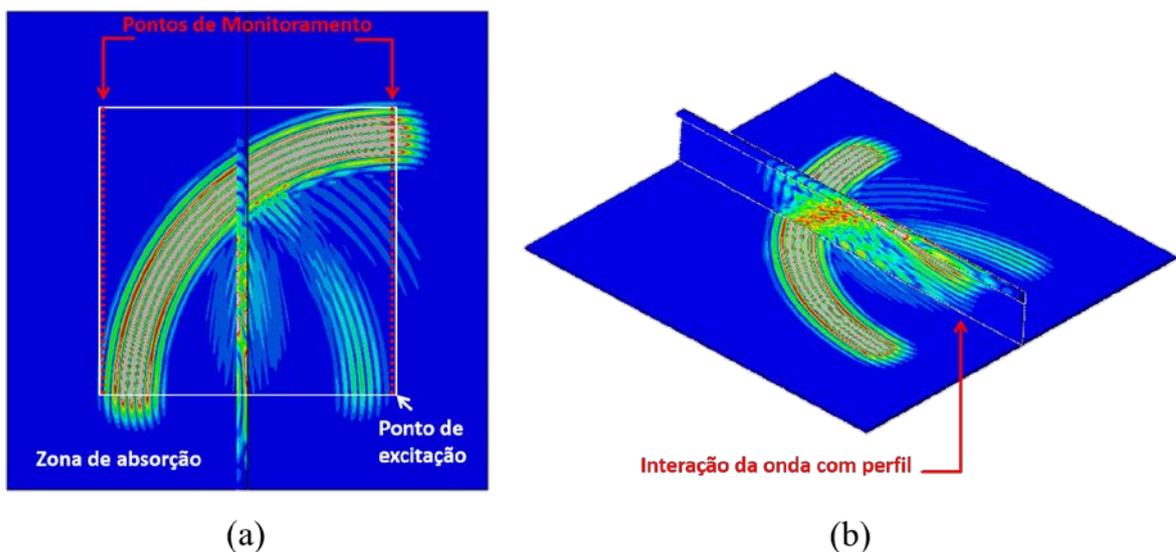
4.1 Seleção e Caracterização do Sistema de Transdução

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelos estudos realizados para a seleção e caracterização do sistema de transdução. São levantadas e discutidas características dos modos fundamentais que melhor atendem às necessidades do sistema de inspeção.

4.1.1 Interação dos Modos Fundamentais com Elementos Estruturais

Para cada um dos modos fundamentais e das frequências em estudo foram adquiridos os dados de amplitude dos modos emitidos e refletidos pelo perfil bulbo, obtendo-se então índices de reflexão e transmissão para cada um destes modos. Na Figura 24 pode ser vista como exemplo a propagação do modo SH_0 com frequência central de 30kHz.

Figura 24 – Modelo numérico para avaliação de índices de transmissão e reflexão. (a) Chapa plana contendo perfil bulbo. (b) Detalhe de seção do perfil bulbo HP400x12.



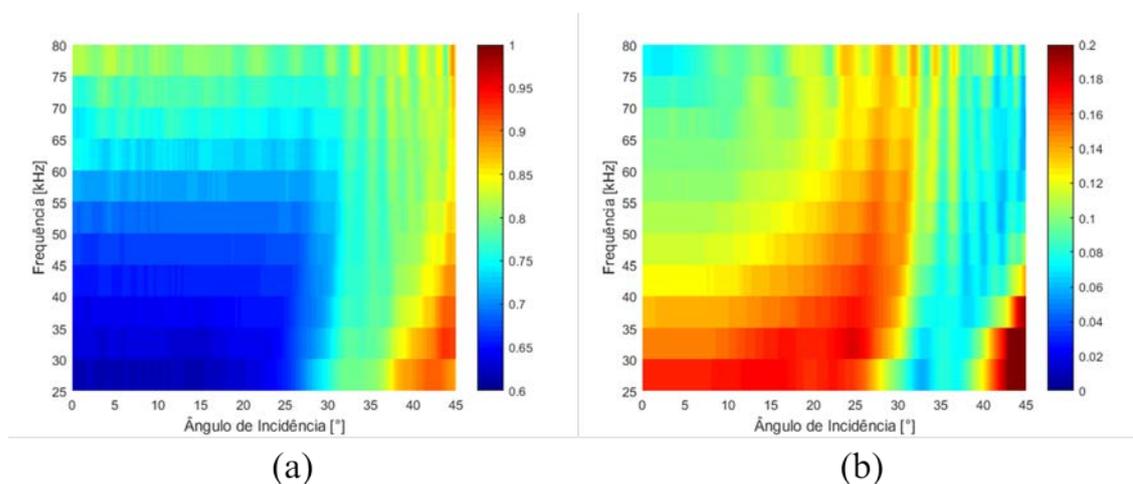
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

É possível notar através da Figura 24 (a) que mais do que um modo é refletido após a interação da frente de onda do modo SH_0 com o bulbo, possivelmente uma onda mais veloz como o S_0 . Este tipo de conversão de modo também influencia na energia total aplicada na

excitação, que não estará mais apenas na forma do modo emitido. Ao atingir o perfil bulbo, a perturbação acaba se propagando pelo mesmo até atingir sua parte superior, refletindo e retornando para a chapa, podendo formar também uma segunda frente de onda, conforme pode ser visto na Figura 24 (b). Todas estas interações consomem energia do sinal inicialmente enviado, diminuindo a intensidade do mesmo e gerando sinais indesejáveis na chapa que poderão interferir na localização de um dano na estrutura.

Através do procedimento descrito na seção 3.4.1 foram calculados os índices de transmissão e de reflexão para cada modo fundamental em função do ângulo de incidência e da frequência de excitação. Na Figura 25, Figura 26 e Figura 27 são apresentados os índices de transmissão e reflexão para os modos A_0 , S_0 e SH_0 , respectivamente.

Figura 25 – Interação do modo A_0 com o perfil bulbo em função do ângulo de incidência e frequência de excitação. (a) Índice de Transmissão. (b) Índice de reflexão.

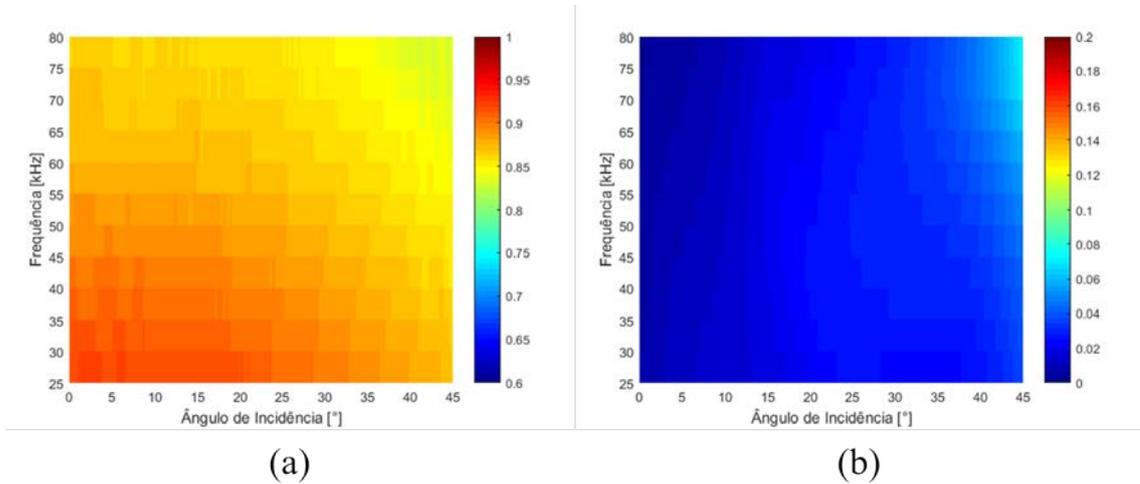


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Avaliando os resultados obtidos para o modo A_0 , nota-se que os índices de transmissão estiveram próximos à valores entre 0,6 e 0,7 para grande parte das frequências e ângulos analisados. Em frequências maiores de 70kHz e ângulos de incidência maiores de 35° estes valores foram maiores, próximos a 0,8. Os índices de reflexão obtidos para este modo permaneceram em uma faixa entre 0,12 e 0,20 para grande parte das medidas, valores de 0,08 são apresentados em ângulos maiores de 35° . Já para o modo S_0 os valores de índices de transmissão foram um superiores, se mantendo entre 0,85 e 0,9. No caso dos índices de reflexão, o modo S_0 foi o que apresentou os menores valores, os quais ficaram próximos de

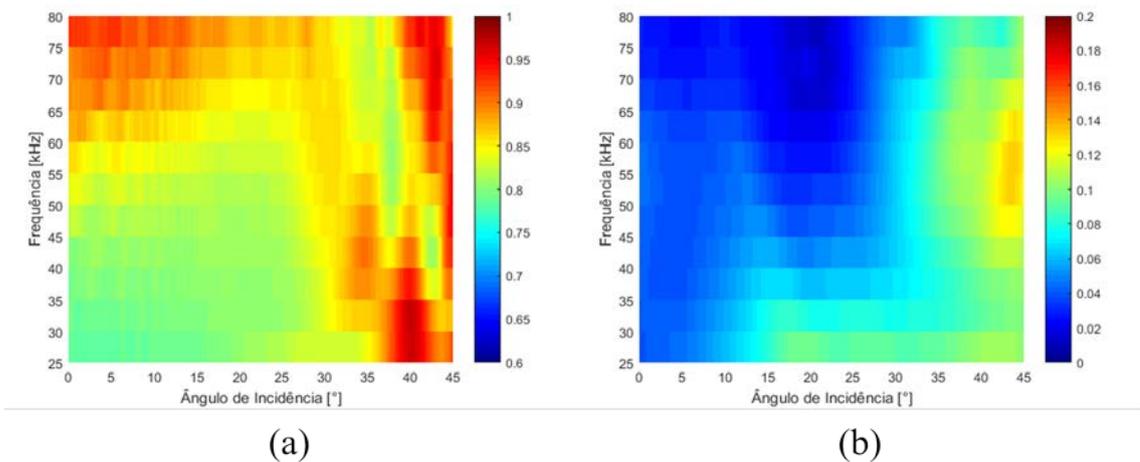
0,03 para a maioria das frequências. Apenas para frequências acima de 70kHz e ângulos de incidência próximos a 45° que estes valores chegaram perto de 0,07.

Figura 26 – Interação do modo S_0 com o perfil bulbo em função do ângulo de incidência e frequência de excitação. (a) Índice de Transmissão. (b) Índice de reflexão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 27 – Interação do modo SH_0 com o perfil bulbo em função do ângulo de incidência e frequência de excitação. (a) Índice de Transmissão. (b) Índice de reflexão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

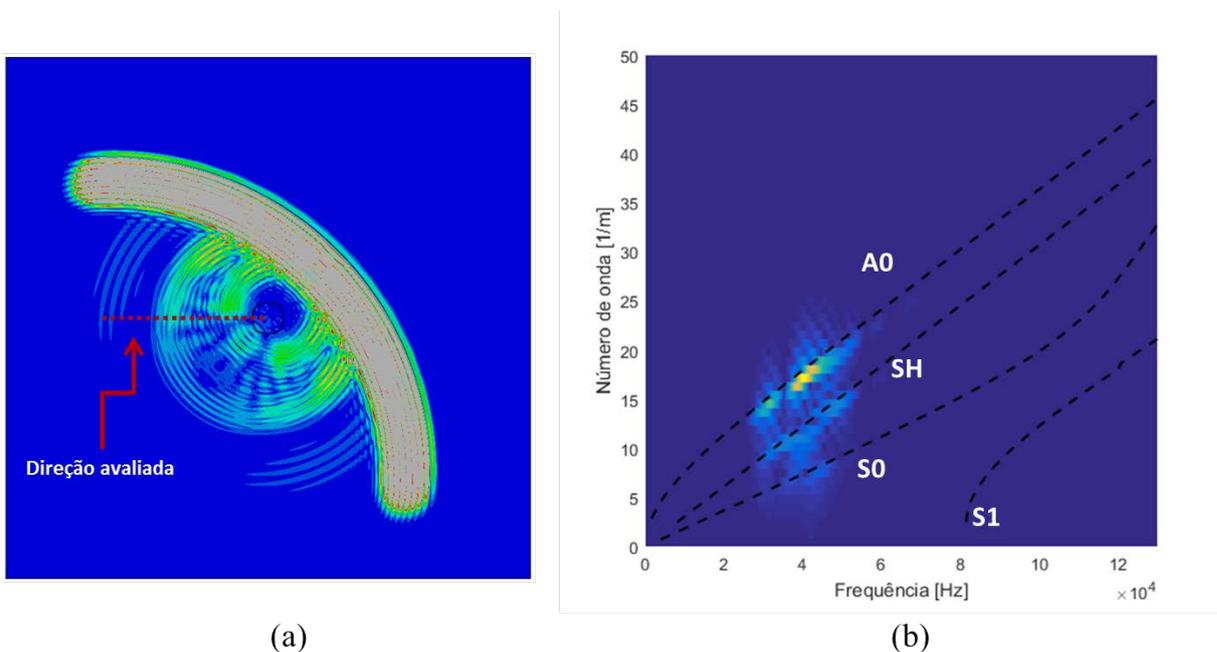
O modo SH_0 apresentou índices de transmissão que variaram em uma faixa de 0,8 a 0,9 em média. Neste modo, os índices de reflexão apresentaram variações entre 0,02 e 0,08.

Para valores de frequência entre 50 e 65kHz e ângulos de incidência próximos de 45° estes valores foram superiores, próximos de 0,12. Os resultados apresentados para índices de transmissão e reflexão para cada um dos modos fundamentais serão posteriormente considerados e discutidos onde é avaliada a escolha do melhor modo de operação do transdutor.

4.1.2 Interação dos Modos Fundamentais com Perda de Espessura

Cada modelo de perda de espessura testado foi processado para cada um dos modos fundamentais, de maneira a se obter o padrão de espalhamento gerado para cada caso. Na Figura 28 (a) é apresentado um exemplo do espalhamento gerado para o caso do modo SH_0 emitido a 45kHz interagindo com o defeito de 20% de perda de espessura. Na Figura 28 (b) é mostrado o resultado da transformada de Fourier espacial na direção indicada na Figura 28 (a), onde pode-se notar com clareza a presença dos modos A_0 e SH_0 refletidos na direção indicada.

Figura 28 – Interação do modo SH_0 emitido a 45kHz com o defeito de 20% de perda de espessura. (a) Magnitude dos deslocamentos. (b) Relação $f \times k$ apresentada pela FFT2D na direção avaliada.

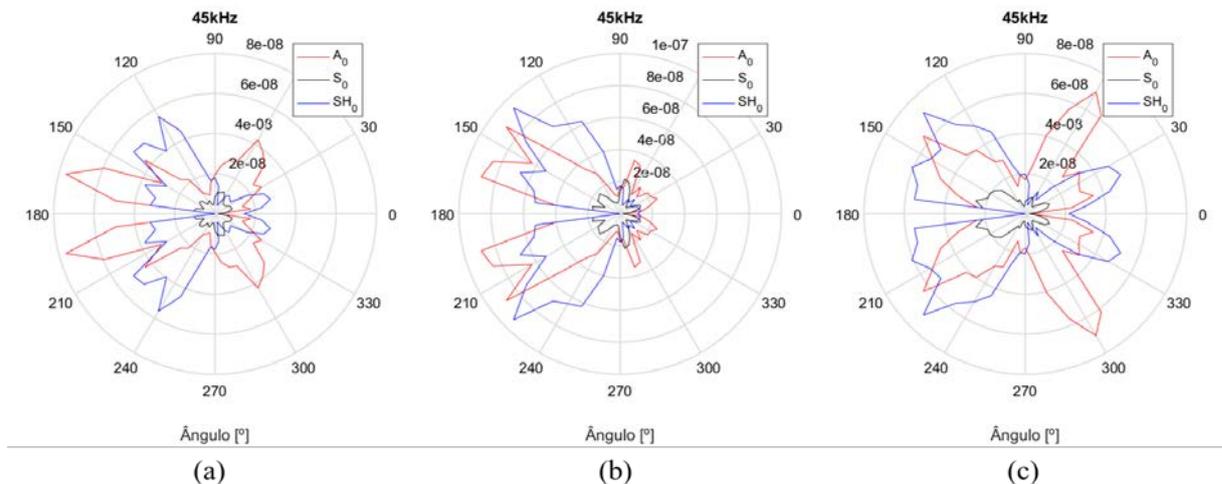


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Através do levantamento do padrão de espalhamento para cada ângulo medido, é possível construir uma representação em coordenadas polares dos modos resultantes da interação com o defeito. Nesta subseção serão apresentados resultados representativos para cada um dos modos fundamentais testados. Os resultados obtidos para todas as frequências de excitação e perdas de espessura são apresentadas do APÊNDICE A ao APÊNDICE I.

Na Figura 29 e na Figura 30 são apresentados os resultados obtidos para o padrão de espalhamento do modo SH_0 em 45kHz e 75kHz, respectivamente, para as três profundidades do defeito testado. Para todas as imagens a seguir, considera-se que a onda foi originalmente emitida no sentido de 0° à 180° , portanto: amplitudes registradas entre 0° e 90° representam uma reflexão do defeito e amplitudes registradas entre 90° e 180° representam um espalhamento frontal da onda originalmente emitida. As figuras foram apresentadas em um intervalo de 0 - 360° para facilitar a visualização, considerando que o padrão registrado pelo modelo é simétrico.

Figura 29 – Padrão de espalhamento do modo SH_0 à 45kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.

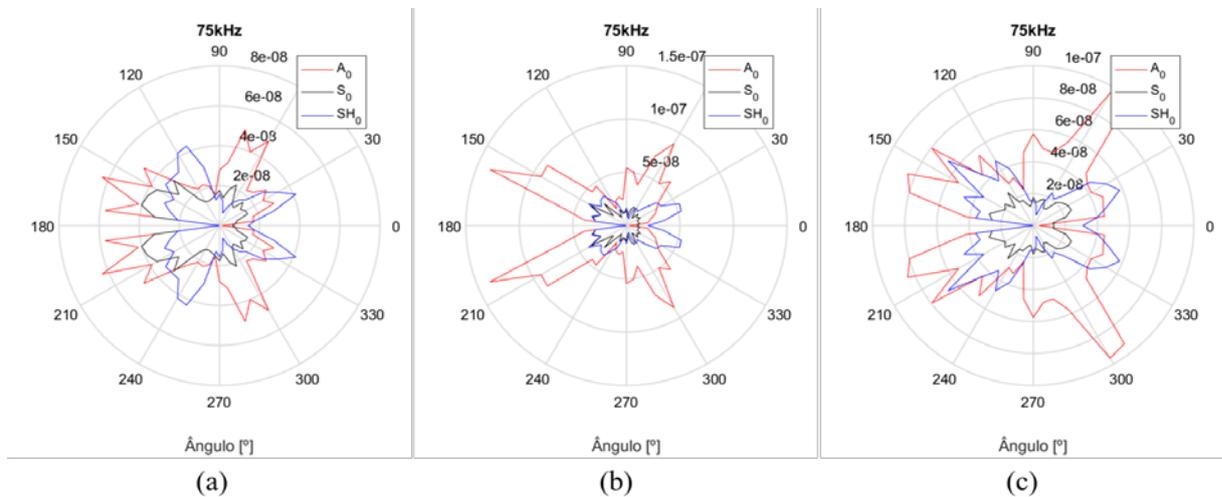


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Avaliando os modos originados da interação do modo SH_0 a 45kHz com os defeitos simulados, percebe-se que existe uma presença predominante dos modos SH_0 e A_0 oriundos desta interação. O modo S_0 também é gerado, porém em menores amplitudes. De maneira

geral, tanto o modo SH_0 quanto o modo A_0 espalhados pelo defeito apresentaram um espalhamento amplo ao longo do intervalo de $0-360^\circ$, com exceção dos ângulos de 0° e 180° para o modo A_0 e dos ângulos de 65° e 180° para o modo SH_0 . Na interação da onda com o defeito a 75kHz , o modo SH_0 apresenta um comportamento semelhante, mantendo um espalhamento amplo ao longo do intervalo de $0-360^\circ$. O modo A_0 também apresenta um comportamento semelhante ao anterior, porém com amplitudes maiores, se destacando em relação aos outros modos fundamentais. O modo S_0 neste caso também apresentou maiores amplitudes, sendo estas muito próximas às amplitudes do modo SH_0 para o defeito de 20% de perda de espessura.

Figura 30 – Padrão de espalhamento do modo SH_0 à 75kHz . (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.

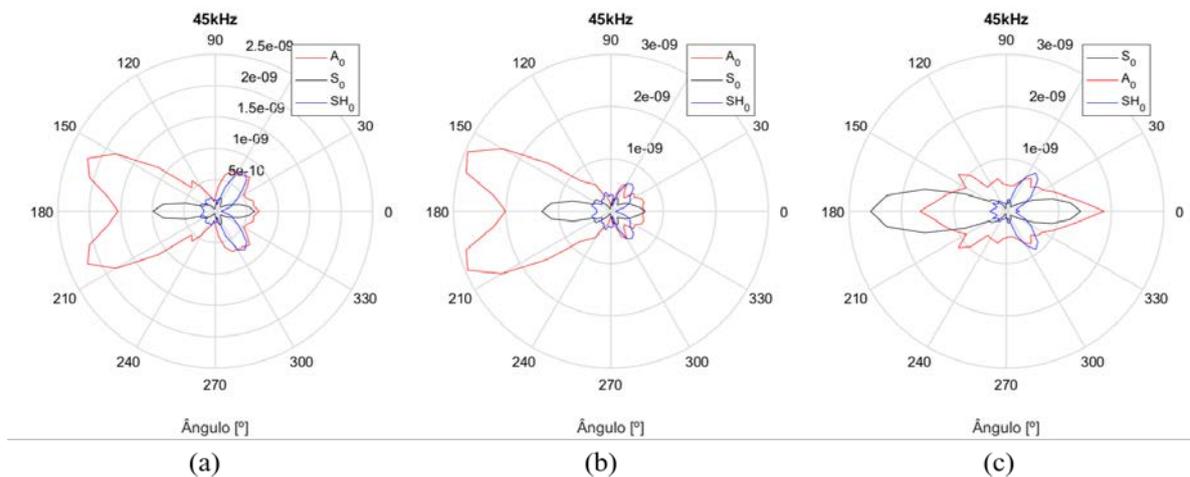


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O padrão de espalhamento gerado pela emissão do modo S_0 à 45kHz e 75kHz pode ser visto na Figura 31 e Figura 32, respectivamente. Para a frequência de 45kHz , nota-se que na interação com o defeito é gerado o modo A_0 em amplitudes superiores aos outros dois modos de propagação em grande parte da faixa de frequências analisada, o qual apresenta uma direcionalidade bastante ampla, se propagando em praticamente todas as direções no intervalo avaliado. Os modos SH_0 e S_0 são espalhados em faixas mais restritas e com amplitudes geralmente menores, com exceção do modo S_0 para o defeito de 60% de perda de espessura, onde o mesmo apresentou as maiores amplitudes entre os modos para um espalhamento de

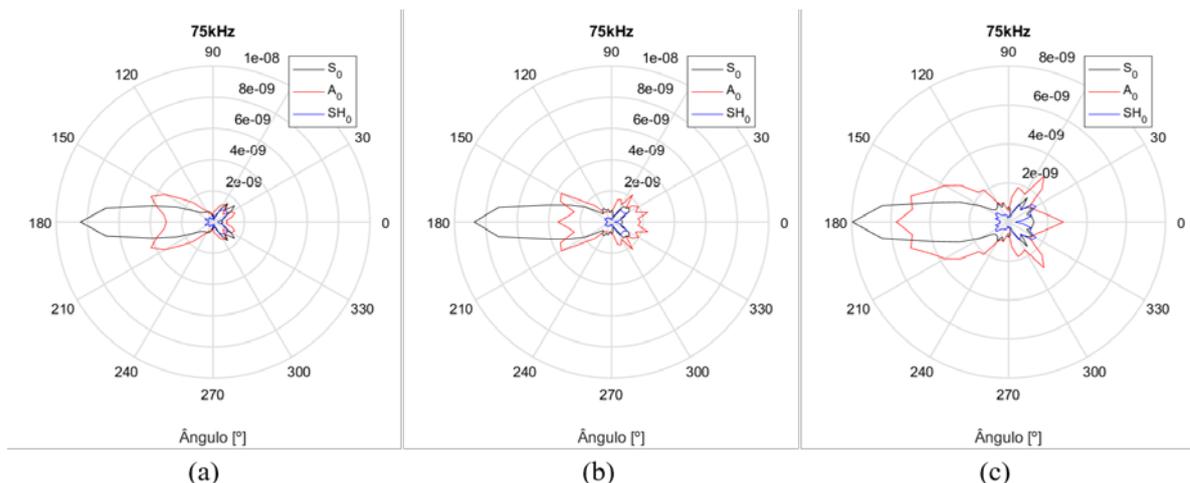
180° . O modo S_0 é refletido e espalhado preferencialmente nas direções de 0° e de 180° , apresentando amplitudes muito baixas para as demais direções de propagação a partir do defeito. Para 75kHz o comportamento dos modos foi semelhante, com exceção ao espalhamento do modo S_0 para 180° , onde as amplitudes apresentadas foram consideravelmente maiores do que as dos demais modos. Este comportamento ocorreu para os casos em que o modo S_0 foi emitido em frequências superiores a 70kHz.

Figura 31 – Padrão de espalhamento do modo S_0 à 45kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

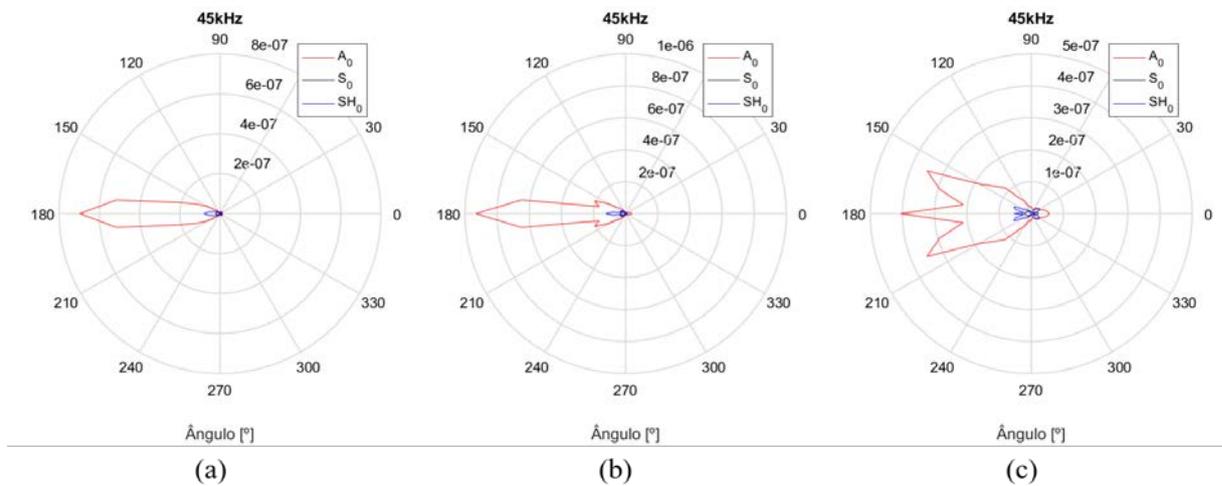
Figura 32 – Padrão de espalhamento do modo S_0 à 75kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os resultados obtidos para o padrão de espalhamento do modo A_0 em 45kHz e 75kHz são apresentados na Figura 33 e na Figura 34, respectivamente. Percebe-se que, em comparação com os outros dois modos fundamentais, a interação do modo A_0 para todas as profundidades apresentou uma reflexão e espalhamento frontal frequentemente com o modo A_0 apresentando maiores amplitudes que os demais. Esta característica foi observada também para 75kHz e para a maioria das frequências avaliadas.

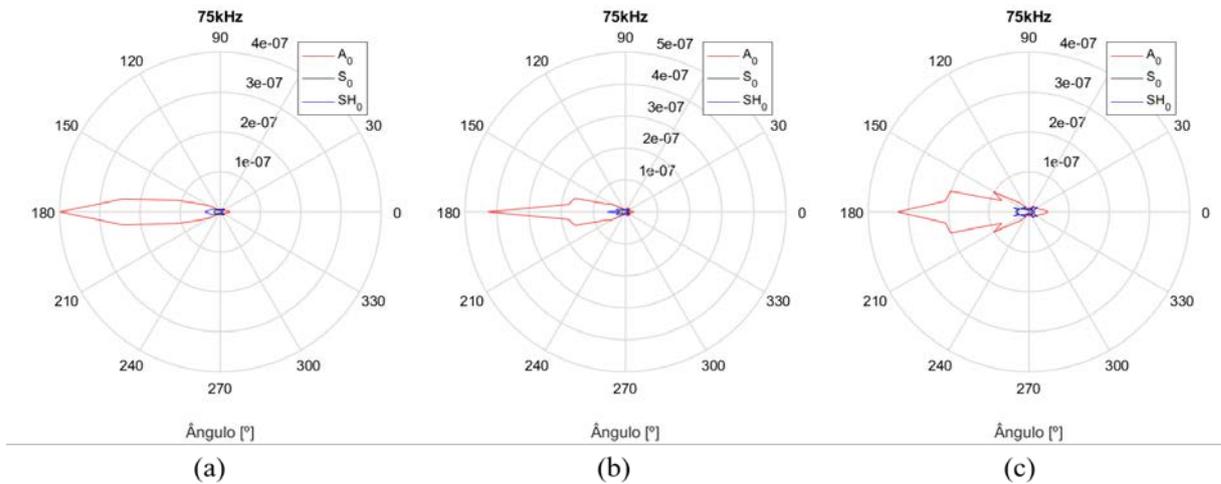
Figura 33 – Padrão de espalhamento do modo A_0 à 45kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

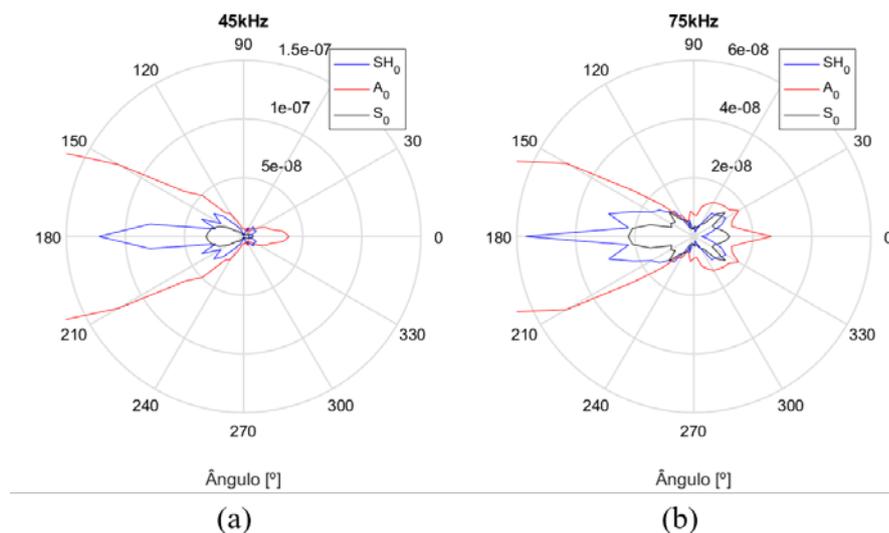
Para uma melhor visualização do padrão de direcionalidade dos demais modos, são apresentados como exemplo na Figura 35 os mesmos padrões de direcionalidade para perda de 40% de espessura a 45kHz e 75kHz em uma escala diferente. Padrões similares foram encontrados para as demais perdas de espessura.

Figura 34 – Padrão de espalhamento do modo A_0 à 75kHz. (a) 20% de perda de espessura. (b) 40% de perda de espessura. (c) 60% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 35 – Padrão de espalhamento do modo A_0 para 40% de perda de espessura. (a) Emissão a 45kHz. (b) Emissão a 75kHz.



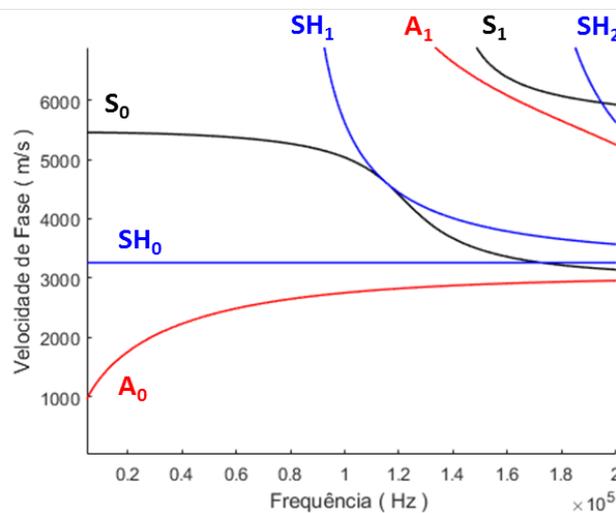
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Avaliando os resultados apresentados pela Figura 35, percebe-se que no sentido de 180° também são espalhados os modos S_0 e SH_0 , este último com maiores amplitudes. Além disso, nota-se que todos os três modos fundamentais também são refletidos a 0° , sentido

contrário à propagação original da onda. Entre os modos refletidos, novamente o modo A_0 apresentou amplitudes superiores aos demais modos. Entretanto, nenhum dos modos apresentou amplitudes consideráveis nas direções perpendiculares à propagação original.

A característica apresentada para o espalhamento da onda A_0 e da onda S_0 (em frequências acima de 70kHz) em ângulos próximos de 180° pode ser explicada pela mudança na velocidade de fase que estes modos apresentam nestas faixas de frequência. Na Figura 36 é mostrada a curva de dispersão de uma chapa de aço carbono com as propriedades do modelo numérico, onde pode ser vista a variação da velocidade de fase em função da frequência. Nota-se que o modo A_0 apresenta variações na velocidade de fase para toda a faixa de frequências analisada, enquanto que o modo S_0 inicia a apresentar variações mais acentuadas a partir de 65kHz.

Figura 36 – Curvas de Dispersão para uma chapa de aço carbono de 20mm de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Ao passar pela região do defeito com uma perda de espessura, a onda emitida se propaga por uma região onde o guia de ondas corresponde a uma chapa com espessura distinta da original. Desta maneira, pode-se considerar que na região do defeito a onda se propaga com velocidade de fase conforme a curva de dispersão de uma estrutura distinta da apresentada na Figura 36. Em pontos da curva de dispersão onde determinado modo apresenta velocidade praticamente constante, pequenas variações de velocidade podem passar despercebidas ao se considerar curvas de dispersão para outra espessura próxima. No entanto,

em regiões onde as curvas apresentam maiores variações de velocidade, uma pequena mudança na geometria pode apresentar uma variação considerável na velocidade de fase para determinada frequência, tal efeito é utilizado inclusive para a geração de imagens por algoritmos de tomografia. Visto que os diagramas polares são construídos utilizando a diferença entre os sinais propagados entre os modelos, a variação na velocidade de fase resulta em uma grande diferença para 180° , por se tratar do sentido que a frente de onda originalmente estava se propagando.

Diferenças obtidas na interação da onda com o defeito na direção da propagação da onda originalmente emitida são importantes para a detecção do defeito, no entanto, uma propagação muito direcionada em um arranjo de sensores esparsos pode passar despercebida por alguma entre os sensores do conjunto. Uma maior chance de detecção dentro de um arranjo esparsos pode ser obtida com ondas espalhadas em um intervalo angular mais amplo.

É importante ressaltar que cada diferente profundidade e dimensão de defeito encontrado deverá apresentar uma interação mais ou menos forte de acordo com o comprimento de onda de cada modo de propagação em função de sua frequência. Dentro da faixa de frequências estudada de 25kHz a 80kHz, os comprimentos de onda dos modos fundamentais para uma chapa de aço de 20mm de espessura variam aproximadamente de 7,6cm até 3,3cm para o modo A_0 , de 13cm até 4cm para o modo SH_0 e de 22,6cm até 6,6cm para o modo S_0 .

Percebe-se que o modo A_0 possui um comprimento de onda menor do que os demais. Desta forma, poderá apresentar uma interação maior com defeitos de dimensões menores na faixa de frequências analisada, dado que a interação da onda com determinado dano é favorecida quando este possui dimensões muito próximas aos seu comprimento de onda. Por outro lado, o modo S_0 deverá apresentar uma interação maior com defeitos maiores, pois o mesmo apresenta os maiores comprimentos de onda entre os três modos fundamentais.

4.1.3 Seleção de Transdutor Adequado

Avaliando os pontos levantados nos resultados apresentados anteriormente, além de características de propagação e de movimento dos modos considerados, foram feitas considerações sobre vantagens e desvantagens que cada modo pode apresentar para operar em um sistema de monitoramento de tanques de unidades FPSO. As considerações tomadas para

a escolha do modo de operação do sistema e conseqüentemente o tipo de transdutor adotado são apresentadas na presente subseção.

Em um sistema de monitoramento por ondas guiadas em chapas, é interessante de se trabalhar em uma faixa de frequências onde apenas os modos fundamentais estão presentes. A presença de modos de maior ordem pode dificultar o processamento dos sinais e a eficácia dos algoritmos de localização dada a maior quantidade de sinais se propagando concomitantemente na estrutura. Ao se considerar uma chapa de aço carbono de 20mm de espessura como uma estrutura representativa das paredes do tanque, pode-se tomar as curvas de dispersão apresentadas até 200kHz na Figura 36 para avaliação. Percebe-se que até cerca de 90kHz apenas os modos fundamentais estão presentes. Quando é emitido um pulso na estrutura, como por exemplo um sinal *Toneburst*, é gerado um sinal composto por uma banda de frequências, apresentando uma frequência central e uma dada largura de banda. Para o presente trabalho foi estipulado que na operação de emissão os pulsos sejam operados com frequência central de até 70kHz, com a intenção de evitar que modos de ordem maior sejam emitidos.

Os resultados levantados para os índices de transmissão apontaram os maiores valores para o modo S_0 na faixa de frequências analisada, embora o modo SH_0 também tenha apresentado valores semelhantes ao se considerar frequências acima de 40kHz. O modo A_0 apresentou valores menores que os outros dois, indicando que este modo teria um alcance limitado em relação aos demais para este tipo de estrutura. Avaliando os índices de reflexão, o modo S_0 apresentou novamente a melhor performance, com os menores índices de reflexão. O modo SH_0 apresentou índices intermediários e o modo A_0 apresentou os maiores índices de reflexão. Altos índices de reflexão dos bulbos são indesejados, visto que parte da energia da frente de onda será refletida e isso terá um impacto na amplitude da mesma.

Ao se avaliar o espalhamento dos modos frente à interação com defeitos de perda de espessura, procura-se um modo que possua a característica de se propagar no máximo de direções após uma interação, para que este possa ser detectado pela maioria dos sensores de um arranjo esparso. O espalhamento apresentado pelo modo SH_0 foi bastante amplo para os casos testados, apresentando poucas direções onde este tipo de onda não foi espalhado. Desta interação também foi gerada uma considerável quantidade do modo A_0 , no entanto, espera-se que um sensor que trabalhe com o modo SH_0 , seja pouco sensível aos deslocamentos fora do plano característicos do modo A_0 . O modo S_0 apresentou um desempenho menos interessante

para o espalhamento da onda, pois o mesmo se propagou de forma mais intensa apenas nas direções de 0° e 180° . Além disto, apresentou grande conversão de energia para os demais modos, que apresentaram amplitudes maiores em vários dos casos analisados. Para frequências de emissão mais altas a amplitude do modo S_0 foi maior, no entanto se estaria em uma faixa de trabalho menos interessante dada a possibilidade da propagação de modos de maior ordem na estrutura. O modo A_0 , embora tenha apresentado uma alta interação com o defeito quando avaliado no sentido de 180° , apresentou baixas amplitudes de espalhamento para 90° e 270° .

Outro ponto importante a ser considerado é o comprimento de onda apresentado por cada um dos modos fundamentais. Estudos presentes na literatura realizados com os modos fundamentais de propagação em chapas (DILIGENT et al., 2002; LOWE et al., 2002; RATASSEPP et al., 2008) indicam que a sensibilidade destes modos frente à certos defeitos apresenta um aumento a partir de determinado percentual do comprimento de onda. Comprimentos de onda menores, portanto, são capazes de apresentar uma maior sensibilidade a defeitos de menores dimensões. Comparando os modos fundamentais, o modo A_0 apresenta os menores comprimentos de onda, o modo SH_0 apresenta comprimentos de onda intermediários e o modo S_0 apresenta comprimentos de onda maiores, tendo assim, por este critério, menores chances de detectar um defeito com menores dimensões. Como alternativa para aumentar a sensibilidade utilizando o modo S_0 , pode-se operar em frequências mais altas, porém isso é limitado para a presente aplicação pela possibilidade de se excitar modos de maior ordem na estrutura.

Além do comprimento de onda, a forma de movimento de cada um dos modos também é importante. Modos de propagação que apresentam movimentos preferencialmente dentro do plano do guia de onda terão menor energia dissipada devido ao contato deste guia com algum tipo de fluido. O modo A_0 apresenta uma desvantagem em relação aos demais neste aspecto, pois o mesmo possui movimentos significativos fora do plano do guia de ondas, os quais deverão sofrer maior atenuação caso a estrutura do tanque em análise esteja carregada, seja ele um tanque de carga ou de lastro. Além da possibilidade de os tanques estarem carregados, existe a possibilidade de um tanque de carga estar descarregado durante uma possível inspeção. Neste caso, o mesmo apresenta resíduos de óleo e borra aderidos às suas paredes e a escolha de um modo cuja energia esteja contida no plano da estrutura também é vantajosa. Os modos A_0 e S_0 (este em menor proporção), por possuírem

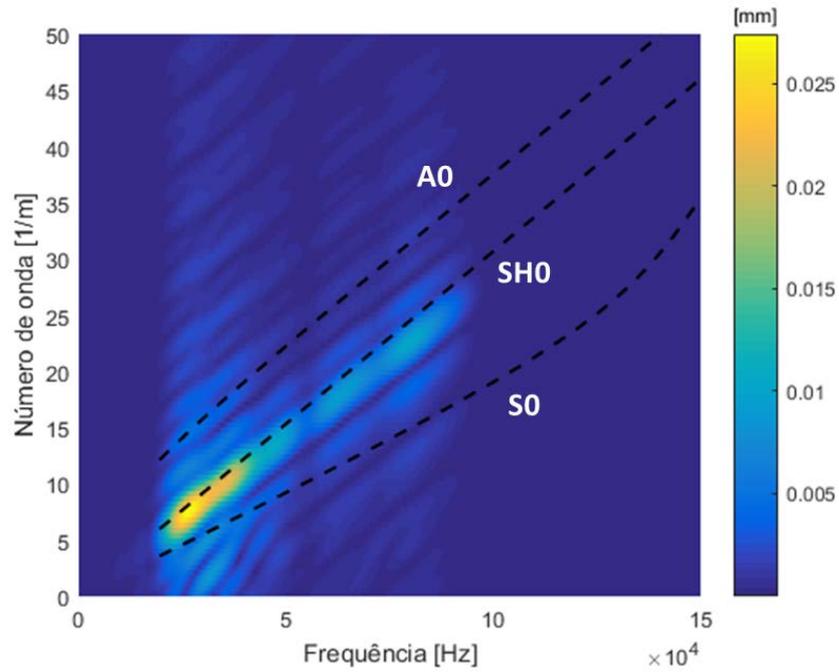
movimentos fora do plano, são mais atenuados devido à perda de energia pela formação de ondas longitudinais no fluido, conforme explicado em (SIMONETTI, 2004; MAZZOTI et al., 2013). Já o modo SH_0 teoricamente não sofre este tipo de atenuação por possuir apenas movimentos cisalhantes no plano da estrutura, o mesmo sofre atenuação em menor proporção devido à dissipação de energia pelo acoplamento viscoso entre fluido e estrutura (FENG et al., 2013). O efeito da dispersão também afeta o modo A_0 negativamente para esta aplicação, visto que este aumenta a duração do sinal e diminui sua amplitude. Os modos SH_0 e S_0 (este último para a faixa de frequências considerada) apresentam pouca ou nenhuma dispersão, podendo apresentar vantagens para a obtenção de uma melhor resolução na detecção de falhas na estrutura.

Considerando todos os pontos levantados na discussão apresentada, optou-se pela utilização do modo SH_0 para a aplicação no sistema de monitoramento das chapas dos cascos da unidade FPSO. Embora este modo não tenha apresentado as melhores características entre os modos avaliados a respeito de coeficientes de reflexão e de transmissão, e tenha apresentado comprimentos de onda intermediários, este demonstrou ser o modo que também possui menos pontos negativos em relação ao funcionamento do sistema no ambiente considerado. O sistema, portanto, deverá operar utilizando um transdutor que emita e receba o modo SH_0 de forma omnidirecional, de forma que sejam aplicadas técnicas de imagem para localização do defeito em dada região da estrutura onde um arranjo dos mesmos esteja presente.

4.1.4 Avaliação do Transdutor – Modos Emitidos e Relação de Amplitudes

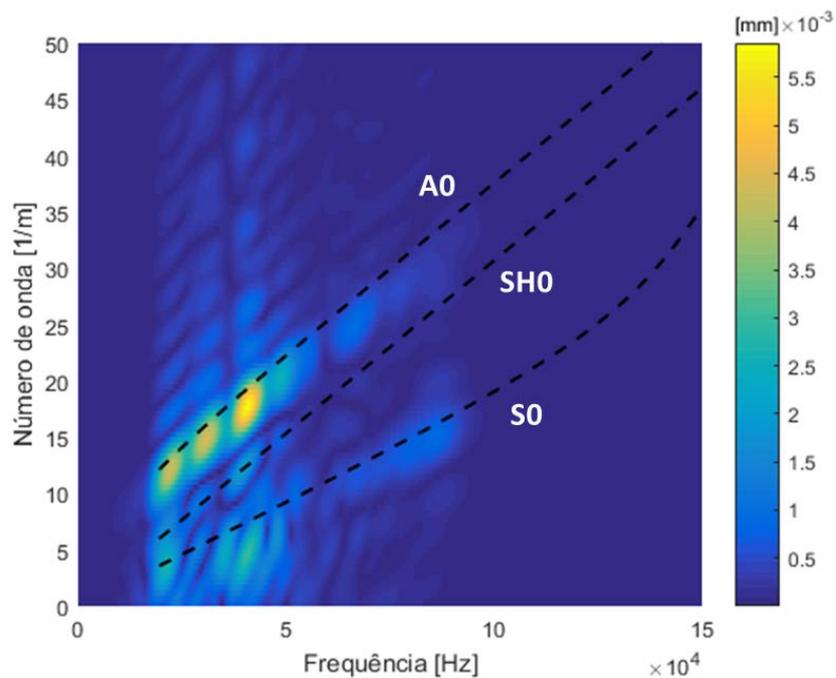
Os resultados obtidos através da transformada de Fourier espacial indicaram quais os modos que foram emitidos pelo transdutor e detectados pelo sistema de interferometria óptica. As Figuras 37, 38 e 39 apresentam os resultados obtidos para os deslocamentos transversais no plano, longitudinais no plano e fora do plano, respectivamente.

Figura 37 – Relação $f \times k$ apresentada pela FFT2D dos deslocamentos na direção transversal no plano da chapa.



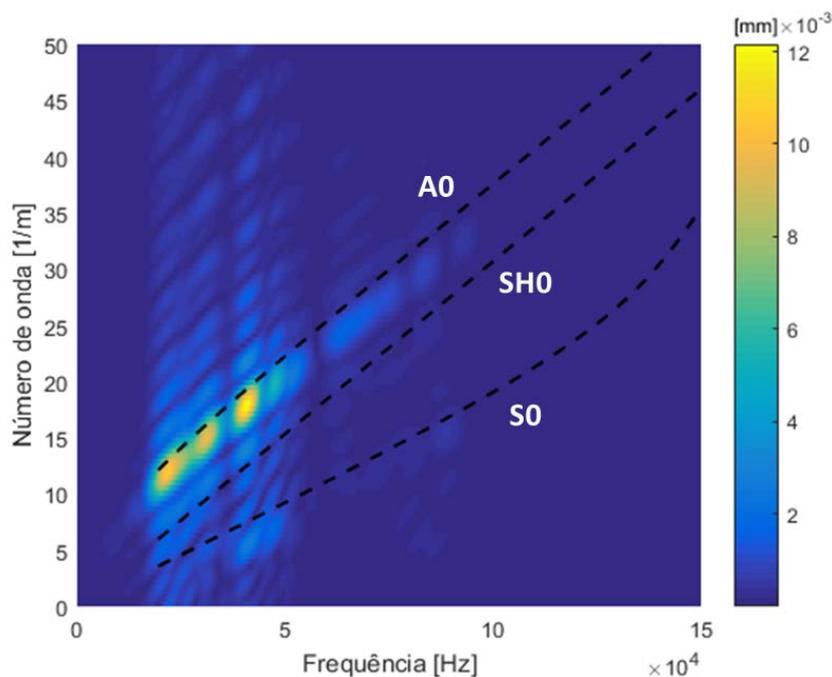
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 38 – Relação $f \times k$ apresentada pela FFT2D dos deslocamentos na direção longitudinal no plano da chapa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 39 – Relação $f \times k$ apresentada pela FFT2D dos deslocamentos fora do plano da chapa.



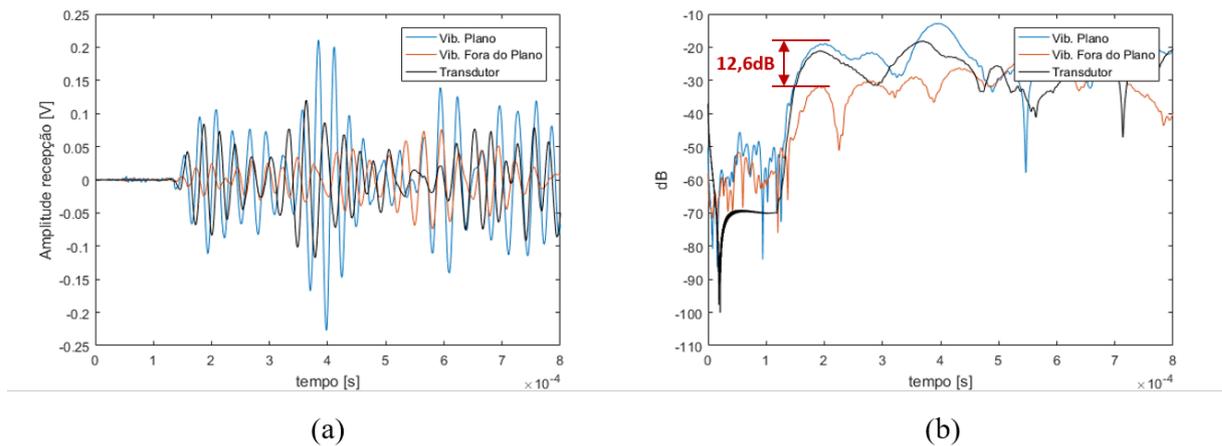
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Avaliando os resultados apresentados, percebe-se que o modo SH_0 representado pelos deslocamentos transversais apresentou as maiores amplitudes entre os modos emitidos. Conforme a Figura 37, o modo possui resposta com maiores amplitudes entre 30kHz e 45kHz, para frequências maiores esta amplitude apresenta valores menores. Este comportamento é também descrito em (MENIN, CLARKE, 2018), sugerindo que a presença de uma peça de aço circular na parte inferior do conjunto não alterou de forma significativa a emissão do modo SH_0 . Os resultados apresentados na Figura 38 indicam a presença dos modos A_0 e S_0 , sendo estes os modos fundamentais que possuem movimentos no plano de forma longitudinal à emissão. Embora os movimentos no plano para o modo A_0 não sejam os seus movimentos preferenciais, estes apareceram com amplitudes maiores do que os apresentados para o modo S_0 . É possível identificar a presença do modo S_0 entre 30kHz e 50kHz, e também em frequências próximas de 70kHz com menores amplitudes. As amplitudes apresentadas para o modo S_0 foram consideravelmente menores do que as apresentadas para o modo SH_0 , atingindo níveis quase 10 vezes menores do que o modo de emissão desejado. A presença do modo A_0 é melhor descrita através da Figura 39, onde, assim como para o modo SH_0 , as maiores amplitudes estão presentes entre 30kHz e 45kHz. Os valores de amplitude do modo

A_0 atingem cerca de 45% dos valores de amplitude do modo SH_0 , porém este comportamento não é constante na faixa de frequências avaliadas, existindo faixas de frequência onde os valores são menores.

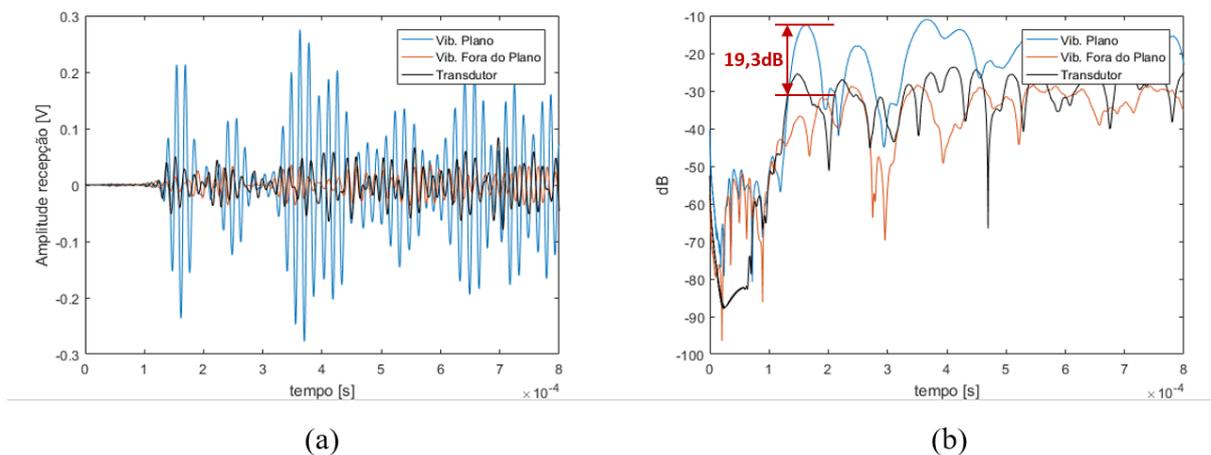
A avaliação da relação entre as amplitudes dos modos emitidos foi realizada com base no sinal adquirido no ponto mais próximo do transdutor receptor, desta forma também foi possível comparar e avaliar a sensibilidade de recepção do transdutor aos modos emitidos. A Figura 40 apresenta os deslocamentos transversais no plano (representando o modo SH_0) e os deslocamentos fora do plano (representando o modo A_0) juntamente com o sinal recebido pelo transdutor receptor para emissões com frequência central em 35kHz. Na Figura 41 são apresentados estes mesmos deslocamentos para emissões com frequência central de 65kHz. Esta análise foi realizada considerando apenas os deslocamentos transversais à emissão, visto que não foi possível de se identificar os deslocamentos longitudinais do modo S_0 com clareza devido aos baixos níveis de amplitude apresentados, muito próximos aos níveis de ruído das medições.

Figura 40 – Sinais adquiridos em emissão a 35kHz. (a) Escala em Volts. (b) Escala em dB.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 41 – Sinais adquiridos em emissão a 65kHz. (a) Escala em Volts. (b) Escala em dB.

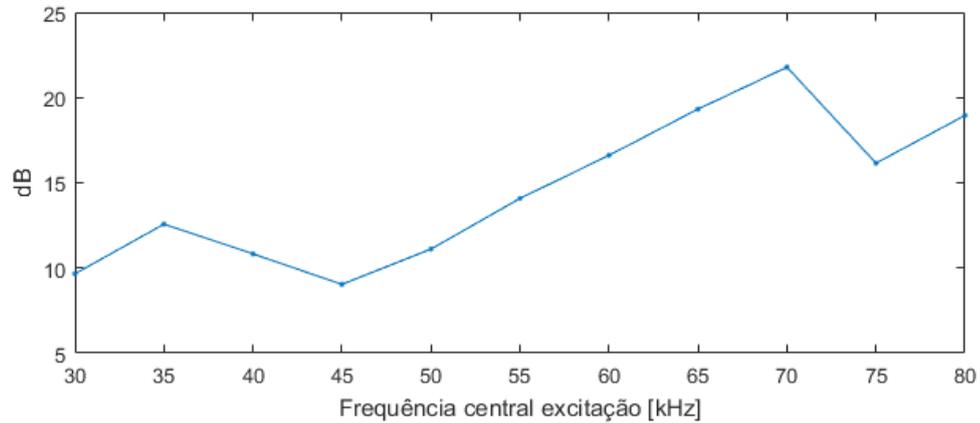


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Analisando-se os primeiros sinais de ambos os modos que chegam ao receptor, percebe-se que para as duas frequências apresentadas o sinal de recepção se assemelha muito ao sinal do modo SH_0 medido pelo vibrômetro. Esta característica, mais claramente vista na escala em dB, é um bom indício de que o transdutor está operando da maneira desejada mesmo com a inclusão de componentes extras ao projeto original, apresentando maior sensibilidade ao modo SH_0 do que ao modo A_0 . A comparação feita já não é possível após os primeiros pacotes, visto que o restante do sinal é oriundo de reflexões dos modos nas bordas da chapa, sendo inviável de definir quais modos são representados pelos sinais do vibrômetro.

Na Figura 40 (b) e Figura 41 (b) são indicadas as diferenças nos níveis de amplitude para os modos emitidos SH_0 e A_0 . Esta análise foi feita para as outras frequências testadas, onde os resultados são apresentados pela Figura 42. Os resultados obtidos apresentaram uma relação acima de 10dB entre os modos SH_0 e A_0 para praticamente toda a faixa de frequências analisada. Abaixo de 50kHz os níveis apresentados foram mais baixos devido à maior intensidade da emissão do modo A_0 . No entanto, considera-se viável a utilização do transdutor para emissão e recepção do modo SH_0 nos intervalos de frequência analisados, sabendo-se que em algumas frequências a incidência do modo A_0 poderá introduzir algum tipo de ruído ao resultado final.

Figura 42 – Relação entre os modos SH_0 e A_0 emitidos pelo transdutor.

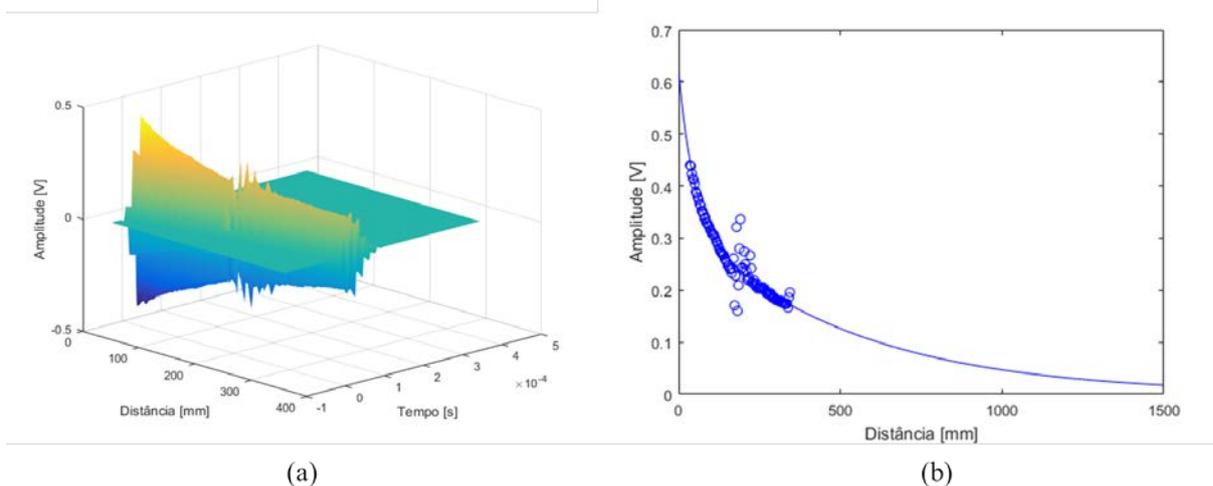


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4.1.5 Avaliação de Atenuação e Alcance do Sinal

As amplitudes adotadas para calcular o decaimento são exemplificadas através da Figura 43, onde os picos de cada medição da primeira frente de onda foram selecionados para formar a curva de decaimento da amplitude em função da distância. Os sinais transversais no plano medidos pelo vibrômetro foram utilizados para representar o modo SH_0 .

Figura 43 – Curva de decaimento da amplitude do modo SH_0 em 50kHz . (a) Primeira frente de onda medida pelos vibrômetros. (b) Curva de ajuste ao decaimento da amplitude dos picos em função da distância percorrida.

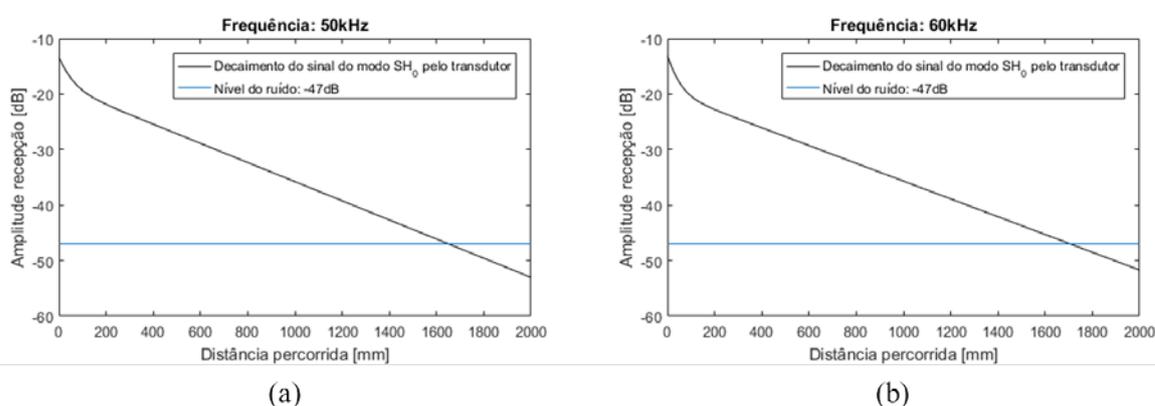


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Percebe-se que existe um decaimento da amplitude de acordo com a distância percorrida. Nota-se uma região onde este padrão não é seguido, próximo à 180mm de distância percorrida, possivelmente devido à algum erro de medição, como uma vibração excessiva do sistema durante estas medidas ou alguma irregularidade na superfície da chapa nesta região. Através das curvas de amplitude registradas foram geradas curvas de ajuste em cada frequência medida pelo sistema de vibrômetros, conforme exemplo para 50kHz apresentado na Figura 43. Cada curva gerada a partir dos dados de decaimento foi adequada para a sensibilidade do transdutor e apresentada em uma escala em dB. A Figura 44 apresenta o decaimento previsto para a amplitude dos sinais recebidos pelo transdutor em 50kHz e 60kHz, considerando que o nível de ruído elétrico encontra-se em -47dB.

Figura 44 – Curva de decaimento da amplitude de recepção do modo SH_0 pelo transdutor.

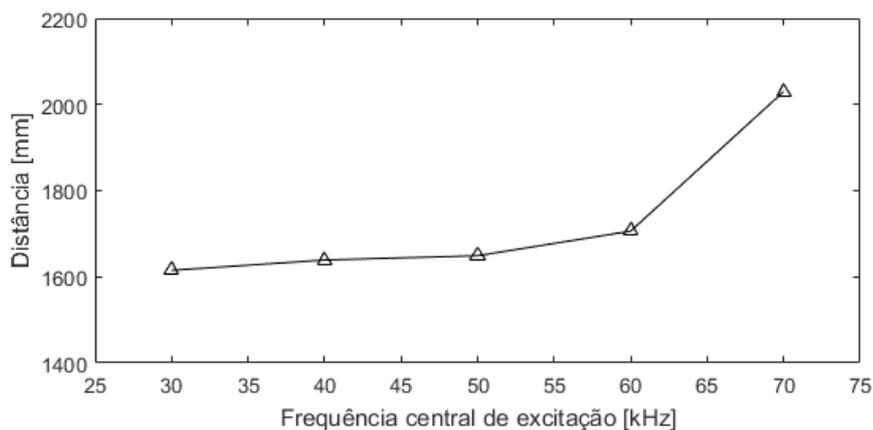
(a) Emissão de sinal a 50kHz. (b) Emissão de sinal a 60kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Percebe-se que para as duas frequências apresentadas o nível de amplitude da frente de onda emitida atinge o nível de -47dB estipulado para o ruído após percorrer entre 1600mm e 1700mm. A distância prevista para que a amplitude decaia até o nível de ruído de -47dB foi calculada para as demais frequências analisadas, os resultados obtidos são apresentados pela Figura 45.

Figura 45 – Projeção da distância percorrida pela frente de onda do modo SH_0 até atingir nível de -47dB de amplitude do sinal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Assim como para os casos apresentados anteriormente, para as demais frequências as distâncias atingidas pela frente de onda permaneceram em valores entre 1600mm e 1700mm até atingir o nível estipulado de -47dB . Para a emissão à 70kHz, esta distância foi maior, atingindo níveis próximos de 2000mm, o que possivelmente ocorreu devido à características de resposta no transdutor utilizado na recepção, que apresentou valores maiores de tensão próximos à 70kHz. Estas projeções servem como parâmetro para estipular uma distância mínima entre os transdutores de um arranjo fixados na estrutura. Os resultados indicam que uma distância menor do que 1500mm é recomendável, principalmente ao se considerar que a energia refletida pela onda após a interação com algum tipo de defeito corresponde apenas a um percentual da onda originalmente emitida. Para reduzir os níveis de ruído elétrico detectado pelo sistema, e consequentemente aumentar a distância de detecção da onda, medidas como o aumento do número de médias durante a aquisição do sinal e a utilização de um invólucro que blinde o sensor de ruídos são recomendáveis e podem aumentar a sensibilidade do sistema.

4.2 Testes em Estrutura em Escala Real

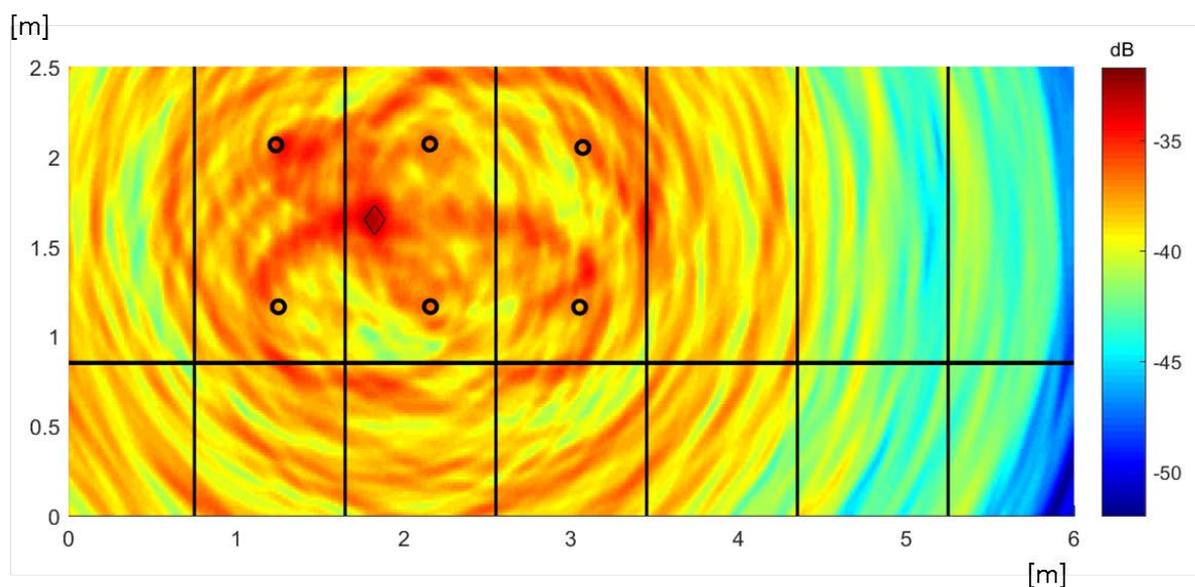
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através dos testes realizados na estrutura em escala real. Inicialmente são apresentados estudos preliminares para avaliação do arranjo de transdutores mais adequado para detecção dos defeitos e da melhor frequência de

operação. Em seguida são apresentados os resultados obtidos com o algoritmo DAS em função do crescimento do defeito e os resultados obtidos com os dois IDs testados.

4.2.1 Avaliação do arranjo de transdutores

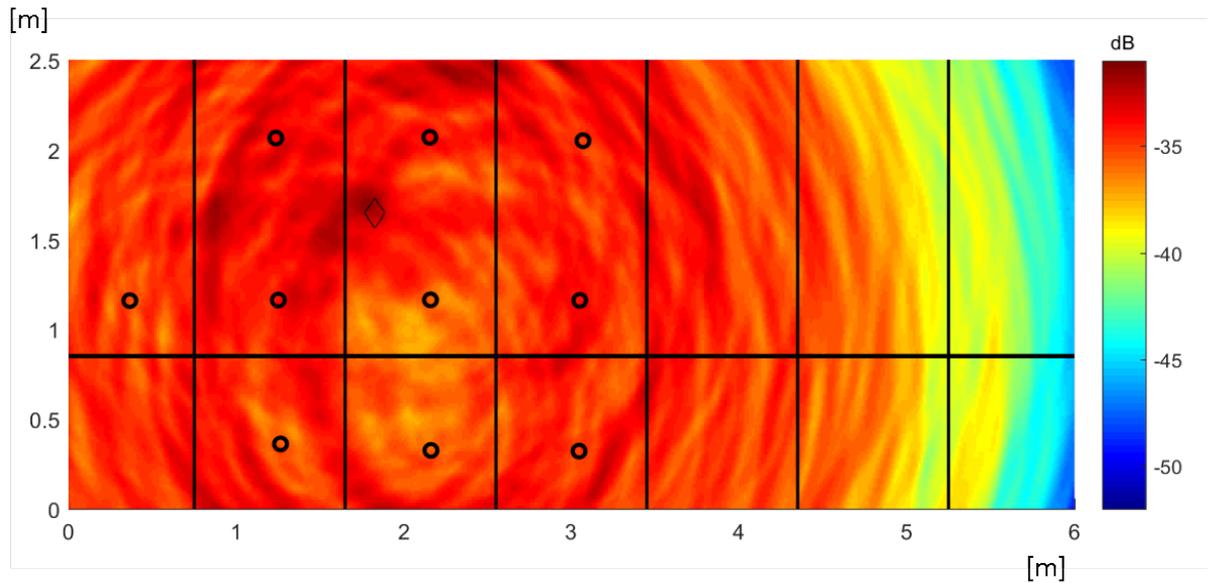
Considerando-se todos os 10 transdutores acoplados ao corpo de prova, existe uma série de combinações possíveis entre os mesmos para que possa ser formada uma imagem através do algoritmo DAS. Através do estudo preliminar comparando uma série de arranjos distintos foi possível se definir e fixar um arranjo adequado para a detecção dos defeitos para a geometria testada. Para exemplificar as diferenças geradas nos resultados de imagem com a utilização de arranjos distintos, são apresentadas a seguir 3 combinações diferentes para um mesmo tamanho de defeito (Defeito 1 com 50% de perda de espessura) e frequência de emissão (45kHz), as quais podem ser visualizadas pelas Figuras 46, 47 e 48. Para todos os resultados de imagem apresentados, os círculos pretos representam a posição dos transdutores cujos sinais foram utilizados para a geração da imagem pelo algoritmo DAS e o losango indica a posição do defeito no corpo de prova. As linhas pretas verticais e a linha horizontal representam os reforços estruturais do corpo de prova.

Figura 46 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Arranjo 1.



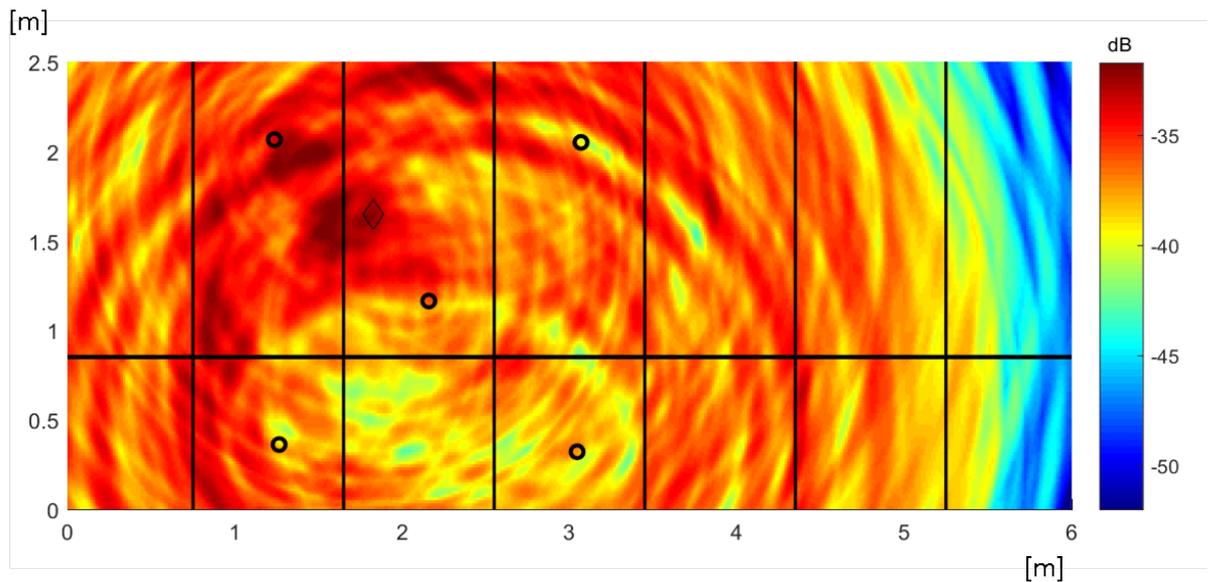
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 47 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Arranjo 2.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 48 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Arranjo 3.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Avaliando-se o arranjo 1, onde são utilizados 6 transdutores, nota-se que o defeito foi localizado com precisão ao se aplicar os algoritmos de imagem. Analisando o arranjo 2, onde

são utilizados os 10 transdutores mais próximos ao defeito, nota-se que o defeito também foi detectado, porém alguns artefatos estiveram presentes no resultado final com maior amplitude, podendo gerar uma interpretação errônea de falsos positivos. No terceiro caso (arranjo 3) são utilizados 5 transdutores com distâncias maiores entre si, onde dois destes se encontram abaixo do reforço transversal. Nesta configuração, a localização do defeito não foi satisfatória e, além disso, ainda foram gerados artefatos que podem indicar uma falsa detecção de defeitos.

Comportamentos semelhantes também foram observados em outras frequências e para outras profundidades de defeitos. Este comportamento notado permite que sejam feitas algumas constatações a respeito da escolha do conjunto de sensores para monitorar uma determinada região do casco. A primeira delas é a necessidade de uma distância mínima entre o conjunto de sensores e o defeito que se procura localizar. De maneira geral, sensores muito distantes da posição do defeito (com dois ou mais reforços estruturais entre o sensor e o defeito) não foram capazes de fornecer uma indicação precisa de sua localização devido à grande quantidade de reflexões vindas dos enrijecedores e das bordas da estrutura, as quais acabam se sobrepondo e dificultando a identificação dos sinais refletidos pelo defeito. Esse efeito pode ser visto na Figura 48, onde os sensores estão mais afastados e por vezes com mais de um enrijecedor entre eles. Outro ponto importante notado é que nem sempre uma maior quantidade de sensores auxilia para uma melhor detecção do defeito. Comparando a Figura 46 e Figura 47, nota-se que apenas os 6 primeiros sensores contribuem para a detecção do defeito com qualidade, e os demais utilizados apenas adicionam ruído ao resultado.

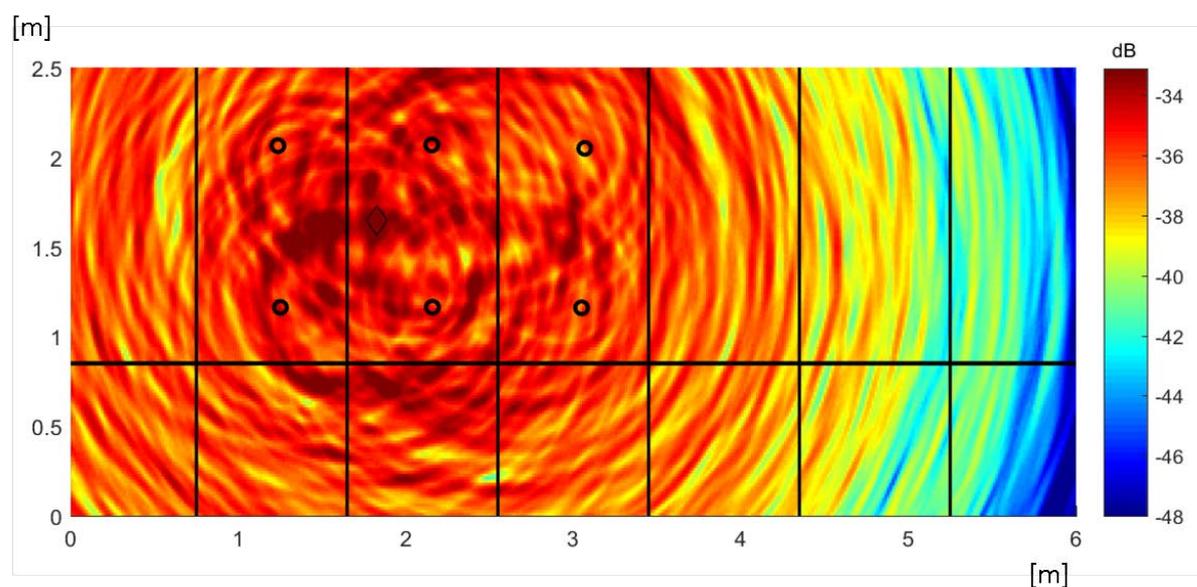
Configurações semelhantes às apresentadas, seja variando a posição de um ou dois sensores, ou então adotando um conjunto alternativo de sensores distantes do defeito, apresentaram resultados semelhantes aos ilustrados. Desta maneira, para avaliar a detecção de cada um dos diferentes defeitos pelo sistema, foi determinado um conjunto fixo de 6 sensores conforme o arranjo 1, o qual apresentou o melhor desempenho para todos os casos testados.

4.2.2 Avaliação da frequência de operação

A frequência de operação do sistema é mais um parâmetro de importante avaliação para definir-se uma configuração de operação do sistema a fim de se obter o melhor desempenho possível em relação à detecção e localização de defeitos. Neste contexto, todas as

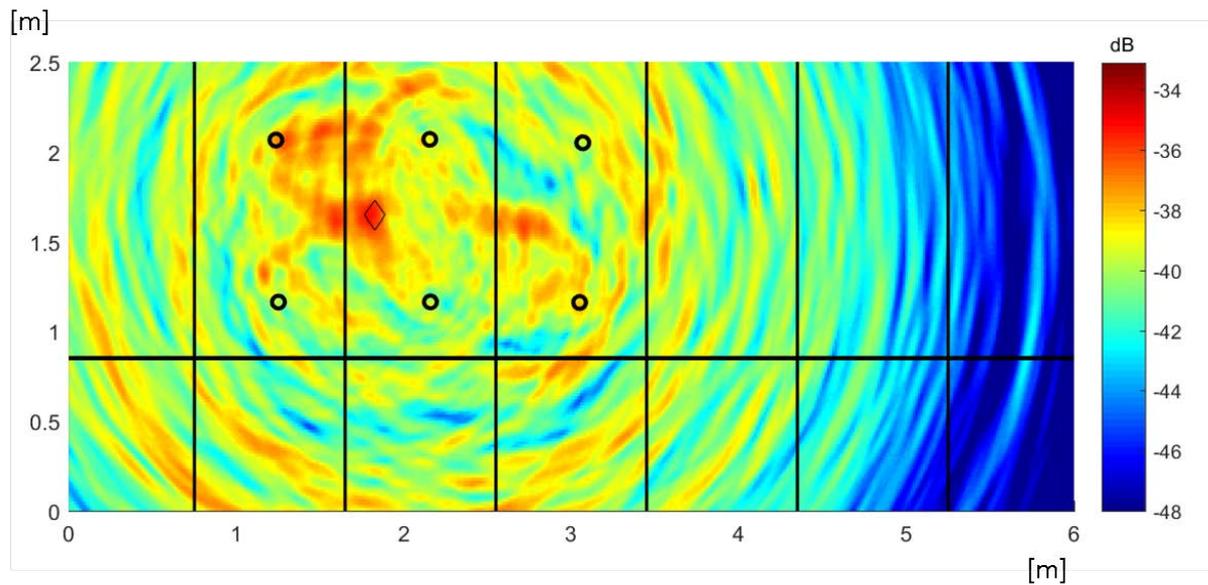
medições que foram realizadas entre 30kHz e 80kHz, em intervalos de 5kHz, foram avaliadas e os resultados obtidos com cada uma delas comparados entre si para se verificar a melhor faixa de operação do sistema. Avaliando os resultados para os diferentes defeitos e diferentes profundidades, uma característica comum entre eles foi a faixa de frequências em que os resultados com maior clareza na indicação do defeito foram obtidos. Esta faixa se manteve próxima sempre de frequências entre 40kHz e 50kHz. Para exemplificar, as Figuras 49, 50, 51 e 52 apresentam os resultados do defeito 1 com 50% de perda de espessura e um mesmo conjunto de sensores a 35kHz, 50kHz, 55kHz e a 75kHz de frequência central, respectivamente.

Figura 49 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Emissão: 35kHz.



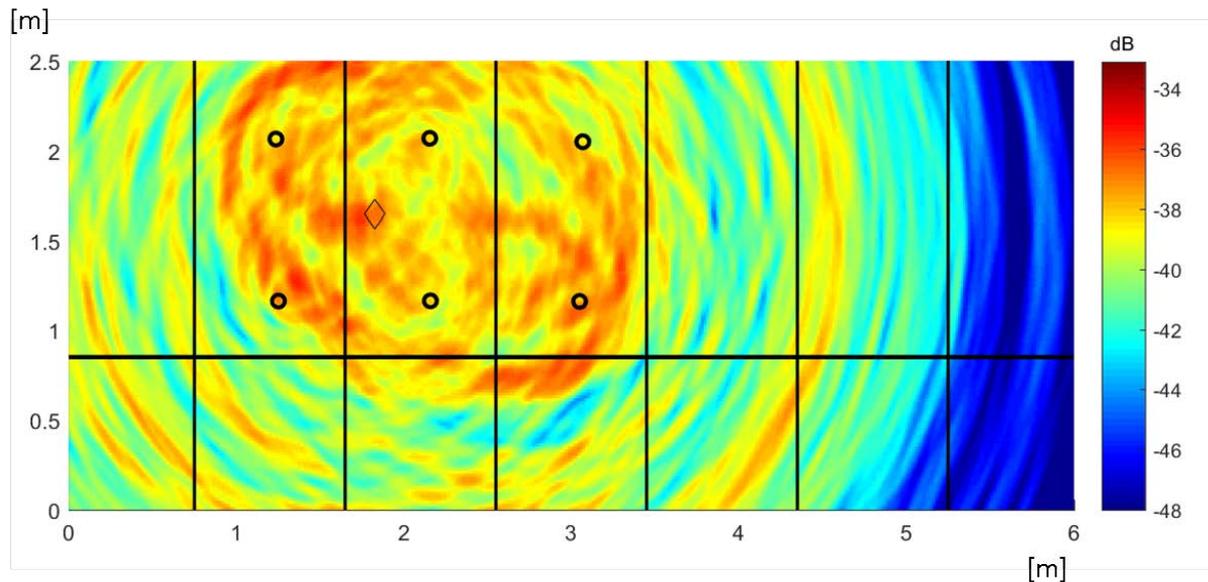
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 50 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Emissão: 50kHz.



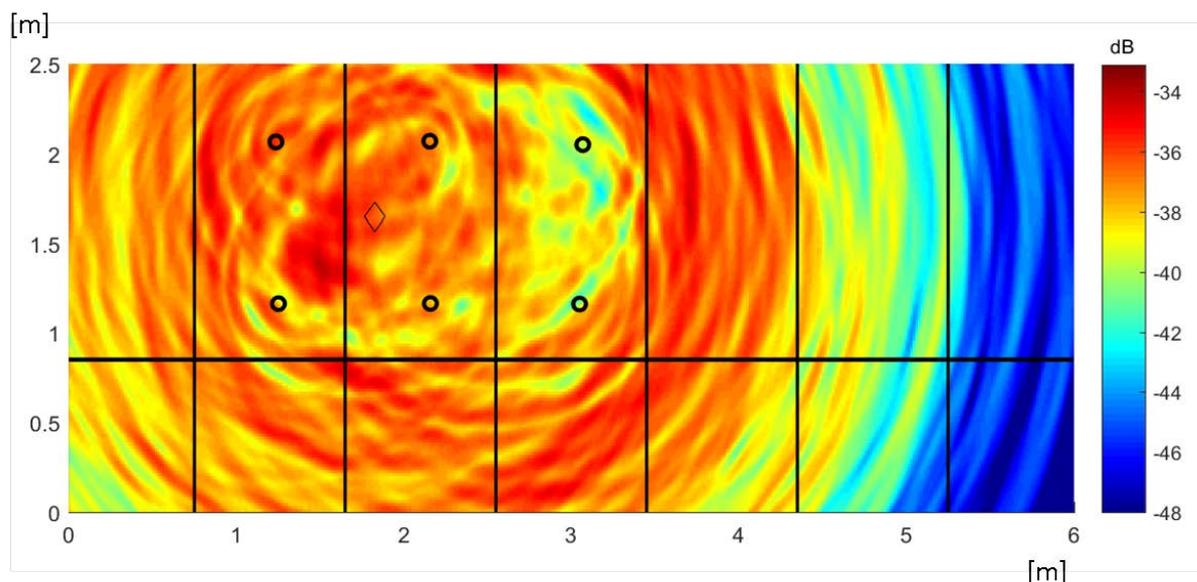
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 51 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Emissão: 55kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 52 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Emissão: 75kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Avaliando-se os resultados apresentados para a mesma profundidade do Defeito 1, percebe-se que para as frequências de 35kHz e 75kHz a detecção do defeito não é satisfatória. Para 50kHz a detecção e localização foi feita com maior clareza. Nota-se que em 55kHz, já fora da faixa de frequências entre 40kHz e 50kHz, a quantidade de ruídos é maior e a detecção fica mais difícil. Esta faixa de frequências entre 40kHz e 50kHz é próxima da faixa de melhor sensibilidade à recepção do sinal do modo SH_0 pelo transdutor, conforme apresentado em (MENIN, CLARKE, 2018). No caso do modelo de transdutor encapsulado utilizado, poderia-se esperar um resultado melhor em frequências mais próximas de 70kHz, visto que a relação entre os modos SH_0 e A_0 é maior. No entanto, a amplitude de emissão do modo SH_0 é mais alta abaixo de 50kHz, favorecendo a detecção do mesmo após alguma reflexão gerada. Outro ponto a ser levado em consideração é o padrão de espalhamento deste modo após a interação do mesmo com um defeito localizado com diferentes perdas de espessura. Para as perdas de espessura testadas e apresentadas nos resultados anteriores, o espalhamento do modo SH_0 se mostrou mais favorável para frequências abaixo de 50kHz, onde a conversão para os demais modos fundamentais se apresentou menor de maneira geral.

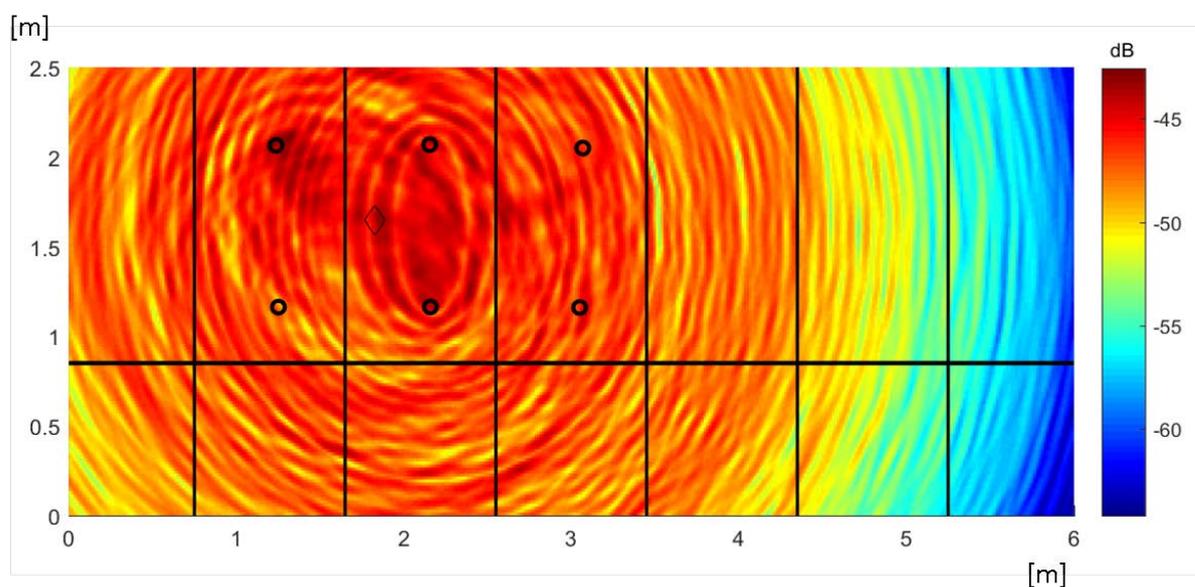
Desta maneira, ao se trabalhar em frequências abaixo de 40kHz ou acima de 50kHz, perde-se sensibilidade na recepção do sinal, como consequência, aumenta-se os níveis de ruído e artefatos na imagem do resultado. Desta forma, todos os resultados de imagem a

seguir são apresentados para frequências no intervalo de 45kHz a 50kHz, onde a resposta do transdutor é muito semelhante e foram gerados os resultados mais satisfatórios.

4.2.3 Localização de Defeitos através do Algoritmo DAS

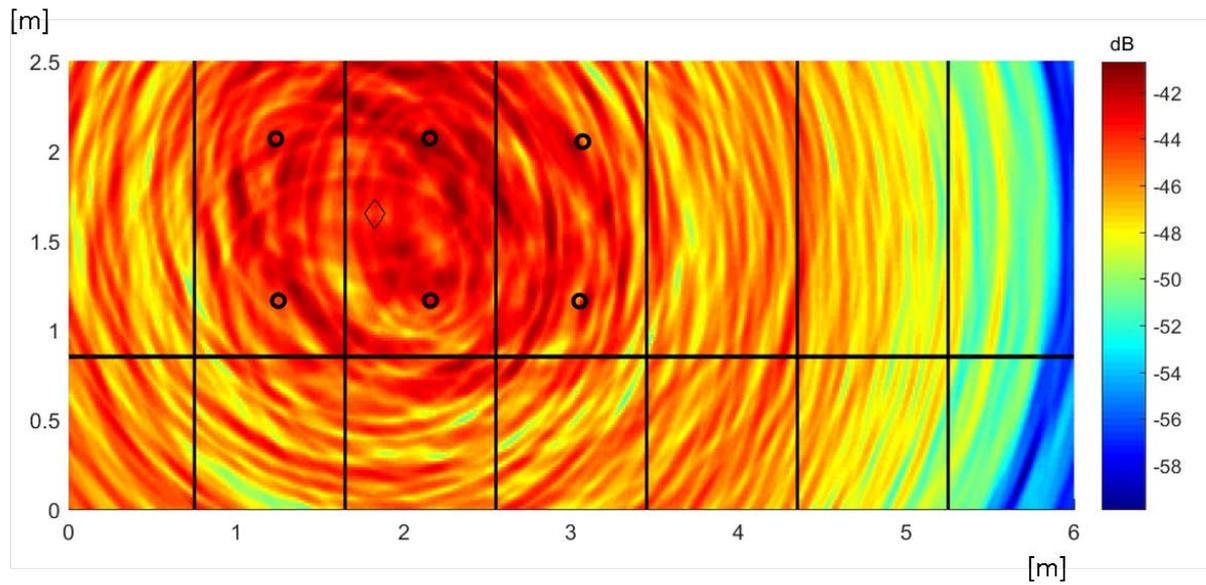
Os resultados obtidos através do processamento dos sinais utilizando o algoritmo DAS em função do crescimento de cada um dos defeitos são apresentados na presente subseção. As imagens resultantes do processamento para o corpo de prova íntegro e para todas as profundidades do Defeito 1 são apresentadas a partir da Figura 53 até a Figura 58.

Figura 53 – Resultado DAS para corpo de prova íntegro com 0% de perda de espessura.



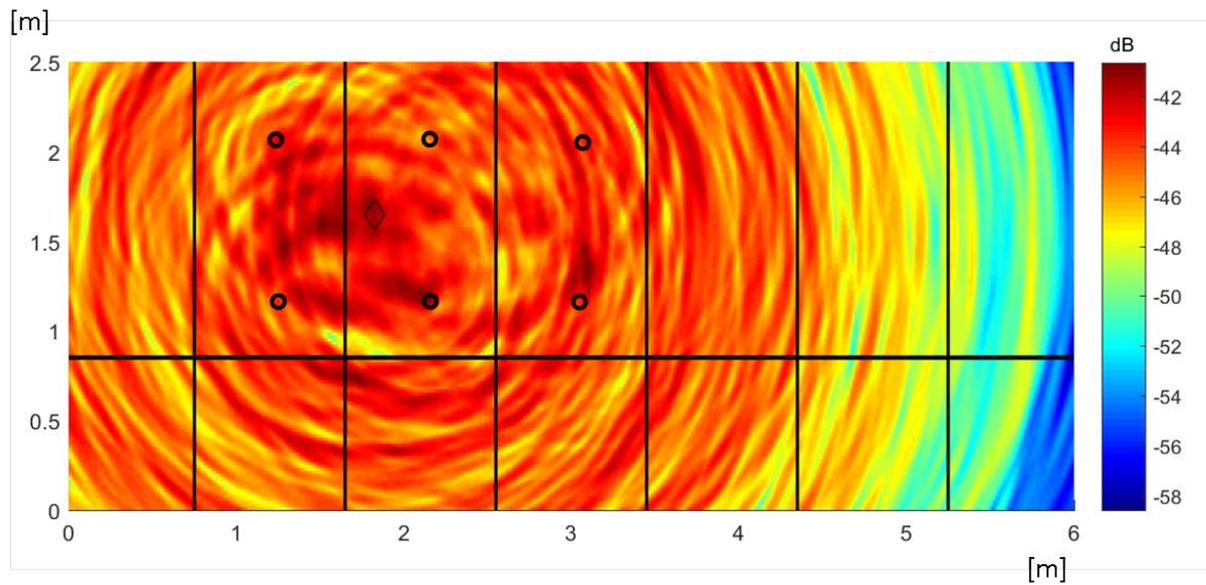
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 54 – Resultado DAS para Defeito 1 com 10% de perda de espessura.



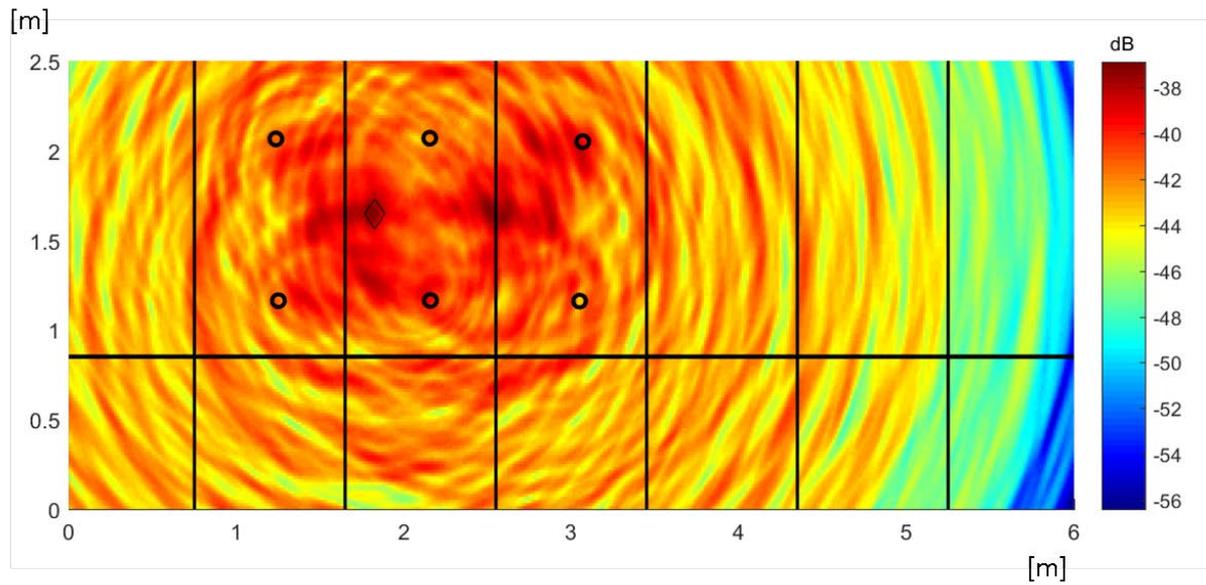
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 55 – Resultado DAS para Defeito 1 com 20% de perda de espessura.



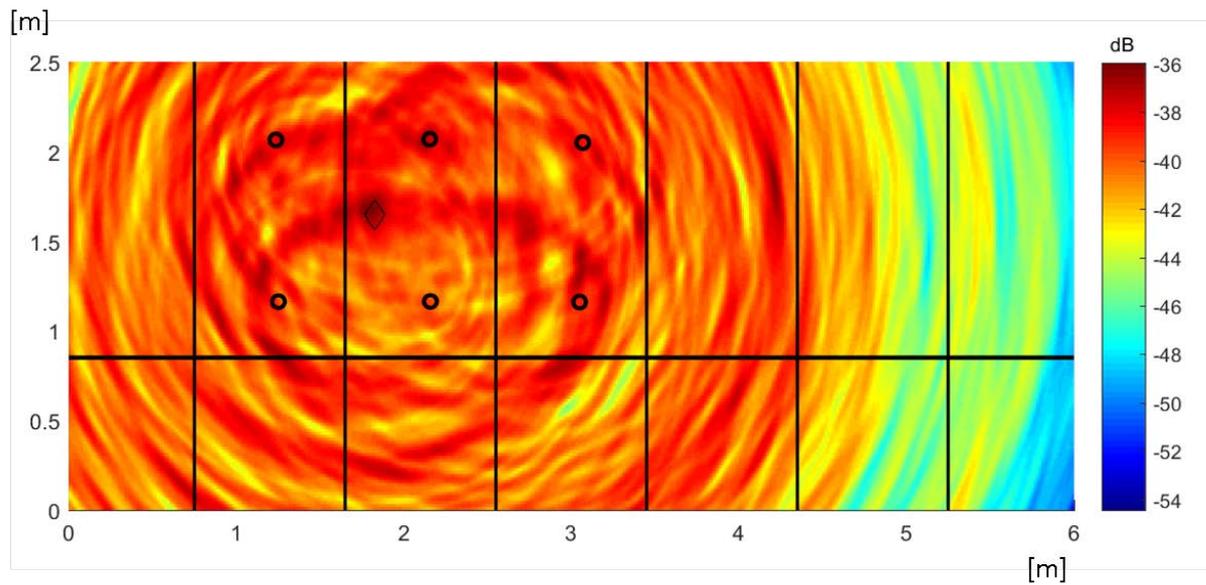
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 56 – Resultado DAS para Defeito 1 com 30% de perda de espessura.



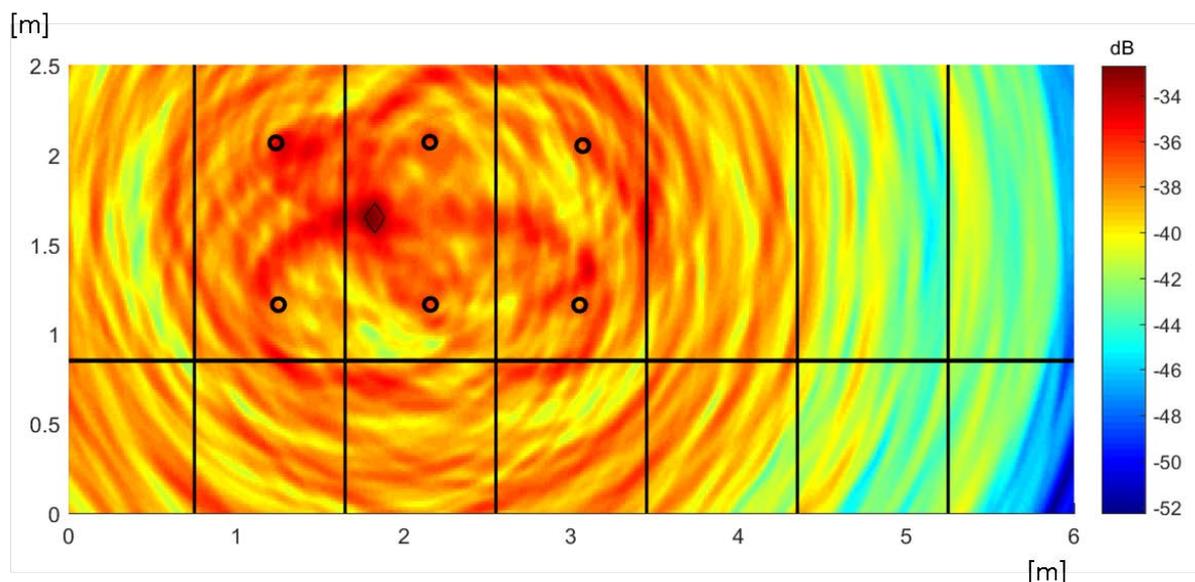
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 57 – Resultado DAS para Defeito 1 com 40% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 58 – Resultado DAS para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.



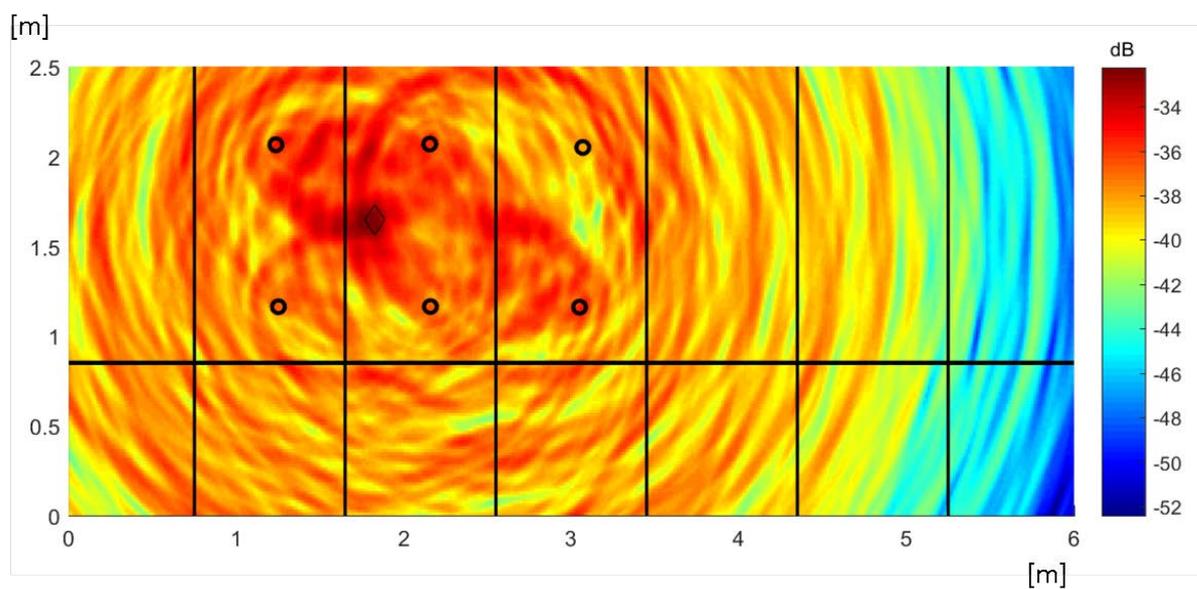
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os resultados de imagem para o caso onde o corpo de prova se encontra em estado íntegro apresentam valores de amplitude variando em cerca de -50dB a -40dB, indicando que este é o nível aproximado do ruído obtido na imagem através do processamento dos sinais somente com a aplicação dos algoritmos de compensação de temperatura e sem a presença de defeitos. Analisando os resultados para as perdas de espessura de 10% e 20%, percebe-se um incremento geral na amplitude da imagem gerada entre 5dB a 10dB, no entanto, em nenhum dos dois casos foi possível de se localizar o defeito com clareza. Embora os valores de amplitude tenham aumentado para estes defeitos, a localização não foi possível devido à presença de um aumento também da quantidade e amplitude de artefatos, os quais mascararam a indicação de defeito.

A partir de 30% de perda de espessura, o resultado do algoritmo de imagem foi bastante eficaz na localização do defeito, indicando com clareza a posição do mesmo. No resultado para 40% de perda de espessura, nota-se uma maior quantidade de artefatos, possivelmente devido à algum evento que possa ter prejudicado a aquisição do sinal quando foi realizada esta medida. Um forte gradiente de temperatura na estrutura, ou mesmo a ausência de uma medida de base no banco de dados que represente condições muito próximas ao dia em que foi feita a medida com o defeito, pode acabar resultando em uma imagem com menor qualidade. A indicação para a perda de espessura de 50% para o primeiro defeito

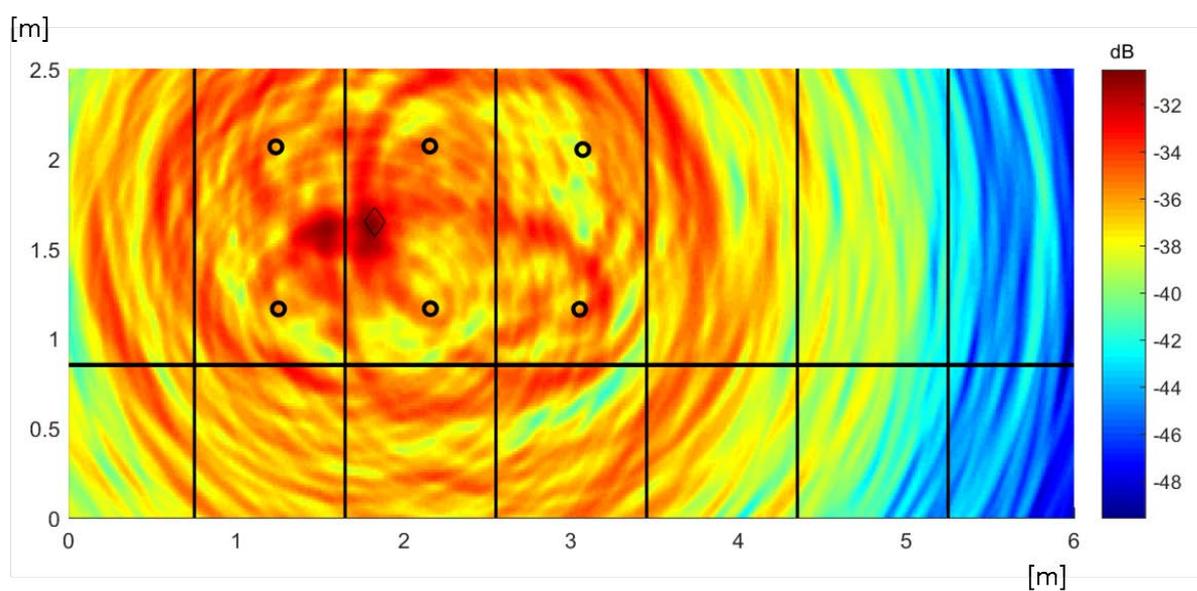
testado também foi satisfatória. Os resultados de imagem obtidos para cada profundidade do Defeito 2 são apresentados a partir da Figura 59 até a Figura 64.

Figura 59 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (10%) de perda de espessura.



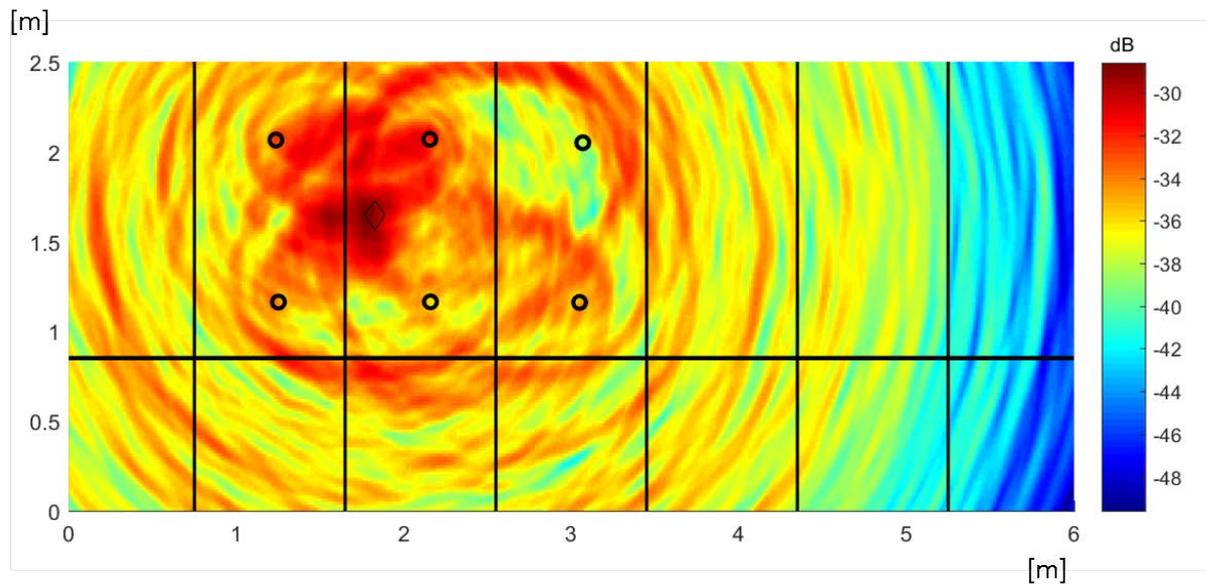
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 60 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (20%) de perda de espessura.



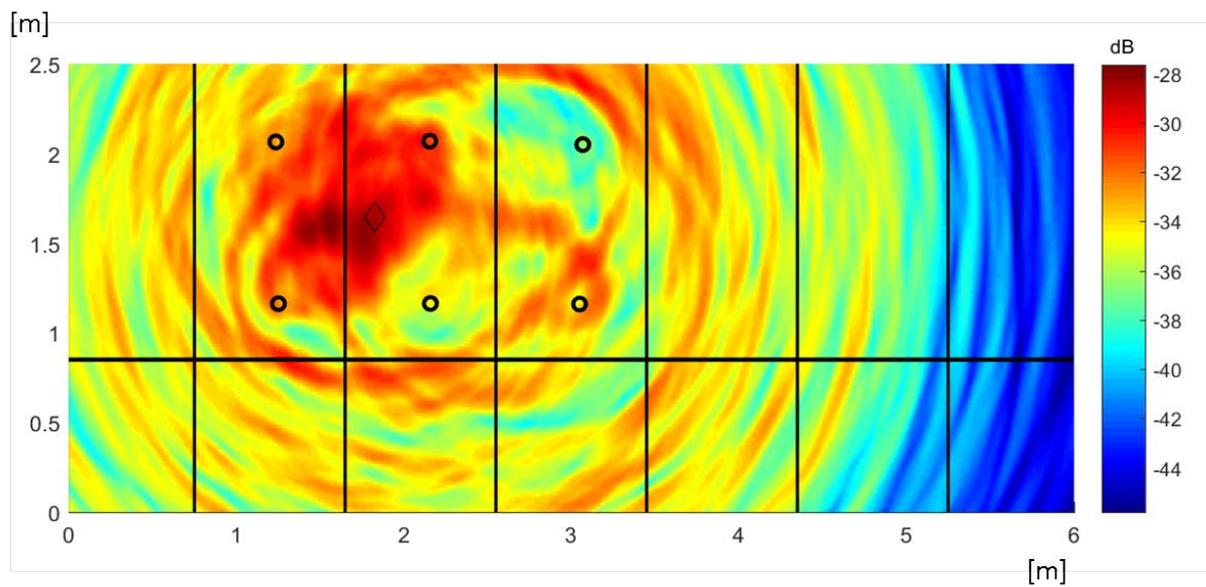
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 61 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (30%) de perda de espessura.



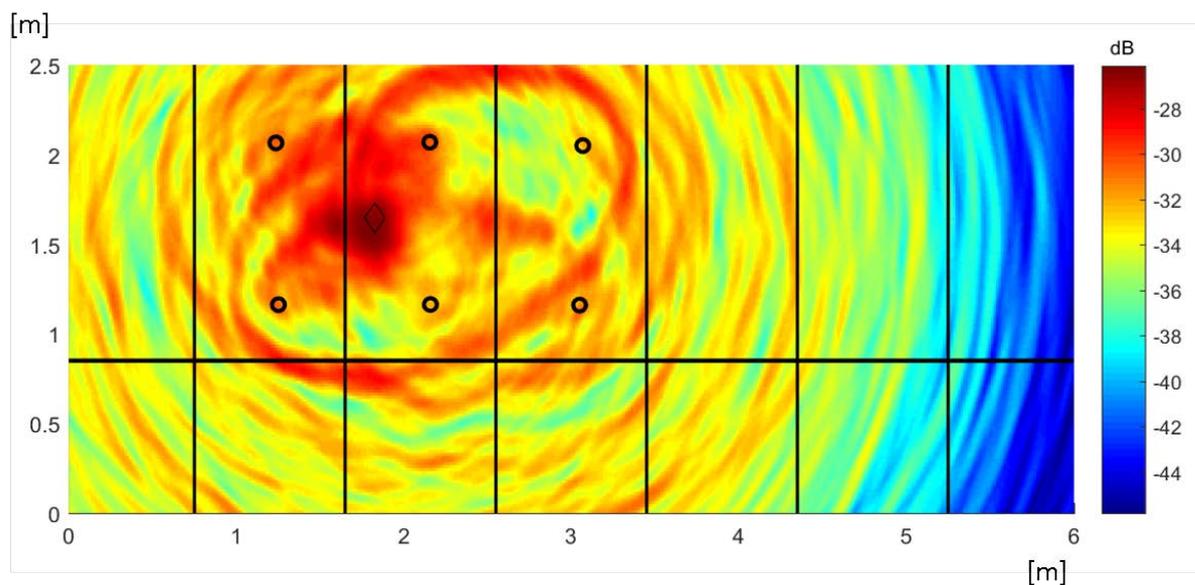
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 62 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (40%) de perda de espessura.



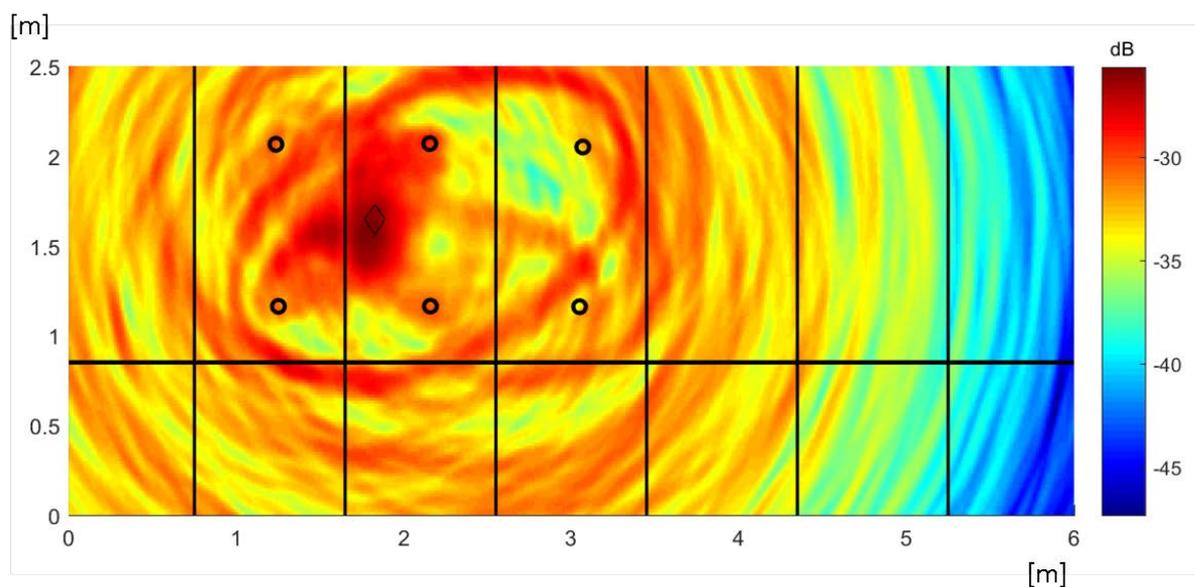
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 63 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (50%) de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 64 – Resultado DAS para Defeito 2 com 60% (60%) de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

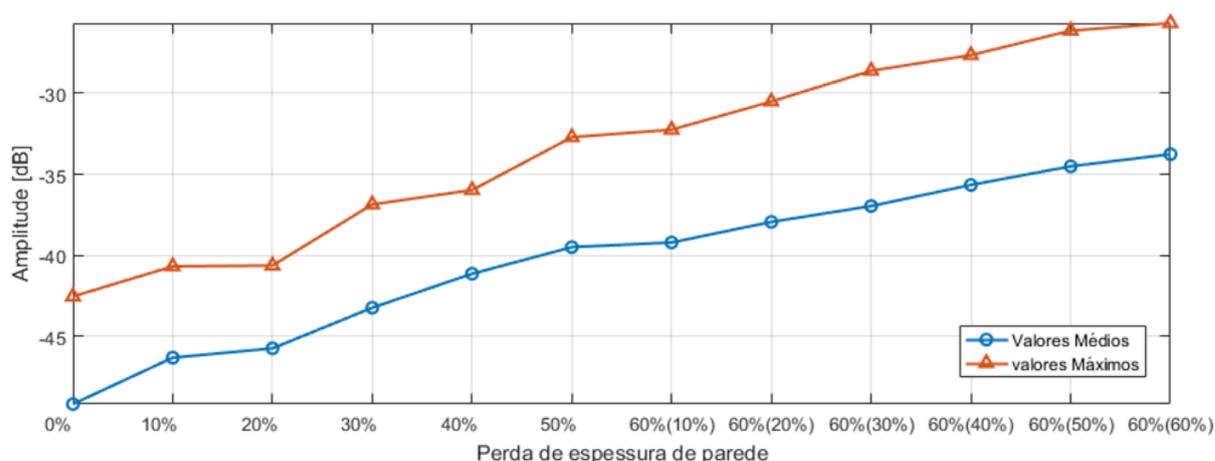
Analisando as figuras resultantes do Defeito 2, nota-se que todas as profundidades medidas foram detectadas e localizadas. Em algumas destas imagens, sendo mais notável nas perdas de 20% e 40%, nota-se a presença de um artefato grande ao lado da posição real do

defeito. Dada a proximidade do defeito com o enrijecedor, é possível que tenha ocorrido alguma interação mais forte com as ondas refletidas neste ponto e o perfil bulbo, resultando neste artefato muito próximo ao defeito. Percebe-se ainda, que a região do Defeito 3 indicada pela imagem representa uma área maior do que a indicada para o Defeito 2, demonstrando que o algoritmo de imagem aplicado possui uma certa sensibilidade também à área ocupada pelo defeito durante a indicação do mesmo. Diferentemente dos resultados do Defeito 1, a indicação de todas as profundidades do Defeito 2 pôde ser realizada de maneira satisfatória, visto que este defeito já parte de uma profundidade prévia considerável em sua região central.

4.2.4 Detecção dos defeitos através de Índices de Dano

Em todos os resultados gerados pelo algoritmo DAS e descritos no subcapítulo anterior percebe-se um padrão de crescimento dos níveis de amplitude da imagem a medida que a profundidade dos defeitos aumenta. Este aumento de amplitude notado pode ser representado através dos índices de dano (IDs) calculados e apresentados através da Figura 65.

Figura 65 – Índices de Dano (ID) calculados, considerando o corpo de prova íntegro e as perdas de espessura de parede geradas para o Defeito 1 e para o Defeito 2.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Ambos os IDs apresentados (valores médios da imagem e valores máximos da imagem) apresentaram um crescimento monotônico com o aumento da severidade dos defeitos. Uma diferença de aproximadamente 15dB entre as amplitudes do caso do corpo de provas sem defeito e do caso com o defeito mais severo é apresentada para os dois IDs. Nota-se que, mesmo para os casos onde não foi possível a localização dos defeitos (10% e 20% de perda de espessura para o Defeito 1), os índices demonstraram uma alteração consistente em relação ao caso sem nenhum defeito.

Essa característica demonstra que ambos os IDs são sensíveis à detecção de um defeito com dimensões menores dentro do arranjo de sensores utilizados. Mesmo sem apresentar um resultado eficiente para a localização dos defeitos nos casos de 10% e 20% de perda de espessura, os IDs foram sensíveis à presença dos defeitos já que estes resultaram em um aumento das amplitudes do sinal residual após a subtração dos sinais. Pequenas reflexões e efeitos de sombra causados pela presença destes defeitos levaram a um aumento no nível de artefatos e no nível do ruído de fundo apresentado na imagem pelo algoritmo DAS. Sinais oriundos de fortes refletores, como bordas, são particularmente afetados por este tipo de efeito e contribuem para a geração de artefatos maiores. O fato de ocorrer um crescimento da amplitude de artefatos e ruídos juntamente com o crescimento do defeito significa que a localização do mesmo se tornará possível no momento em que o defeito se torna grande o suficiente para criar reflexões oriundas diretamente de sua posição que sejam mais fortes do que perturbações causadas em sinais provenientes de outros refletores.

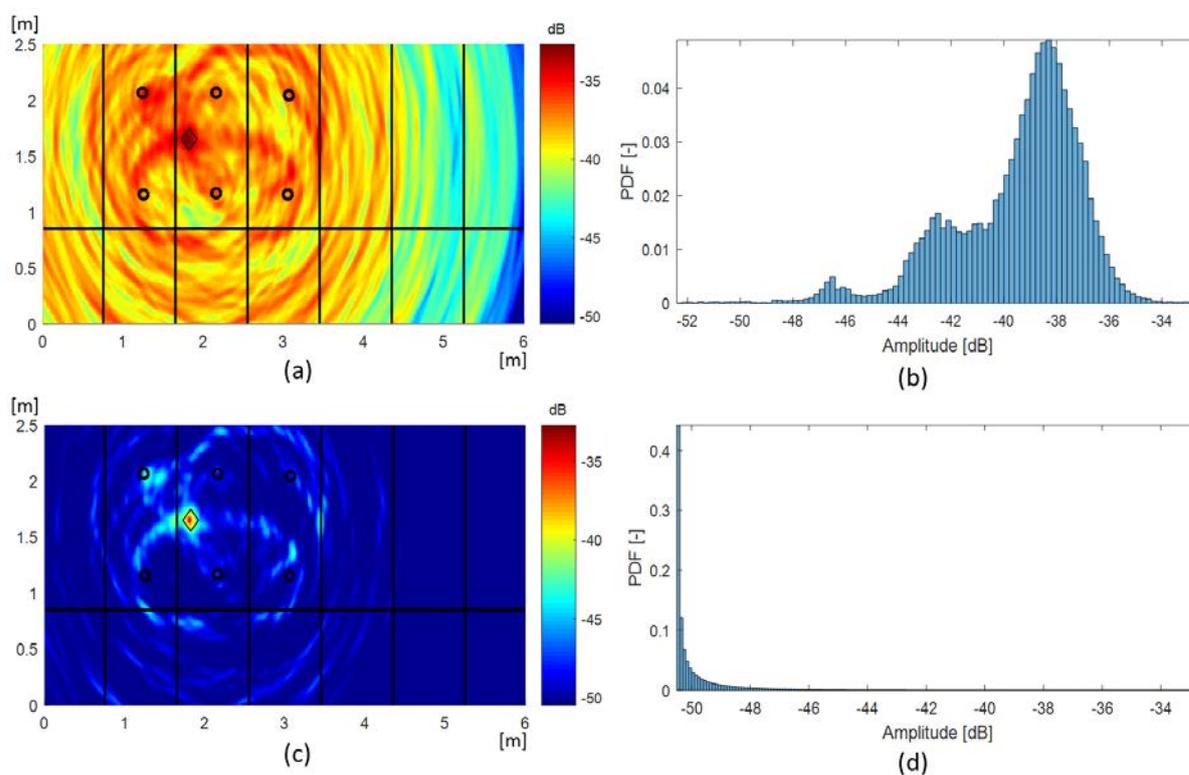
4.3 Aplicação de Pós-Processamento nos Resultados de Imagem

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através da aplicação das estratégias de pós-processamento nos resultados de imagem. São apresentados os resultados obtidos através da modificação da mudança probabilística da imagem, obtidos com a construção da imagem utilizando SVD e obtidos através da aplicação das duas estratégias anteriores em conjunto. Por fim é feita uma análise da relação sinal ruído e dos ganhos obtidos com a aplicação de cada diferente estratégia de pós-processamento.

4.3.1 Modificação da mudança probabilística da imagem

O resultado apresentado na Figura 66 (a) corresponde ao processamento original gerado pelo algoritmo DAS apresentado anteriormente para o Defeito 1 com 50% de perda de espessura de parede. A função densidade de probabilidade extraída deste resultado é apresentada na Figura 66 (b). Percebe-se nesta função que existe uma alta probabilidade de ocorrerem valores próximos à -38dB (nota-se que este é um valor próximo ao valor médio para esta profundidade de defeito registrado na Figura 65). Após a aplicação da transformação probabilística da imagem, a distribuição apresentada pela Figura 66 (d) é obtida. Como resultado da nova distribuição Gama modificada para as amplitudes da imagem, o resultado obtido com a reconstrução da mesma é apresentado na Figura 66 (c).

Figura 66 – Mudança na Função Distribuição de Probabilidade da imagem. Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Imagem original. (b) Histograma da função distribuição de probabilidade da imagem original. (c) Imagem com distribuição Gama modificada. (d) Histograma da função distribuição de probabilidade da imagem modificada.

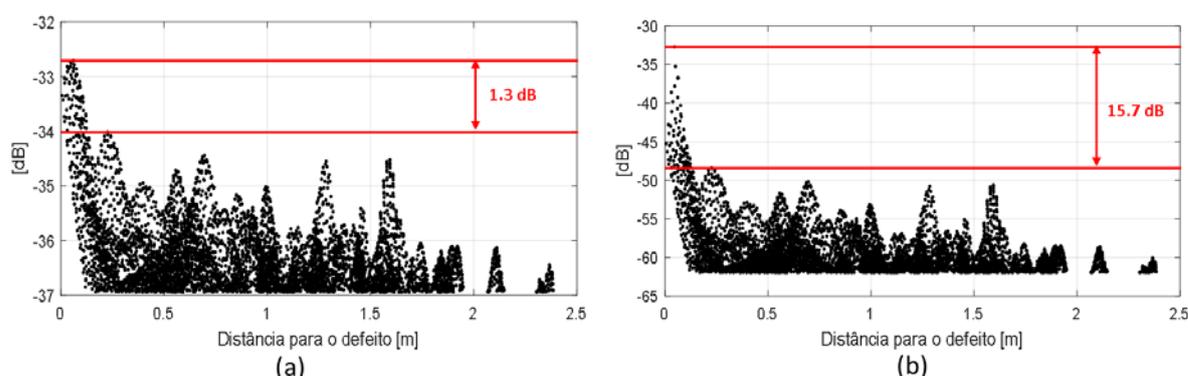


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Observando-se a mudança apresentada, é notável a redução de amplitude de grande parte dos artefatos fora da região do defeito, os quais permaneceram com amplitudes próximas do fundo da escala de cores da imagem. Essa alteração permitiu um maior destaque para a indicação do defeito.

Através da métrica apresentada na Seção 3.3.3 foi possível de se avaliar o ganho na relação sinal-ruído antes e após a transformação na distribuição de probabilidades da imagem. A Figura 67 apresenta os resultados para a distância dos 10% pixels de maior amplitude em relação ao defeito para as duas imagens analisadas na Figura 66. Percebe-se que um ganho de 15,7dB foi obtido entre a indicação do defeito e os maiores artefatos indesejados da imagem após a aplicação da transformação. Artefatos com níveis de amplitude inicialmente próximos a -34dB foram reduzidos para cerca de -48dB. Ainda, artefatos menores e mais distantes da região do defeito também tiveram sua amplitude reduzida substancialmente.

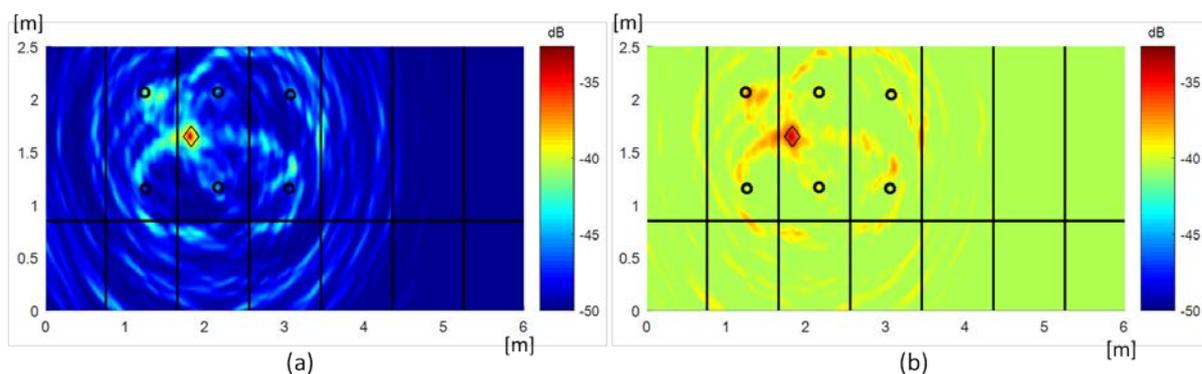
Figura 67 – Distância do defeito dos 10% maiores pixels da imagem. Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Pixels da imagem original. (b) Pixels da imagem com distribuição Gama modificada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Durante a calibração dos fatores de forma e de escala da função Gama, uma série de combinações de valores foi testada. A Figura 68 apresenta os resultados obtidos para o mesmo caso do Defeito 1 com 50% de perda de espessura, porém modificando-se o fator de forma de 0.25 para 1 na Figura 68 (a) e alterando-se o fator de escala de 4 para 1 na Figura 68 (b).

Figura 68 – Testes com fator de forma e escala alterados. Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Fator de forma com valor 1. (b) Fator de escala com valor 1.

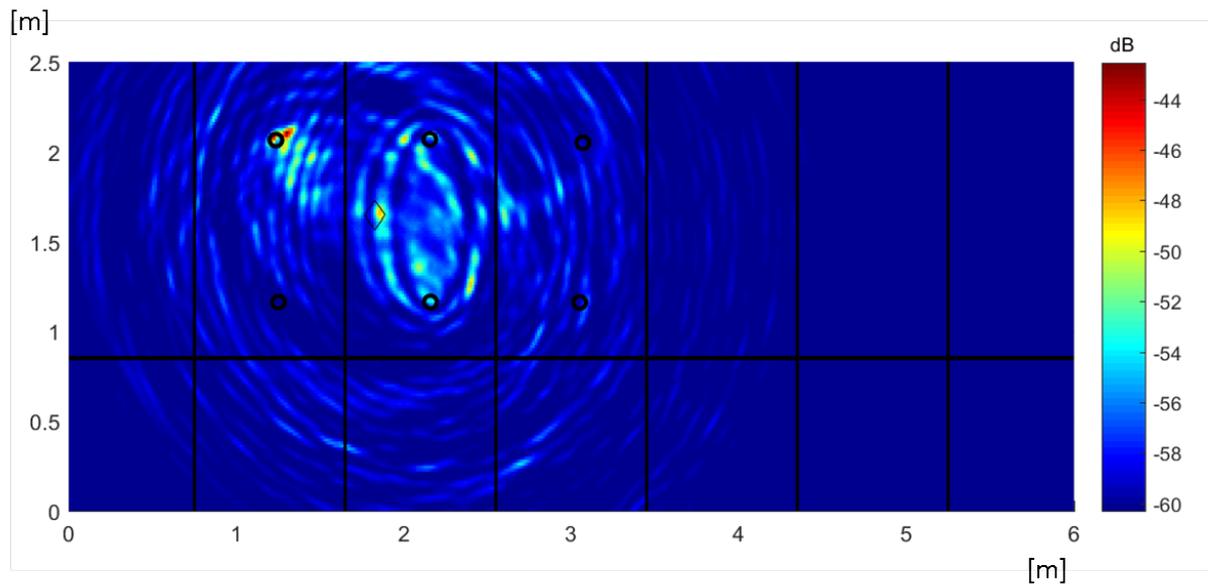


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pode-se notar na Figura 68 (a) que a amplitude dos artefatos ao redor do defeito possuem uma amplitude maior do que os apresentados na Figura 66 (c). Esta característica ocorre devido à uma transição mais suave entre a amplitude dos maiores valores da distribuição Gama e os valores mais baixos quando é utilizado um fator de forma maior. Como resultado, artefatos com valores acima da média se tornam mais visíveis para a mesma escala de cores da imagem. Na Figura 68 (b) percebe-se que os menores valores de amplitude apresentados possuem níveis maiores do que os obtidos na Figura 66 (c). A diminuição do fator de escala resultou neste tipo de comportamento, diminuindo o ganho em dB entre a indicação do defeito e os níveis de ruído da imagem. Os fatores de forma com valor 0.25 e de escala com valor 4 foram portanto mantidos para o processamento das demais imagens após o processo de calibração, visto que os mesmos apresentaram ganhos satisfatórios em relação à supressão de artefatos e em relação ao ganho na relação de amplitudes entre a indicação do defeito e ruídos da imagem.

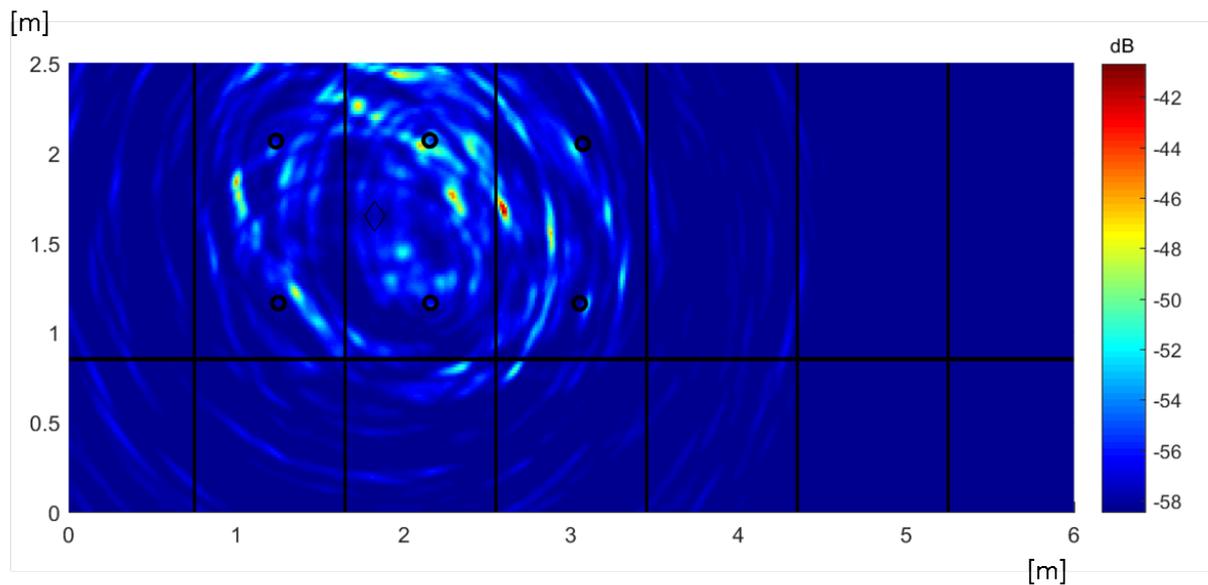
Os resultados obtidos para o processamento das imagens sem a presença do defeito e com a presença do Defeito 1 em todas as profundidades medidas são apresentados a partir da Figura 69 até a a Figura 74.

Figura 69 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para corpo de prova íntegro com 0% de perda de espessura.



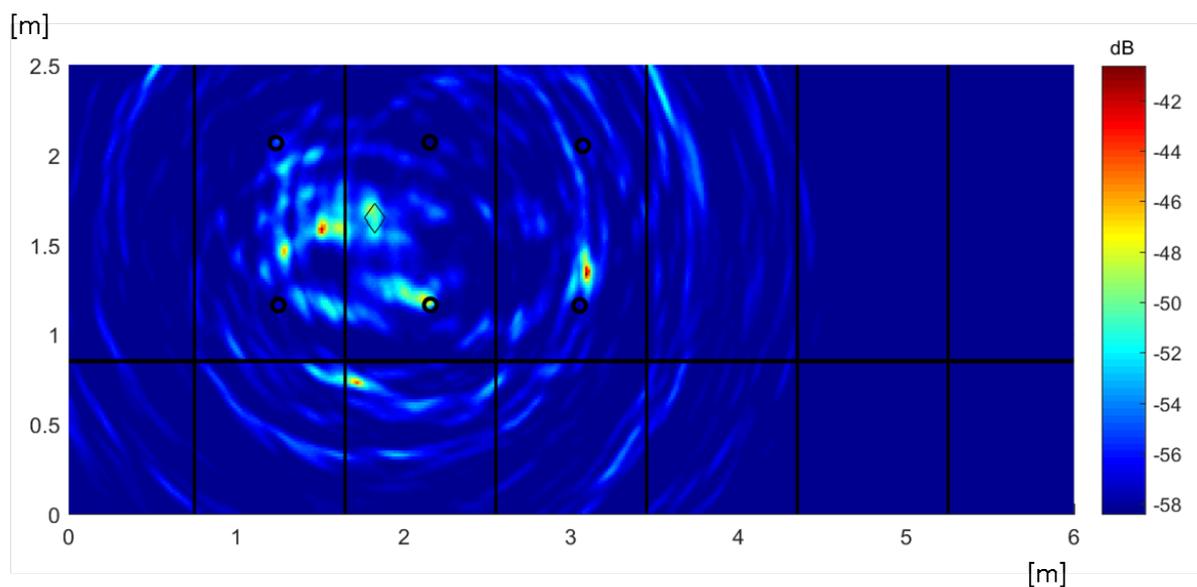
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 70 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 10% de perda de espessura.



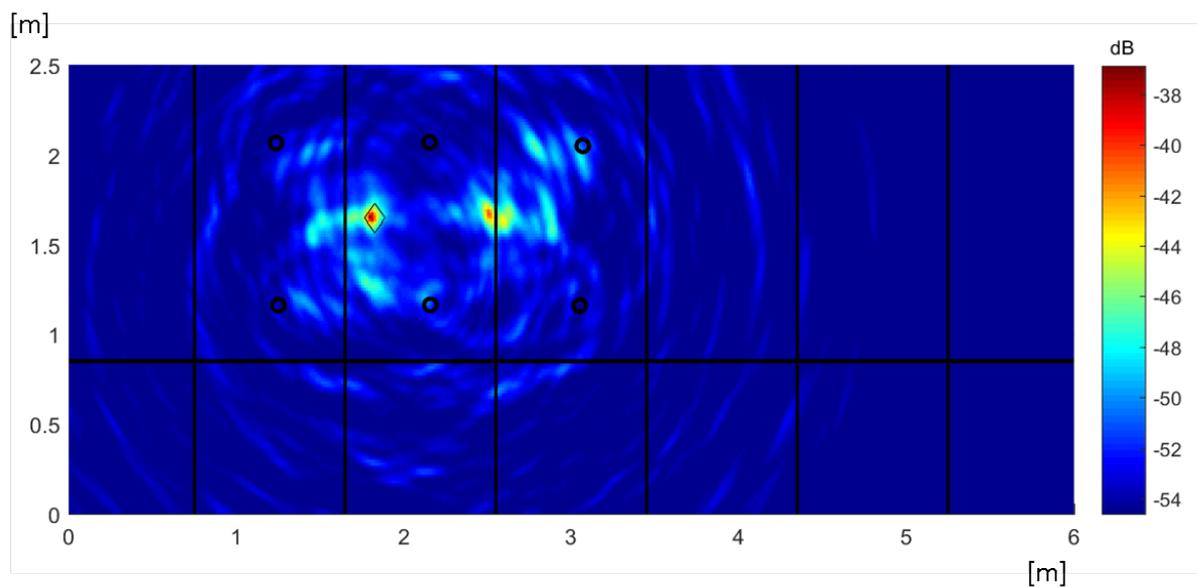
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 71 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 20% de perda de espessura.



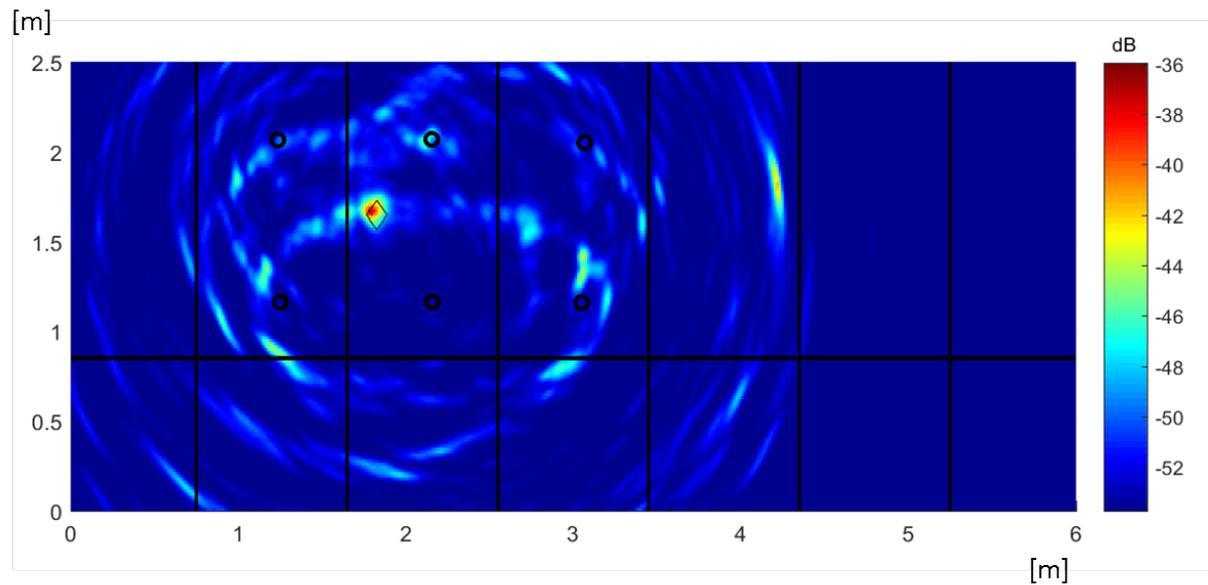
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 72 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 30% de perda de espessura.



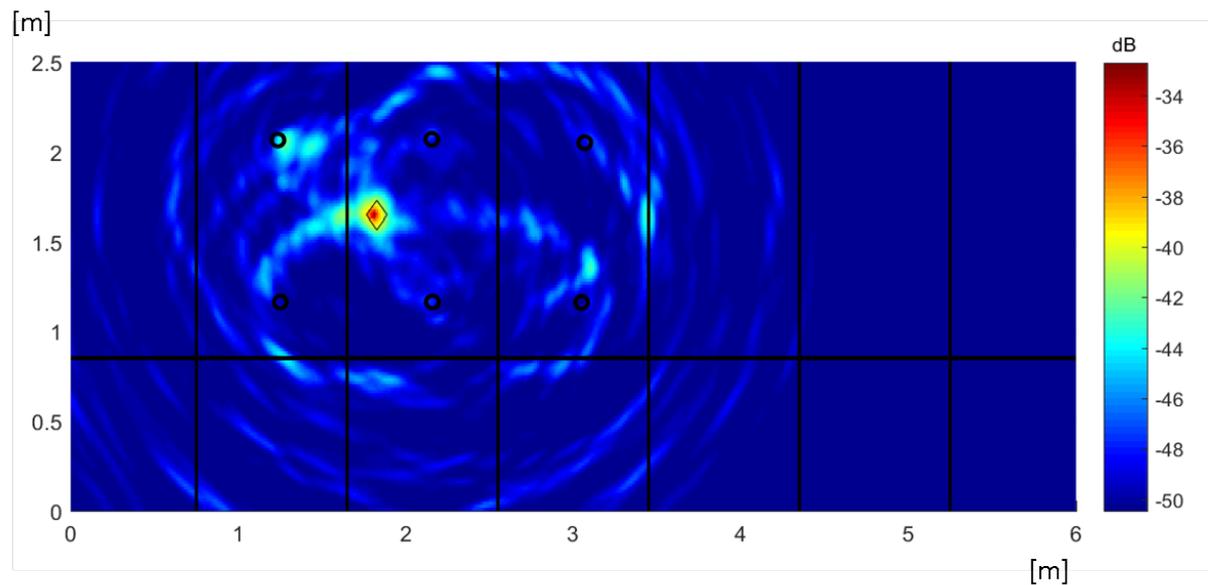
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 73 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 40% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 74 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.

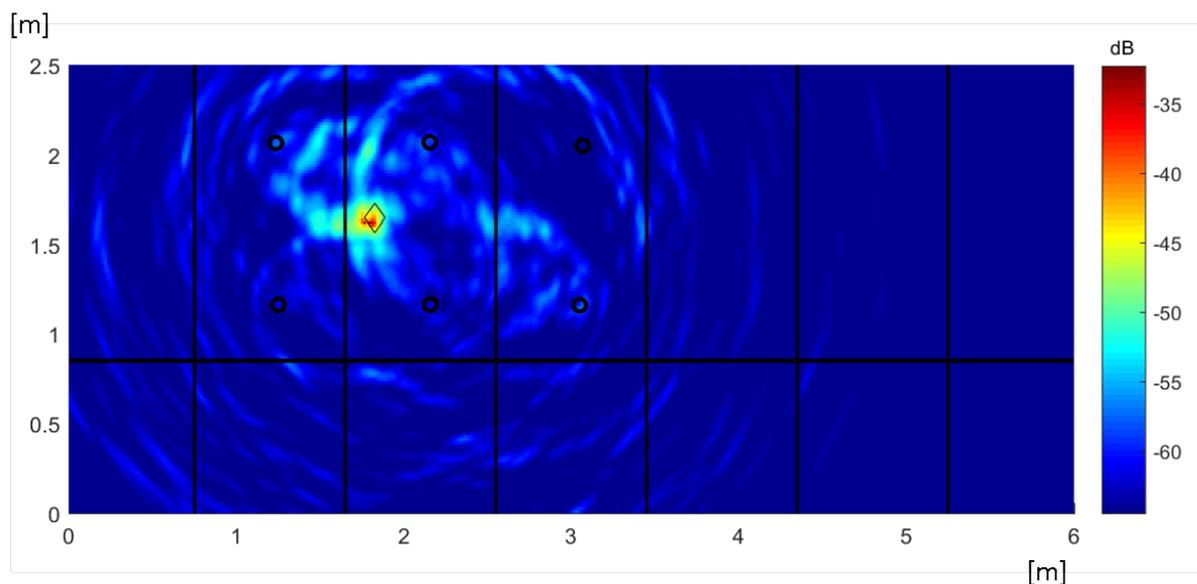


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Percebe-se que existe uma melhoria na indicação do defeito a partir de 30% de perda de espessura, medida em que começa a se tornar possível a localização do defeito. Para os casos onde a localização não é possível (caso sem defeito, 10% e 20% de perda de espessura), nota-se uma alteração principalmente nos artefatos de maior amplitude, os quais se tornaram mais destacados em relação ao restante da imagem. Para o caso de 30% de perda de espessura, o defeito se tornou bastante visível após o processamento. Para esta profundidade, um artefato à direita do defeito, com amplitudes próximas à indicação do mesmo, também foi destacado em relação ao restante da imagem. Para os casos de 40% e 50% de perda de espessura o defeito ficou bastante destacado e artefatos oriundos do processamento com o algoritmo DAS foram reduzidos a níveis menores de amplitude.

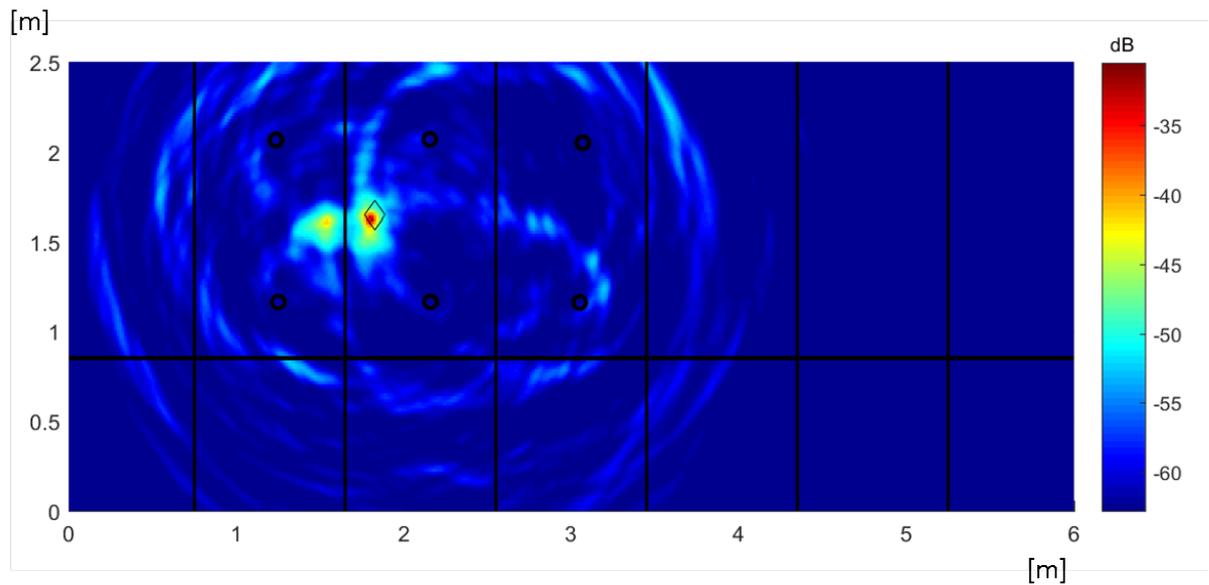
As imagens reconstruídas para os resultados do Defeito 2 após o processamento das mesmas com a mudança na distribuição probabilística podem ser vistas a partir da Figura 75 até a Figura 80.

Figura 75 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(10%) de perda de espessura.



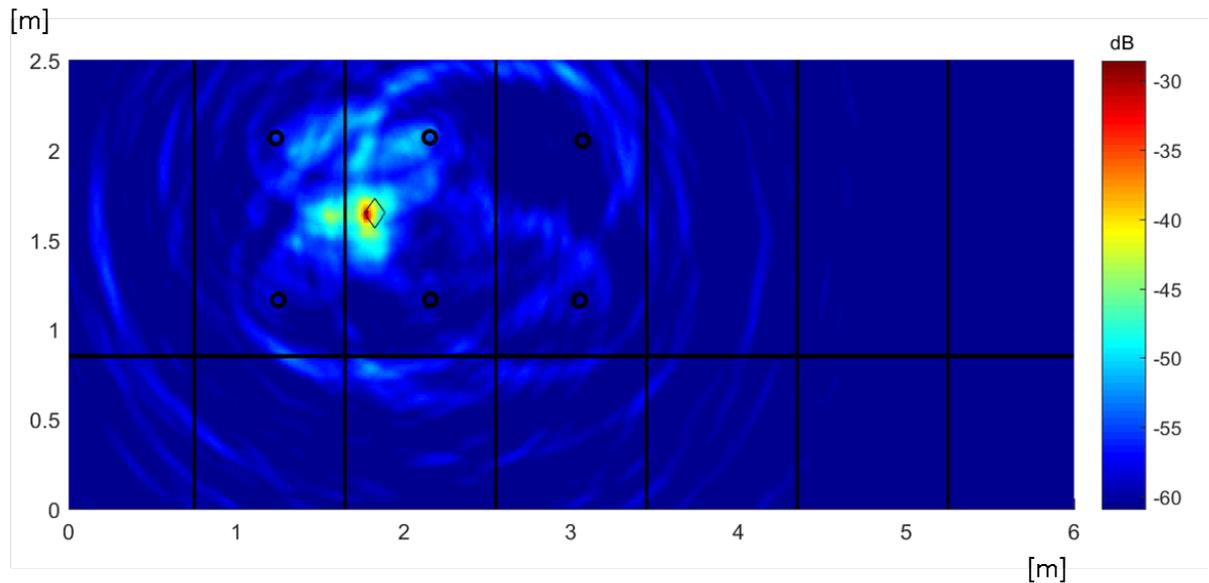
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 76 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(20%) de perda de espessura.



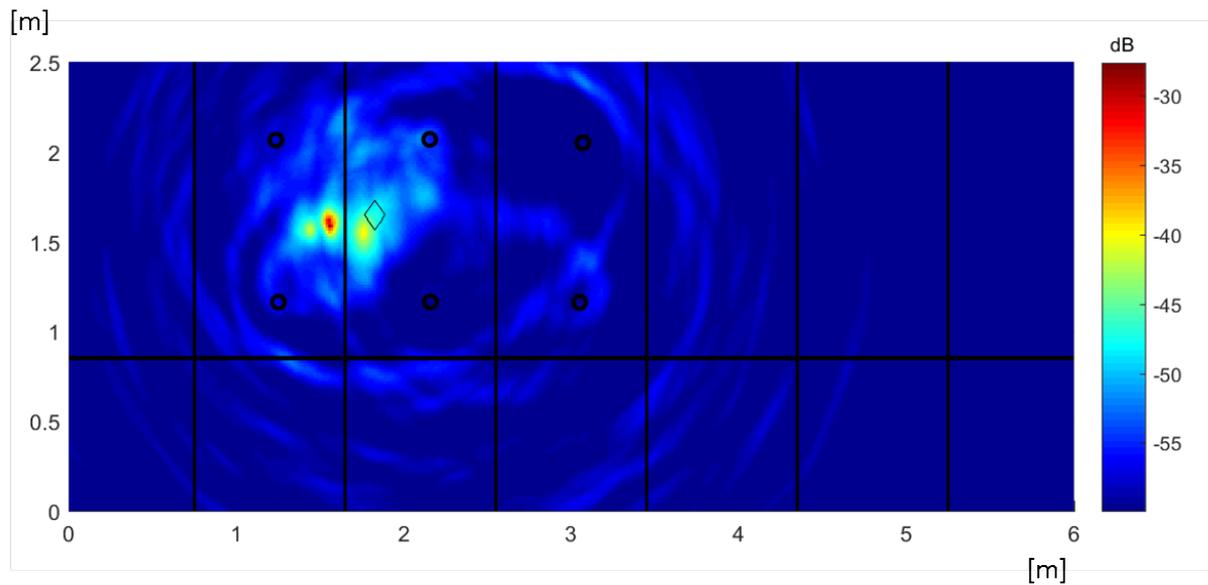
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 77 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(30%) de perda de espessura.



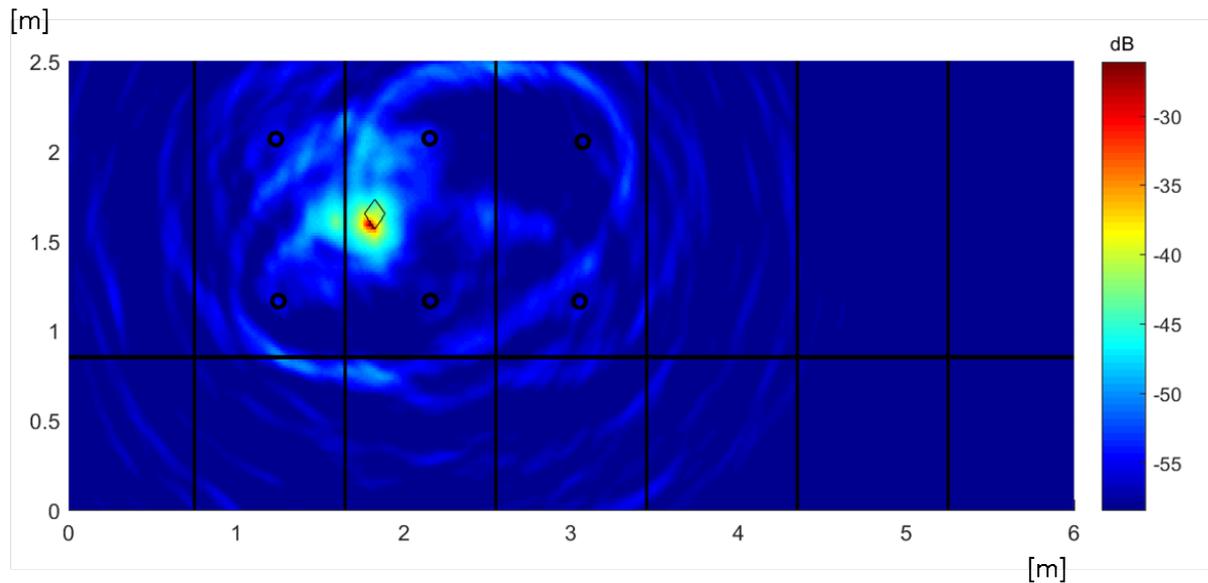
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 78 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(40%)de perda de espessura.



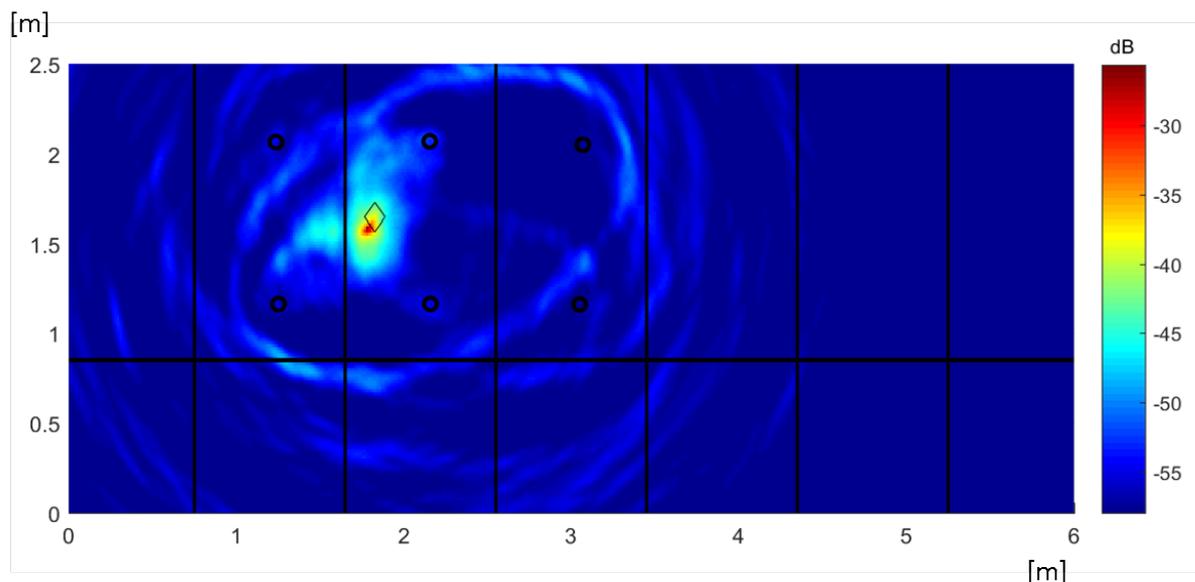
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 79 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(50%)de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 80 – Resultado após mudança na distribuição probabilística para Defeito 2 com 60%(60%) de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

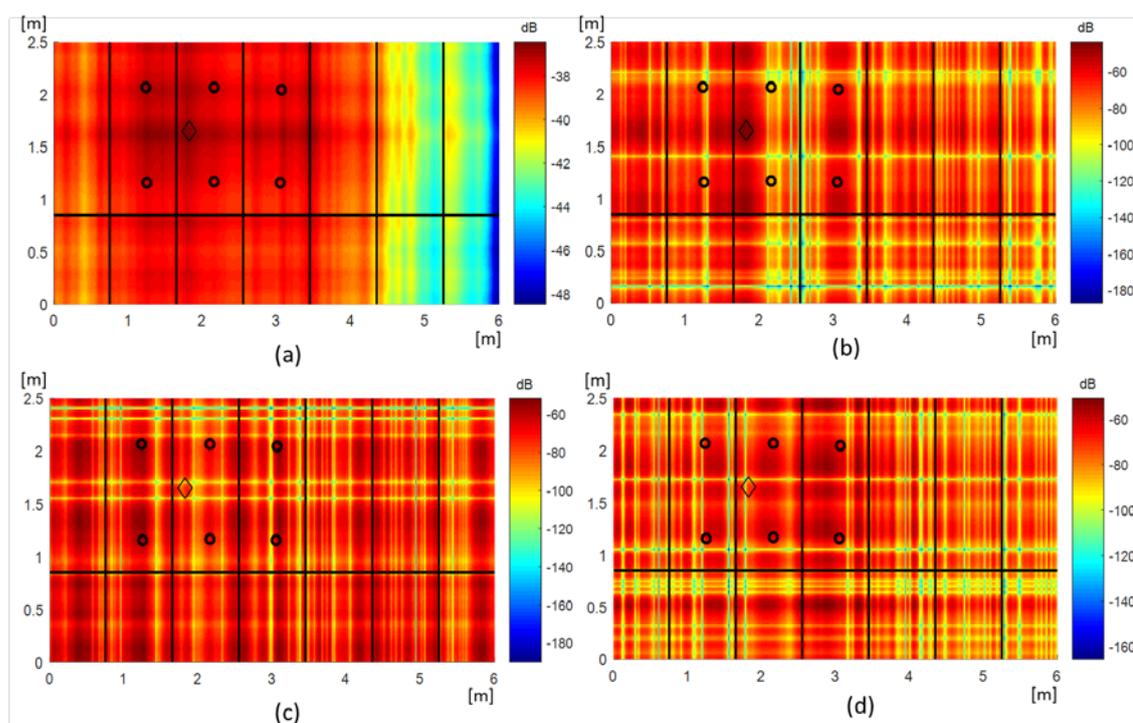
Os resultados do pós-processamento para o Defeito 2 apresentaram uma redução dos artefatos para todas as profundidades medidas. Para este defeito, como a detecção original pelo algoritmo DAS já havia identificado a localização em todos os casos, a transformação probabilística das amplitudes da imagem também apresentou um resultado satisfatório para a maioria das medidas. Como exceção está a profundidade de 40% de perda de espessura para o Defeito 2, onde apareceu um artefato com amplitude levemente superior à indicação do defeito, ao lado do mesmo. Neste caso, o artefato obteve um maior destaque em relação à indicação do defeito real.

4.3.2 Reconstrução da imagem utilizando SVD

O segundo método de pós processamento aplicado foi a reconstrução da imagem utilizando SVD com os pesos propostos para os componentes singulares da matriz da imagem. A Figura 81 apresenta imagens geradas pelos 4 primeiros componentes (dos 150 disponíveis) da imagem gerada pelo algoritmo DAS para o caso do Defeito 1 com 50% de perda de espessura. Percebe-se que o componente 1 carrega a maior parte da informação do defeito, com amplitudes próximas de -35dB. A contribuição dos outros 3 componentes é

significativamente menor em termos de amplitude. Este foi uma das razões pelas quais foi adotado de 0,5 para o primeiro componente, desta forma a intensidade do mesmo não se distancia muito dos demais componentes.

Figura 81 – Imagens reconstruídas com aplicação de SVD utilizando um componente único – Exemplo para resultado do Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Componente 1. (b) Componente 2. (c) Componente 3. (d) Componente 4.

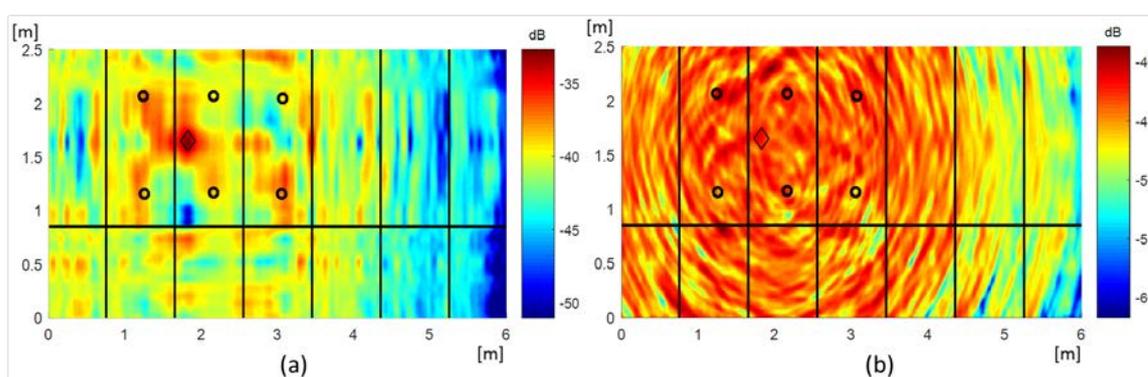


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Outro ponto para ser notado nas imagens reconstruídas através dos 4 primeiros componentes é a ausência de formas elípticas nestas imagens, as quais são características de imagens processadas através do algoritmo DAS. Muitos dos artefatos indesejados presentes na imagem possuem formatos que apresentam estas características, desta maneira a eliminação ou redução de amplitude de artefatos que possuam este tipo de característica poderá contribuir para uma melhor localização do defeito através do resultado de imagem. Na Figura 82 (b), a qual é gerada pela adição dos componentes a partir do 5 até o 150 da decomposição SVD, é possível notar que a característica de formas elípticas esta contida por estes componentes. A Figura 82 (a) apresenta o resultado obtido pela soma (com os pesos especificados) dos 4 primeiros componentes apresentados pela Figura 81, onde uma indicação

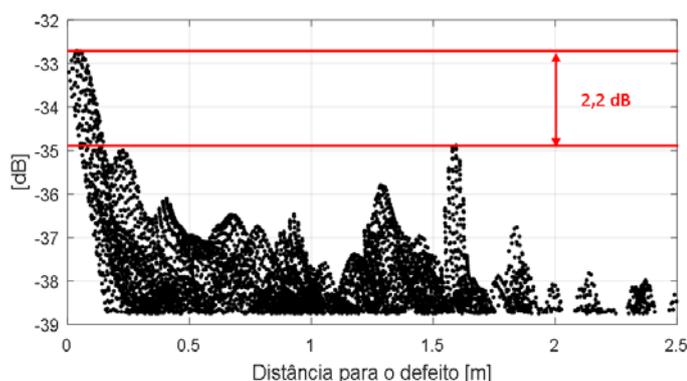
clara do defeito pode ser vista. Para o exemplo do Defeito 1 com 50% de perda de espessura, houve um ganho de aproximadamente 1dB quando o novo resultado é comparado com o resultado de SNR do processamento original (apresentado na Figura 67 (a)). A nova relação entre a indicação do sinal e artefatos após o processamento pela reconstrução com SVD pode ser vista na Figura 83.

Figura 82 – Aplicação da reconstrução SVD na imagem – Exemplo para resultado do Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Reconstrução utilizando os 4 primeiros componentes singulares. (b) Reconstrução utilizando o somatório dos componentes 5 ao 150.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

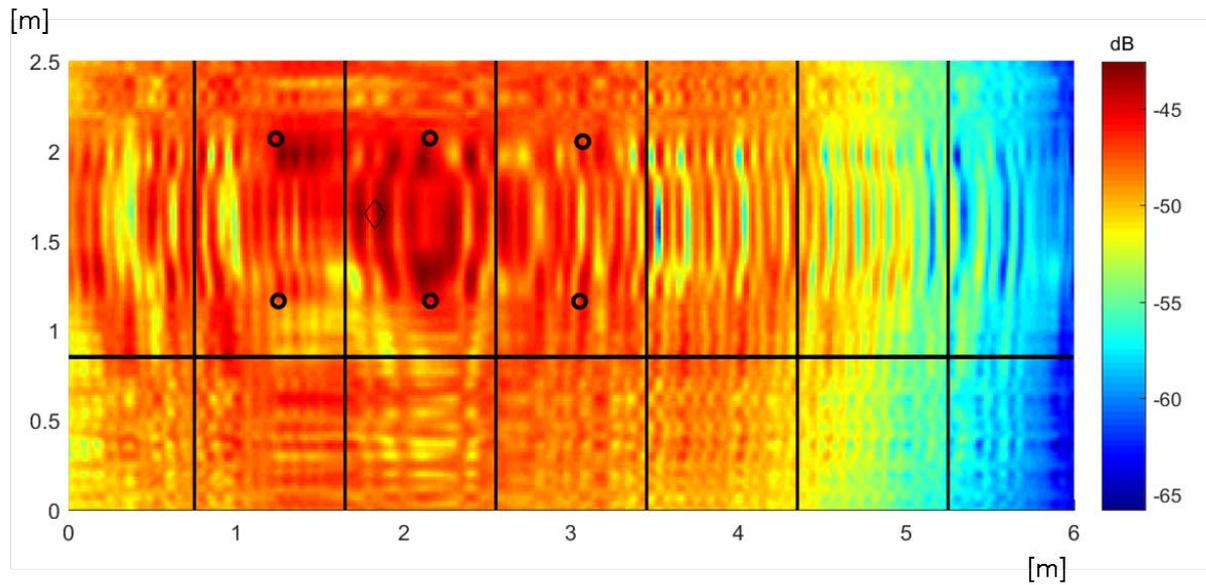
Figura 83 – Distância do defeito dos 10% maiores pixels da imagem após a reconstrução utilizando SVD. Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

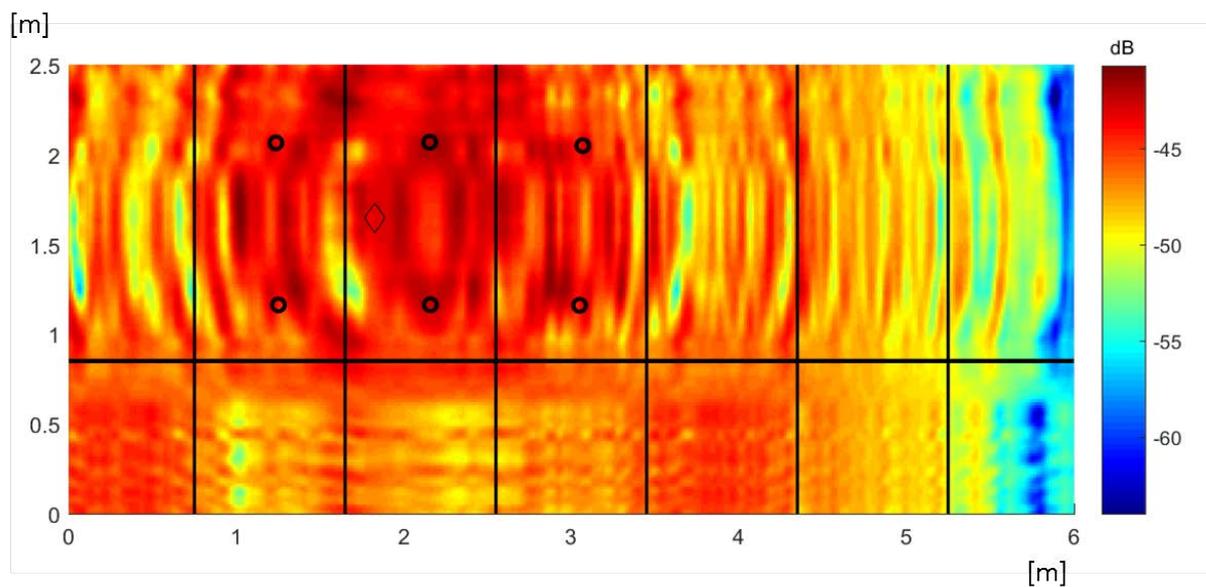
Os resultados obtidos para a reconstrução das imagens através do método utilizando SVD para os casos sem a presença do defeito e com a presença do Defeito 1 são apresentados a partir da Figura 84 até a a Figura 89.

Figura 84 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para corpo de prova íntegro com 0% de perda de espessura.



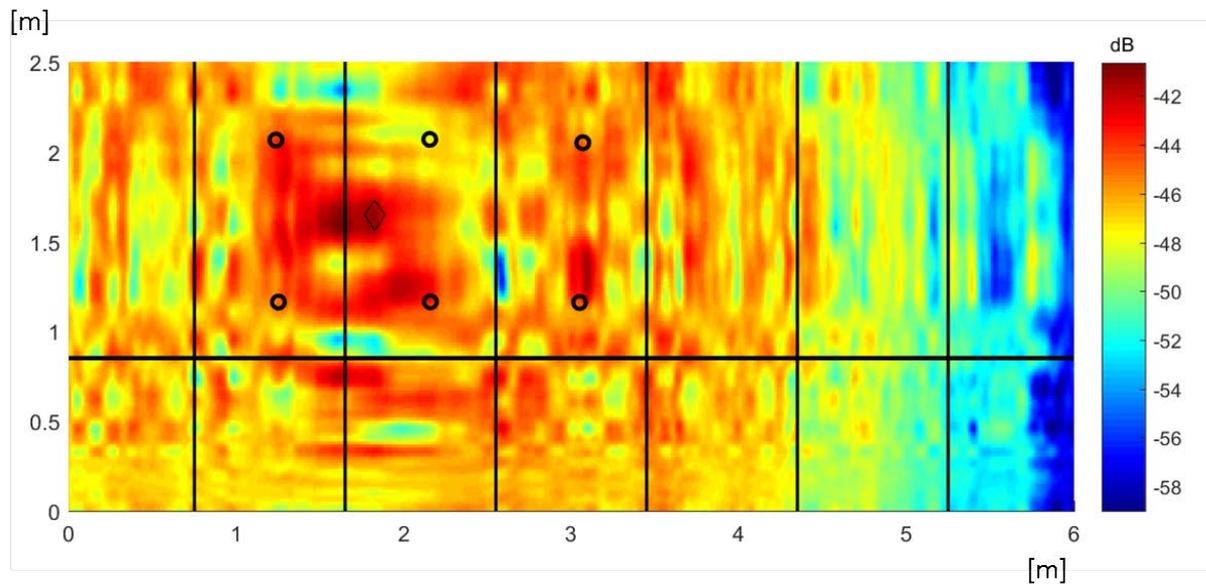
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 85 – Resultado mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 10% de perda de espessura.



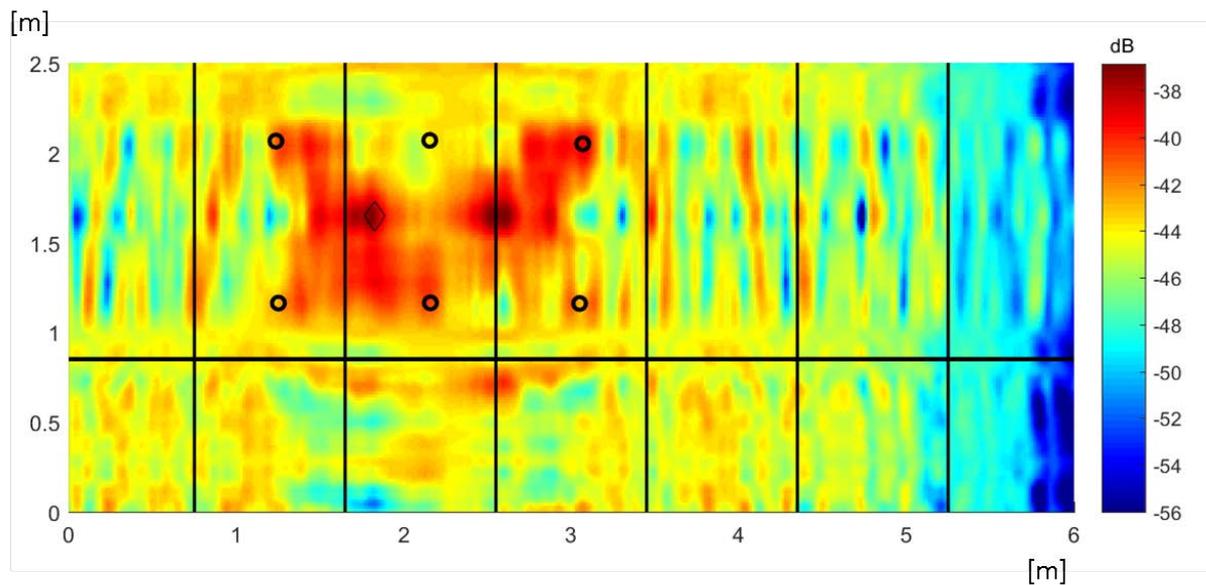
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 86 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 20% de perda de espessura.



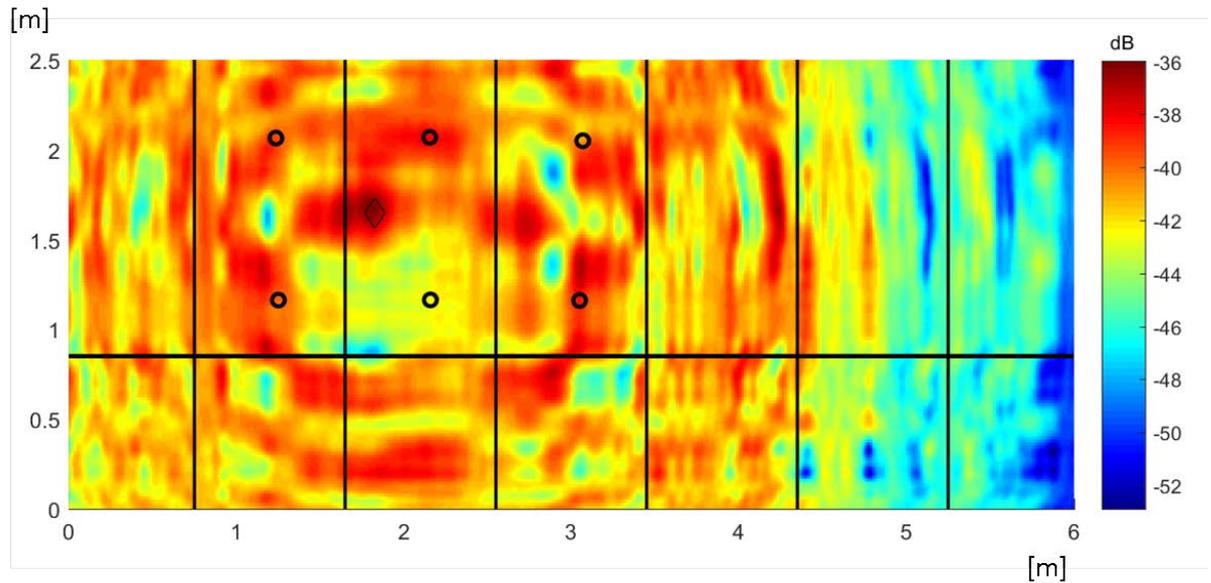
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 87 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 30% de perda de espessura.



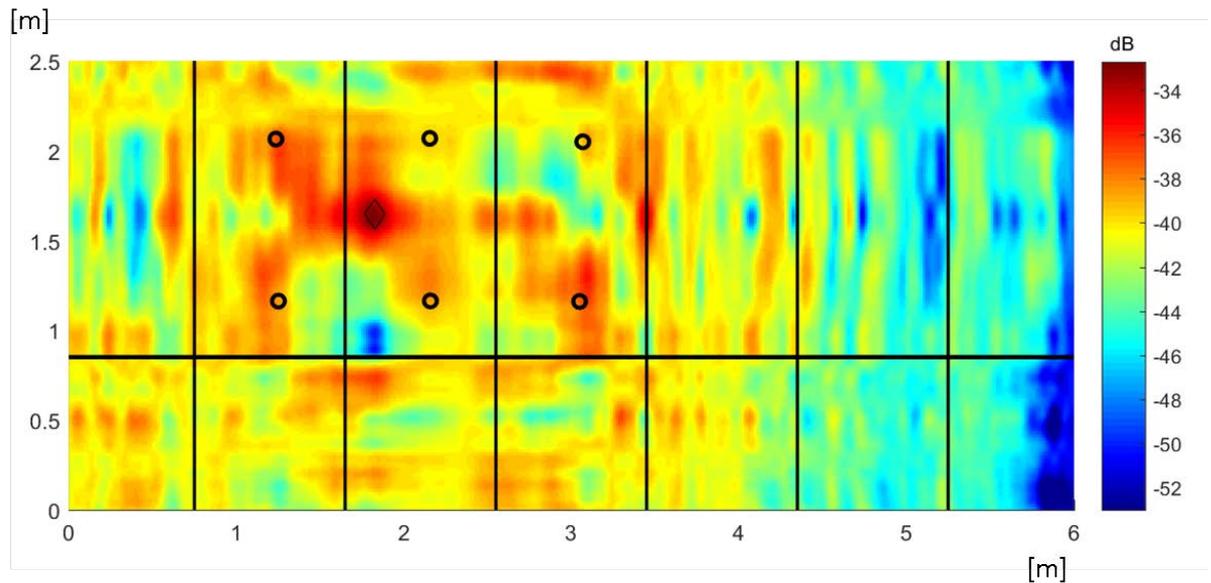
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 88 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 40% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

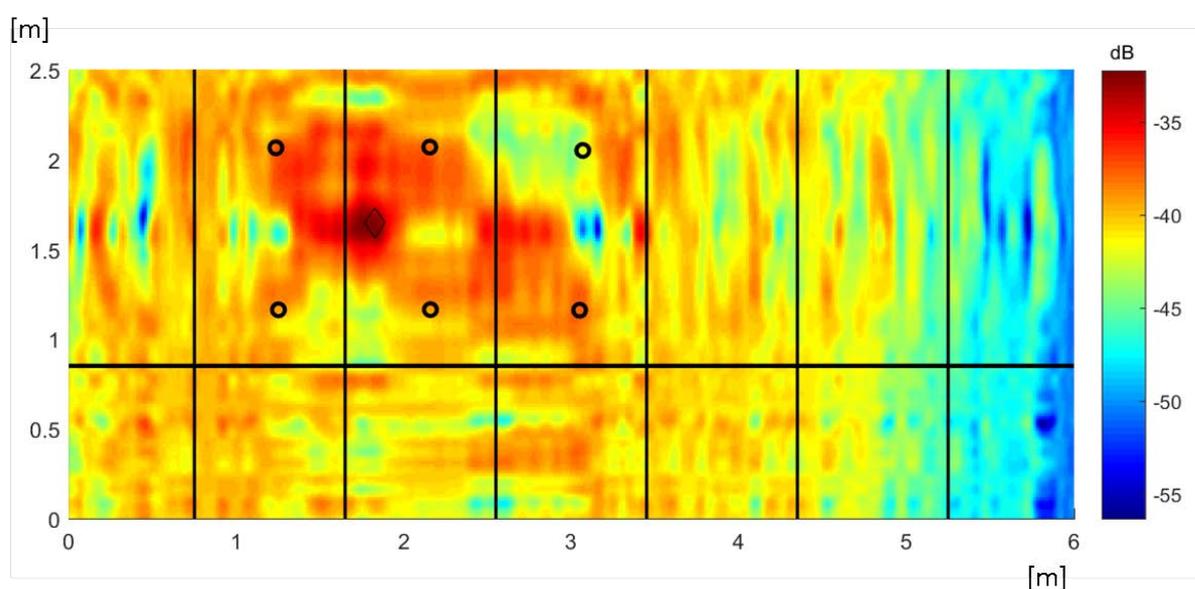
Figura 89 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

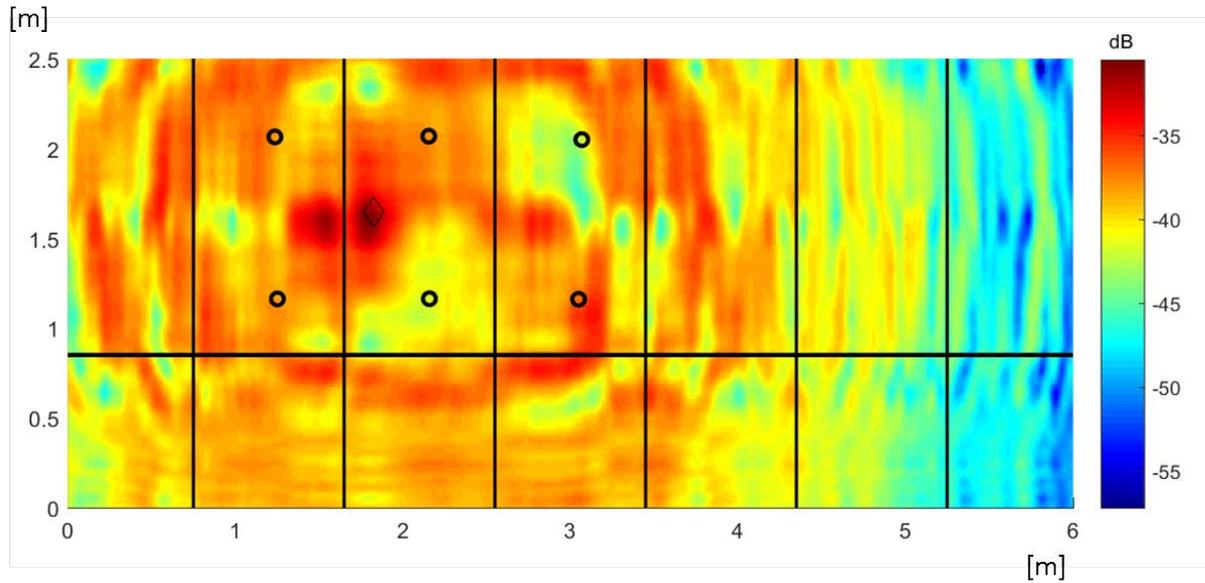
Analisando os resultados obtidos, percebe-se que ocorreu uma mudança na característica da imagem, com uma menor quantidade de elementos elípticos e com um destaque mais pontual para algumas regiões com indicação de defeito. Novamente, para as imagens sem defeito e com 10% de perda de espessura não ocorreu nenhuma indicação notável da localização de qualquer tipo de defeito. Para o caso de 20% de perda de espessura, nota-se que o novo resultado indica com maior intensidade uma região próxima da localização do defeito, o que não havia sido possível de se afirmar anteriormente com os resultados originais do algoritmo DAS e aplicando somente o pós-processamento com a mudança da distribuição probabilística da imagem. Embora não se possa afirmar com clareza que o defeito tenha sido localizado neste caso, nota-se uma evolução no sentido em que a indicação da nova imagem estar mais próxima da indicação real do defeito de 20% de perda de espessura. Para o defeito com 30% de perda de espessura, nota-se uma redução generalizada dos artefatos da imagem, com exceção de um artefato com amplitude muito próxima da amplitude do defeito, que se manteve notável na indicação da imagem. Para as perdas de 40% e 50%, foi possível de se identificar o defeito com clareza, assim como nos casos anteriores. Os resultados do processamento através de reconstrução da imagem utilizando o SVD para o Defeito 2 são apresentados da Figura 90 até a Figura 95.

Figura 90 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(10%) de perda de espessura.



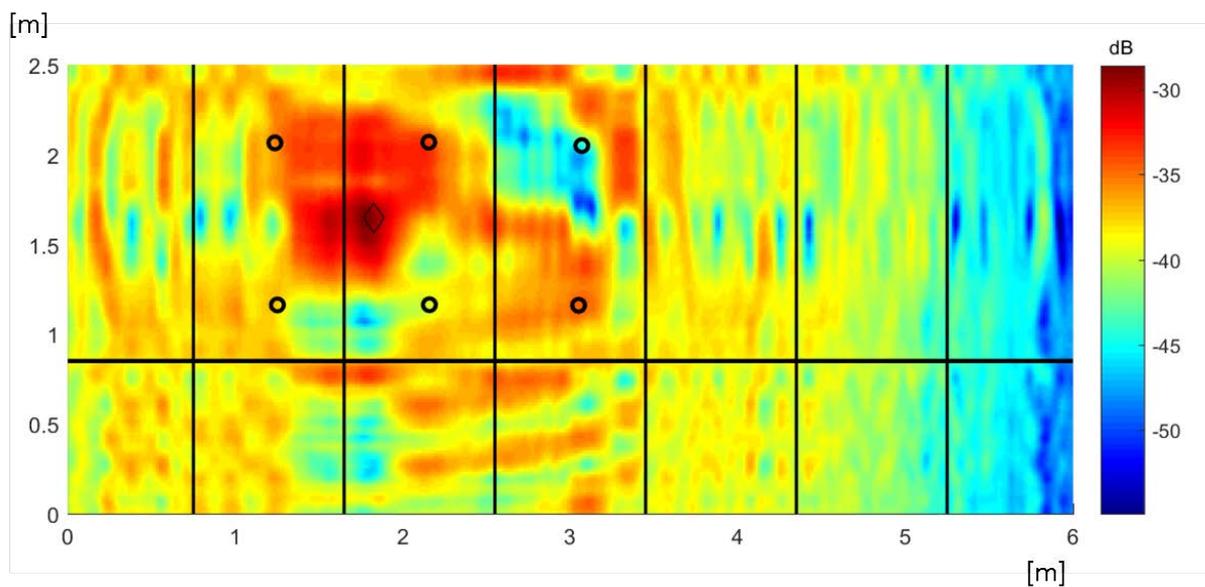
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 91 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(20%) de perda de espessura.



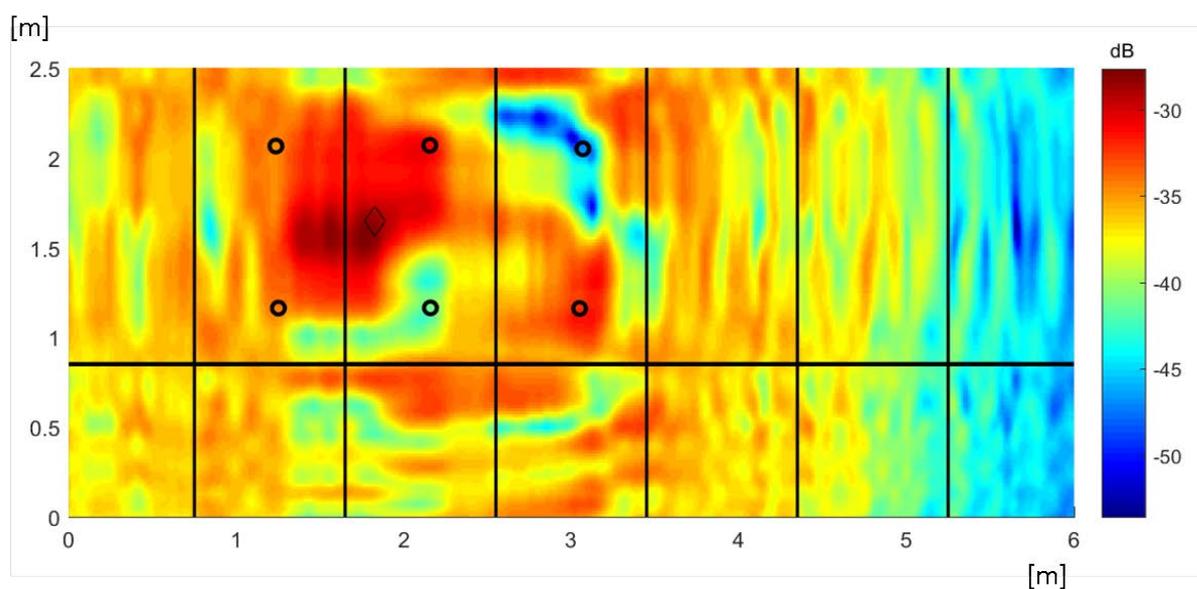
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 92 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(30%) de perda de espessura.



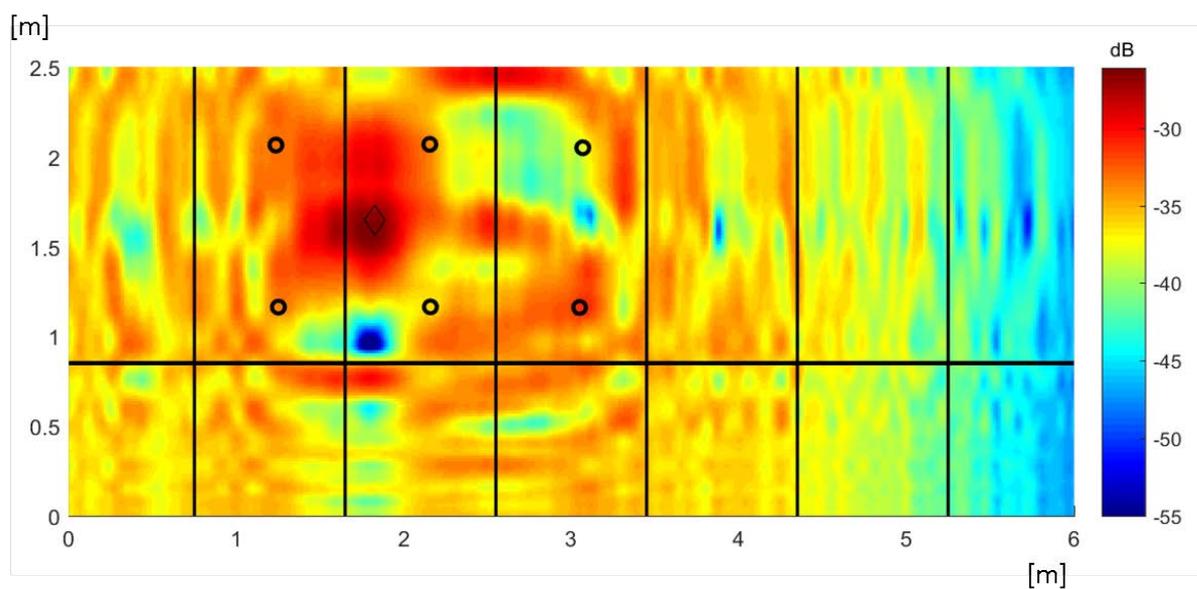
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 93 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(40%)de perda de espessura.



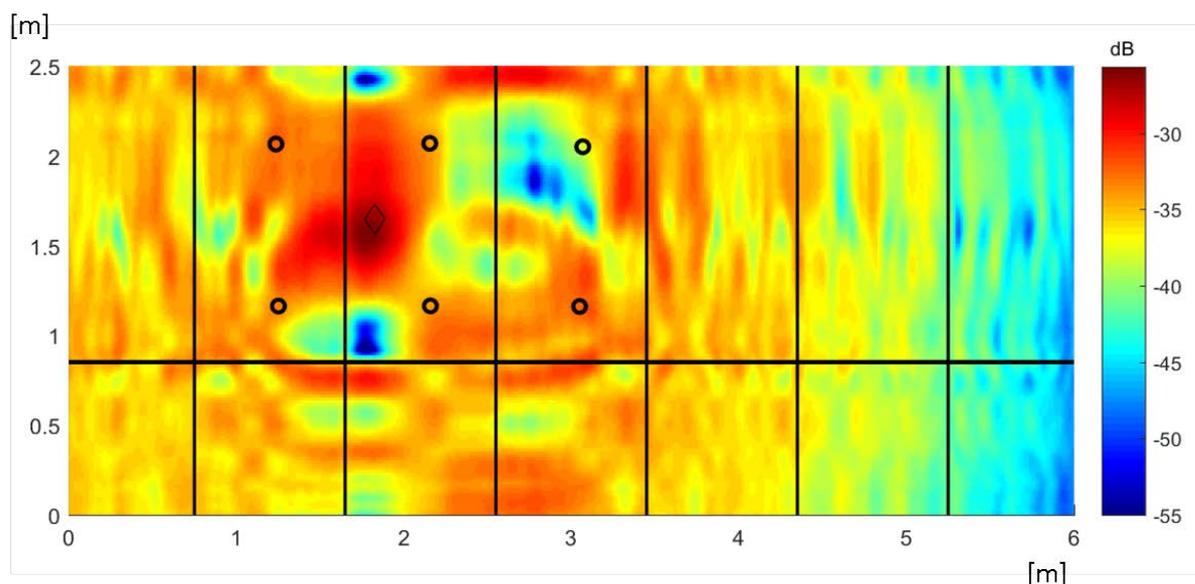
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 94 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(50%)de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 95 – Resultado após mudança com processamento pelo SVD para Defeito 2 com 60%(60%) de perda de espessura.



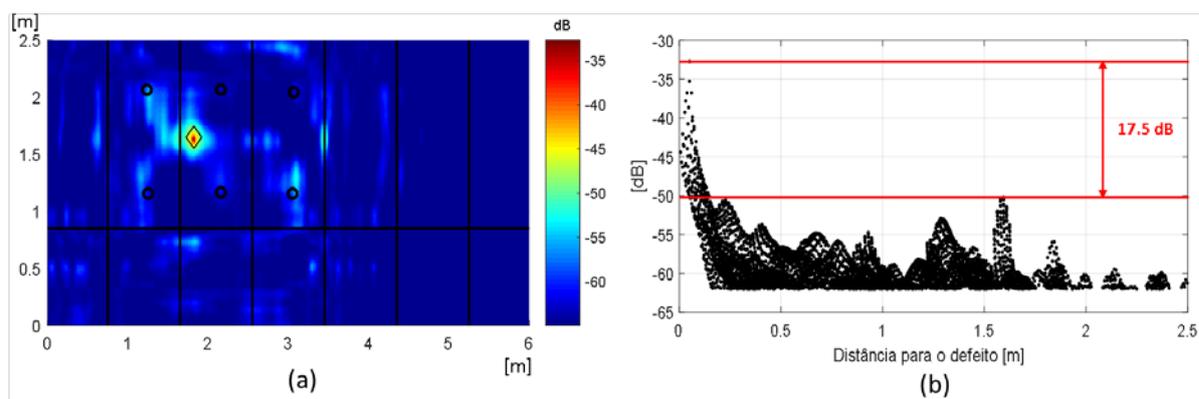
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Assim como para os resultados do Defeito 1, as imagens processadas do Defeito 2 também se apresentaram sem a presença marcante de elementos elípticos. Para todas as profundidades foi possível de se identificar a localização do defeito após o processamento. Em comparação com as imagens obtidas originalmente pelo algoritmo DAS, nota-se também uma redução na amplitude de artefatos bastante destacados à esquerda da identificação do defeito, como nos casos de 60%(20%) e 60%(40%) de profundidade, melhorando a clareza na localização do mesmo.

4.3.3 Combinação de Estratégias

A terceira opção de pós-processamento proposta consistiu na aplicação das duas técnicas previamente testadas aplicadas em conjunto, aplicando-se inicialmente a reconstrução da imagem por SVD seguida pela mudança na distribuição probabilística da imagem. A Figura 96 apresenta o resultado do pós-processamento para o caso do Defeito 1 com 50% de perda de espessura.

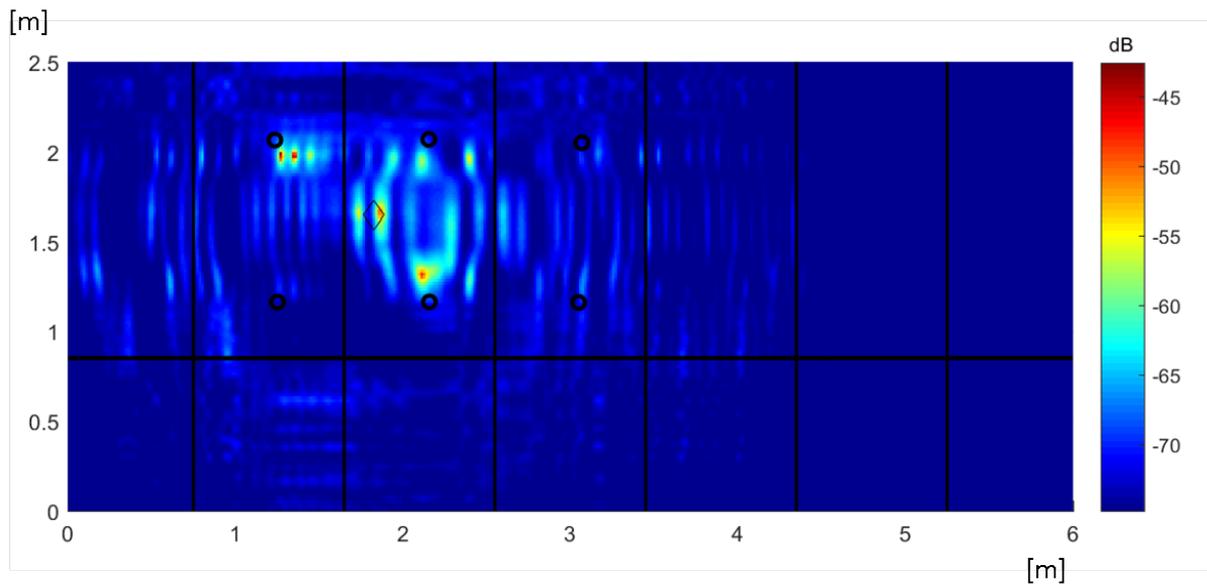
Figura 96 – Aplicação do método de pós-processamento com estratégias combinadas – Exemplo para Defeito 1 com 50% de perda de espessura. (a) Imagem resultante. (b) Distância do defeito dos 10% maiores pixels da imagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

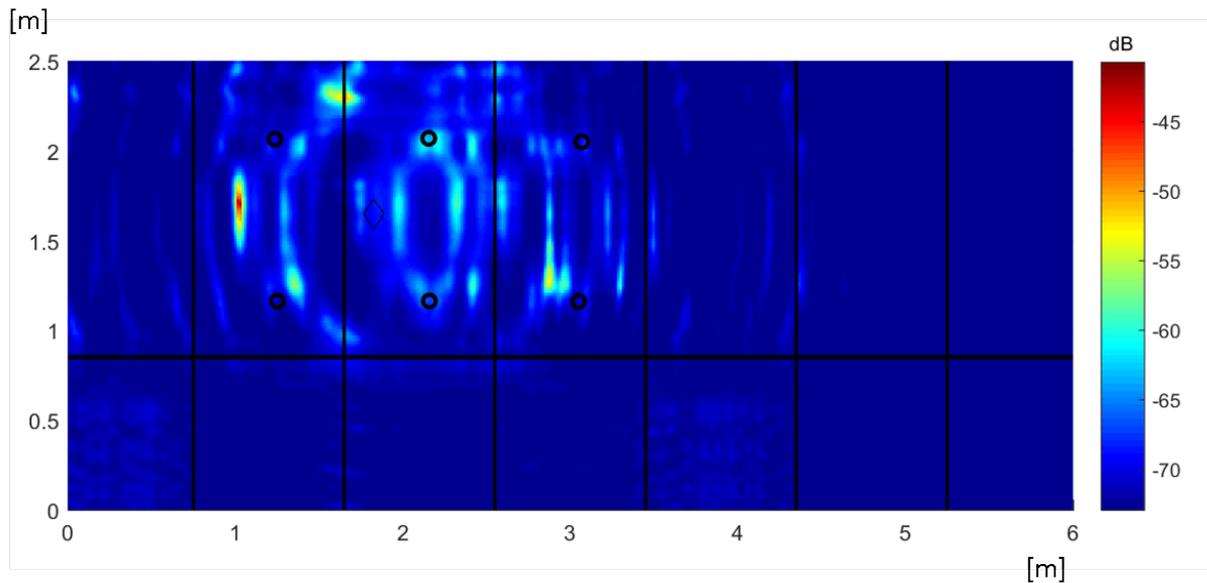
Com a aplicação dos dois métodos em conjunto foi possível de se obter uma relação entre a indicação do defeito e artefatos de até 17,5dB para esta profundidade, valor superior ao apresentado utilizando os processamentos de forma única. Este valor foi aproximadamente 2dB superior ao apresentado utilizando-se apenas a mudança na distribuição probabilística. Os resultados de imagem desta metodologia de pós-processamento aplicada para o caso sem defeitos e para os Defeitos 1 e 2 em todas as duas profundidades são apresentados a partir da Figura 97 até a Figura 108.

Figura 97 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para corpo de prova íntegro com 0% de perda de espessura.



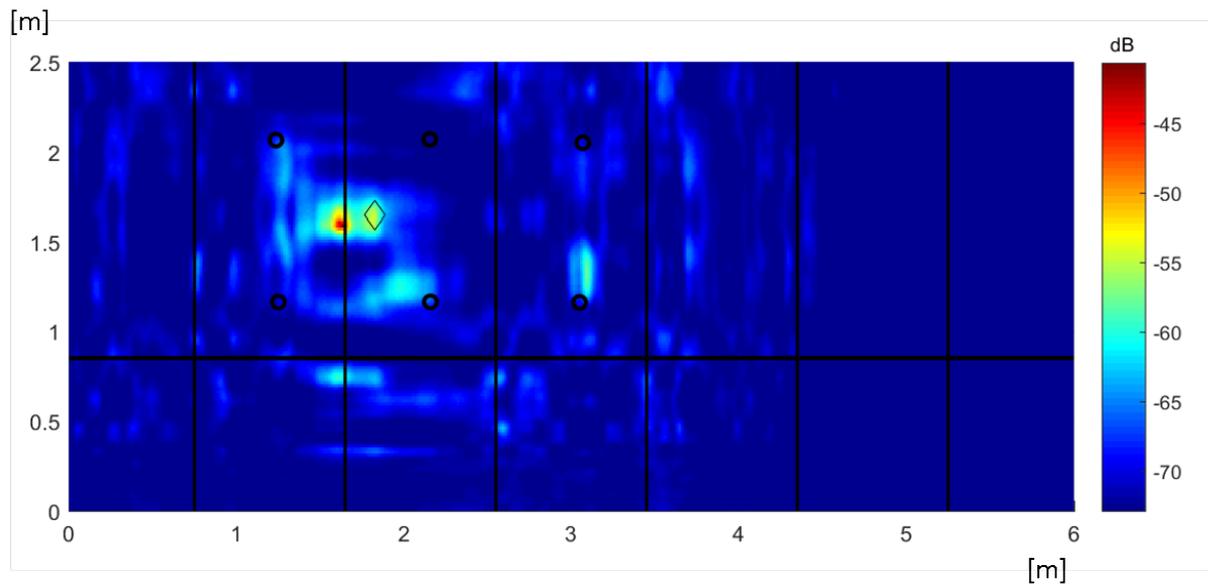
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 98 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 10% de perda de espessura.



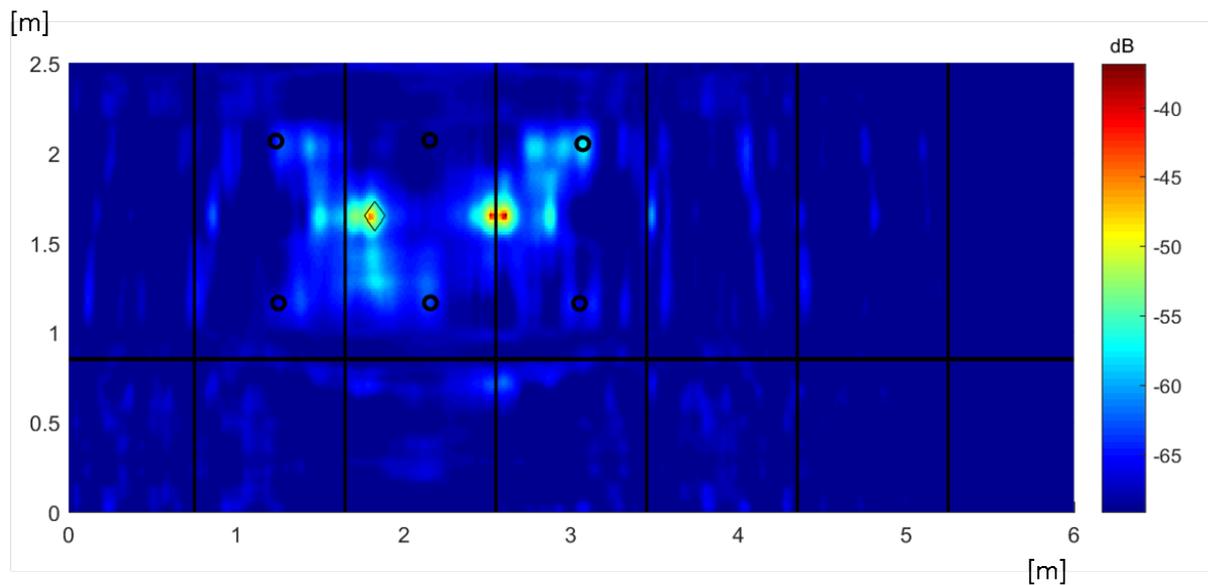
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 99 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 20% de perda de espessura.



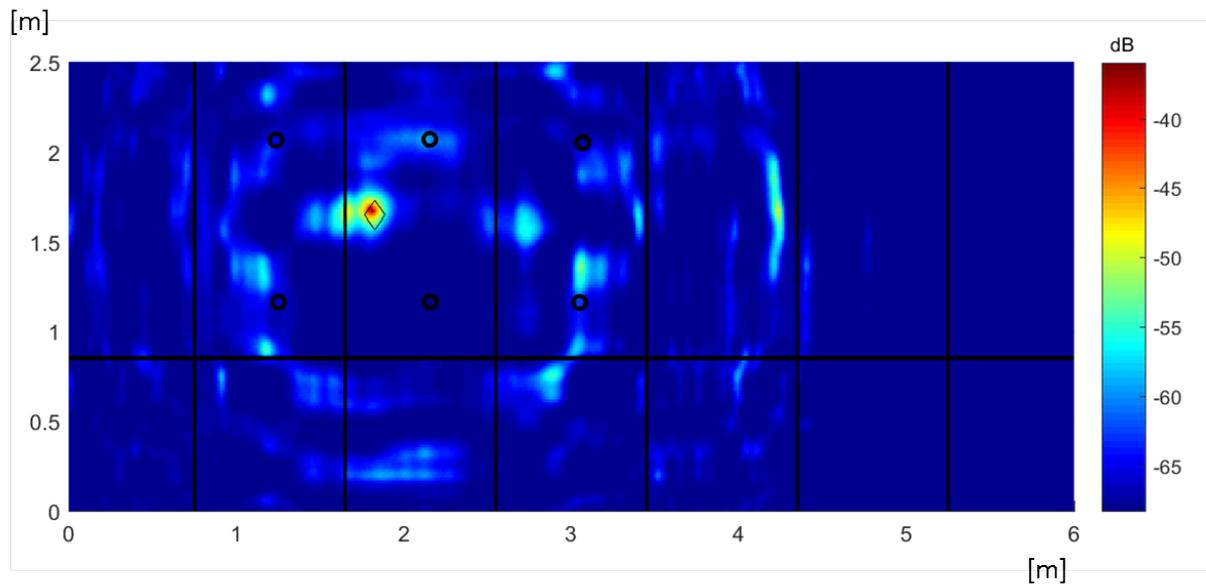
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 100 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 30% de perda de espessura.



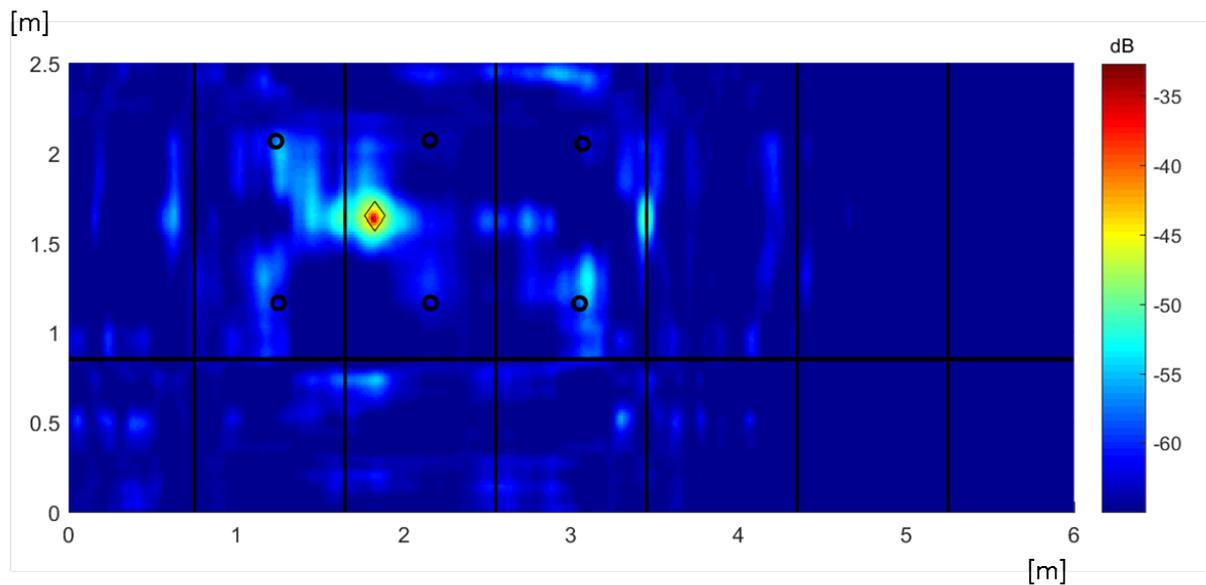
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 101 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 40% de perda de espessura.



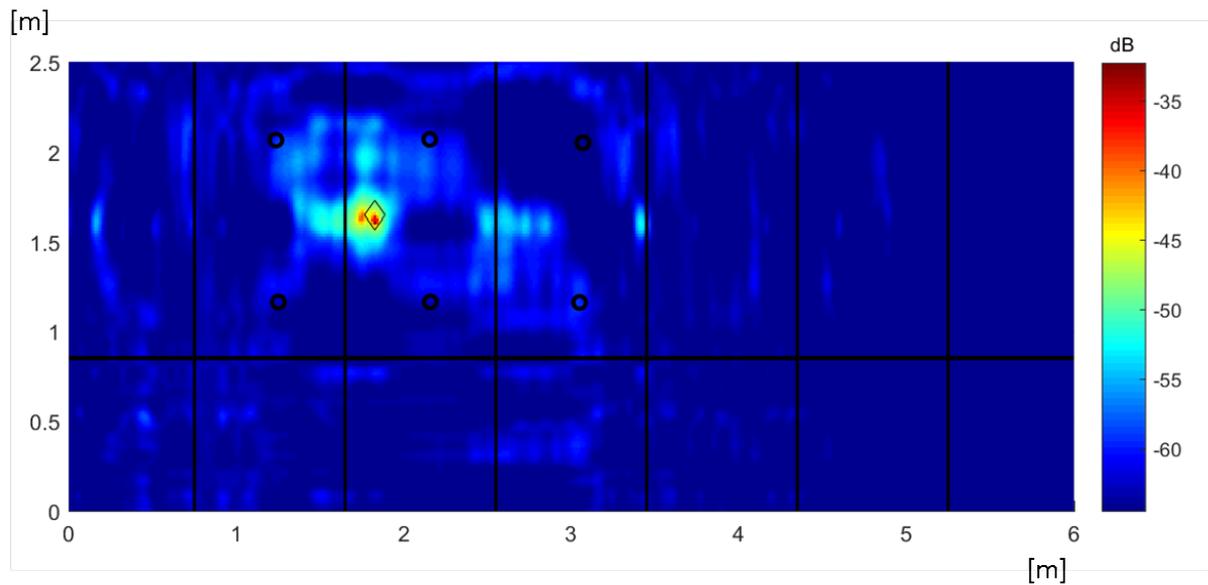
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 102 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 1 com 50% de perda de espessura.



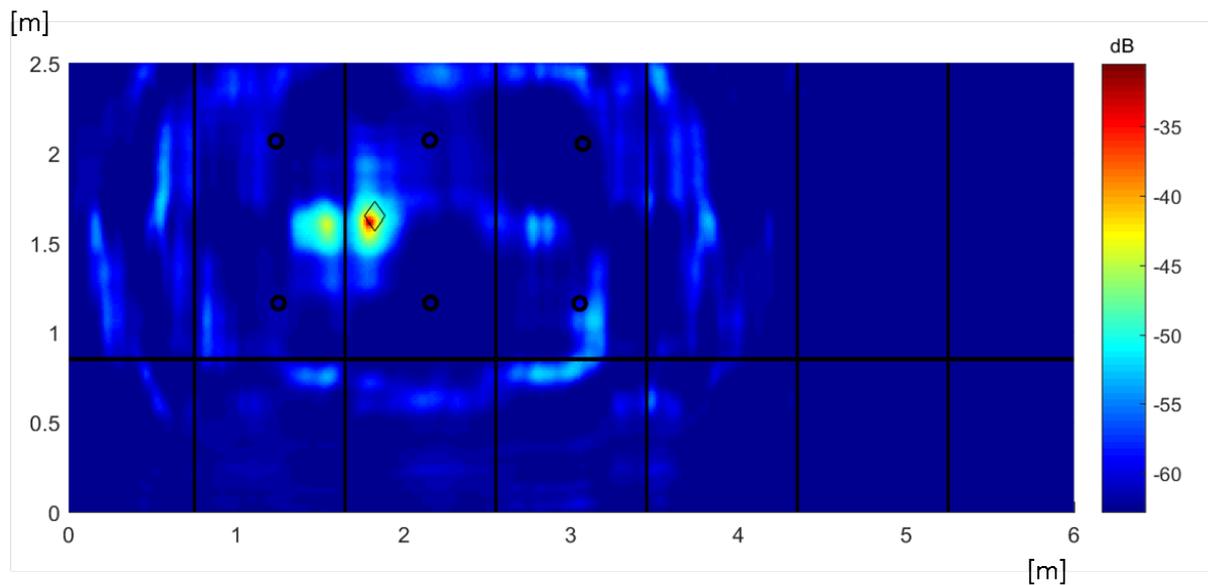
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 103 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60% (10%) de perda de espessura.



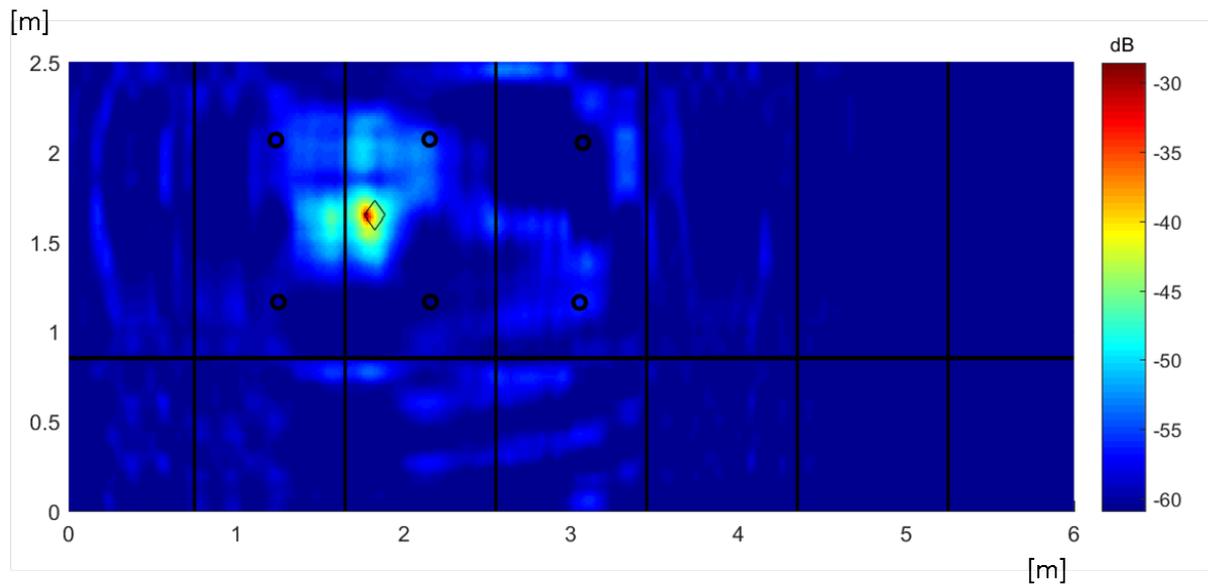
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 104 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60% (20%) de perda de espessura.



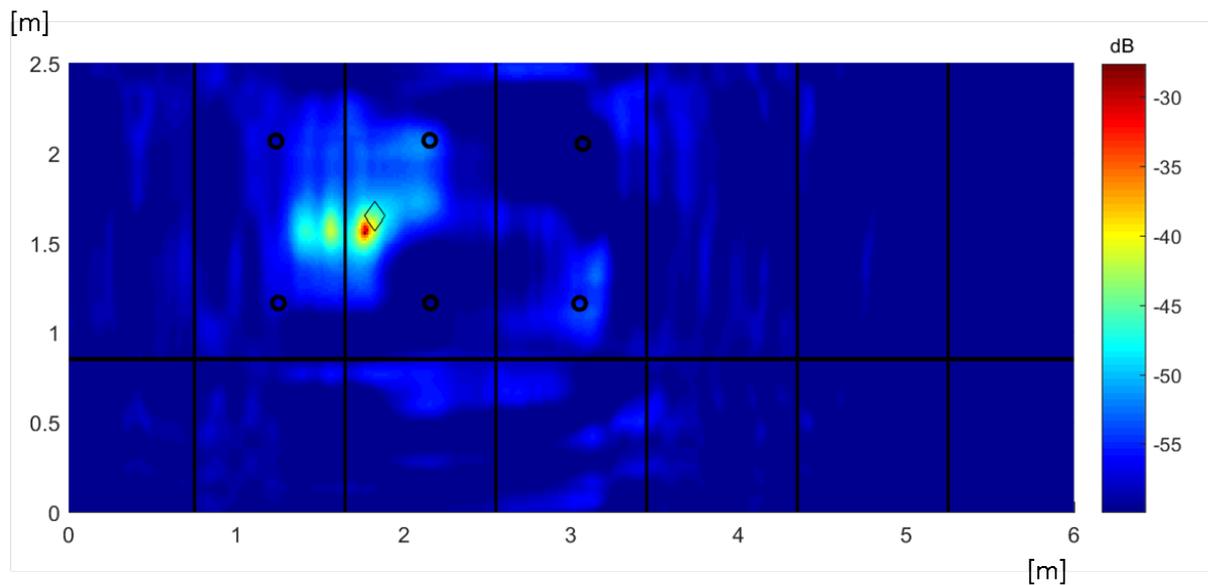
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 105 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60% (30%) de perda de espessura.



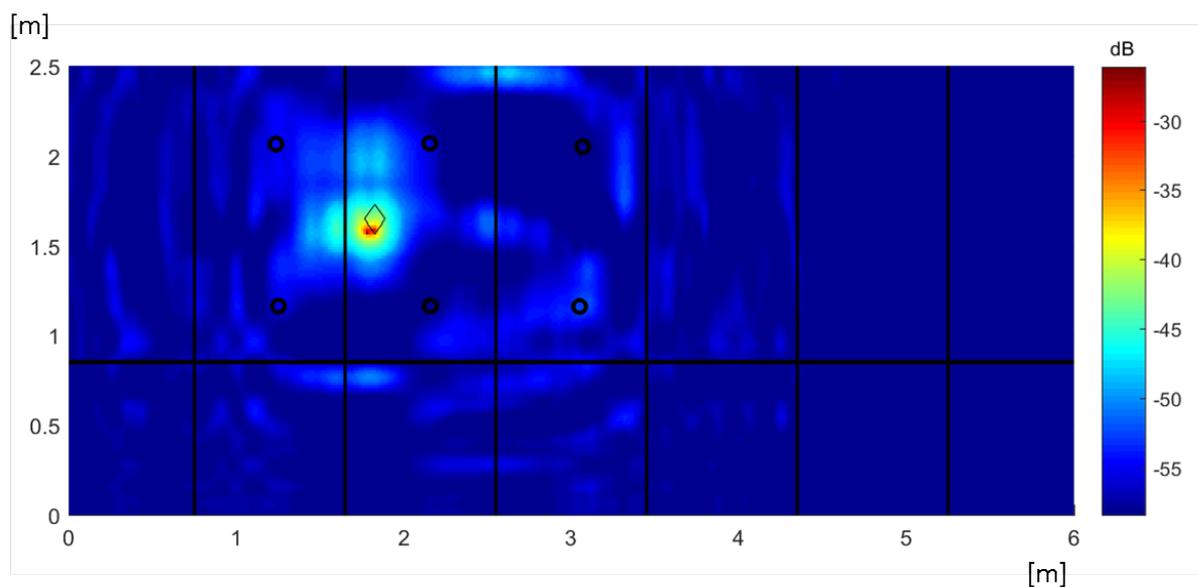
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 106 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60% (40%) de perda de espessura.



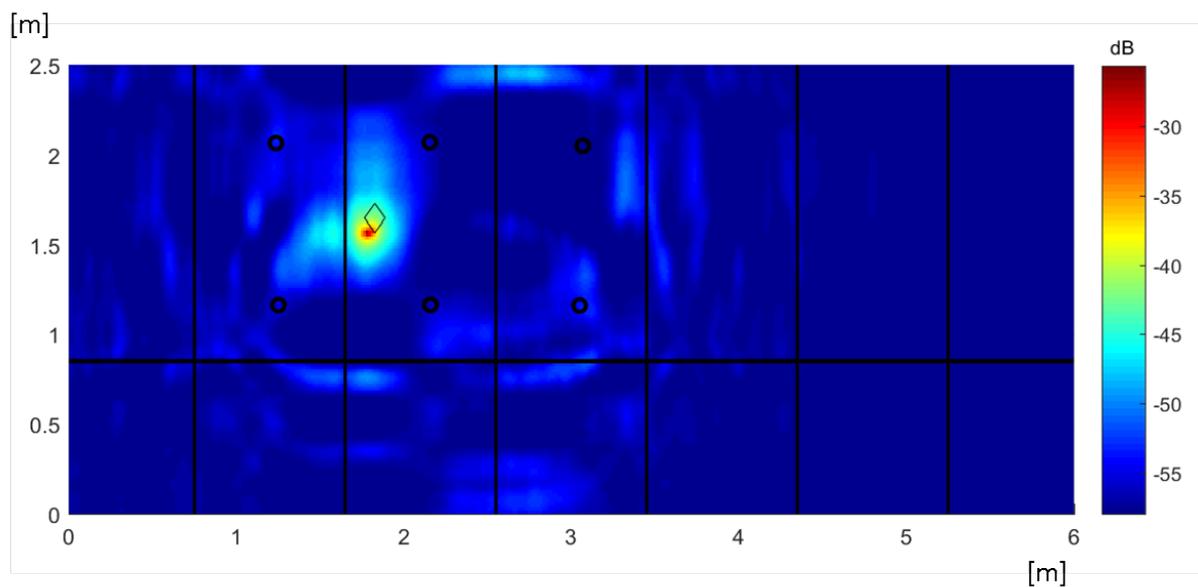
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 107 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60% (50%) de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 108 – Resultado após mudança com métodos de pós-processamento combinados para Defeito 2 com 60% (60%) de perda de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Ao se avaliar os resultados obtidos com a utilização das duas estratégias de pós-processamento em conjunto percebe-se que houve uma contribuição de ambos os métodos tanto para uma redução de artefatos em formatos elípticos como para a redução de demais artefatos com amplitudes menores e um conseqüente maior destaque para a indicação do defeito. Os resultados obtidos apresentaram um padrão semelhante ao obtido utilizando-se apenas a reconstrução das imagens pelo método SVD, com a diferença de que também apresentaram ganhos de amplitude na indicação do defeito e melhorias na relação sinal-ruído na mesma ordem dos resultados obtidos utilizando-se a técnica de mudança da distribuição probabilística da imagem.

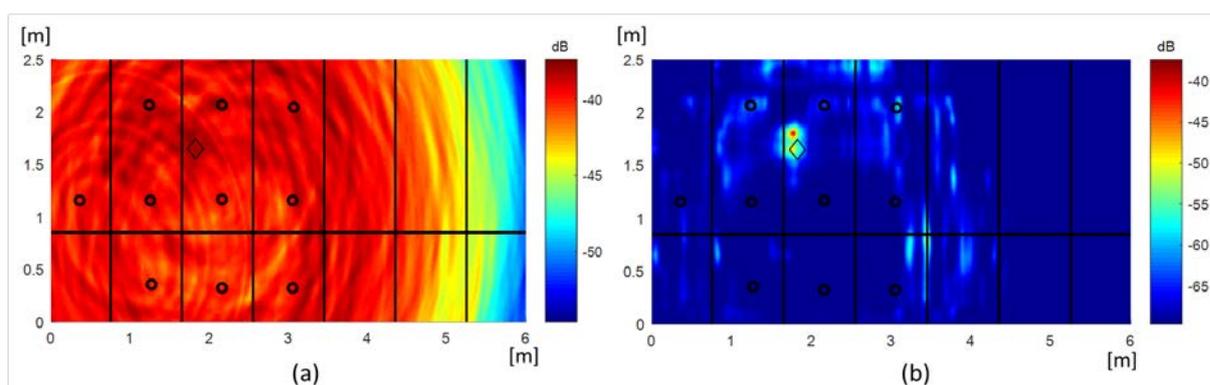
Novamente, a imagem relativa ao caso sem defeitos e ao caso de 10% de perda de espessura do primeiro defeito não apresentaram nenhum tipo de localização de defeito. O resultado para 20% de perda de espessura do Defeito 1 apresentou uma região próxima ao defeito com maior intensidade e destacada do restante da imagem, de forma semelhante ao obtido com o processamento utilizando SVD. Desta vez, no entanto, a região se tornou mais destacada e notável. Para o resultado de 30% de perda de espessura do Defeito 1 a indicação do defeito inicia a se tornar mais clara, embora exista ainda um artefato destacado e com amplitudes semelhantes para este caso. A partir de 40% de perda de espessura, o defeito passou a ser detectado com clareza e sem a presença de artefatos com a mesma ordem de grandeza.

No caso do Defeito 2 todas as profundidades foram novamente localizadas com êxito. Percebe-se, em comparação com os demais tipos de processamento, que se obteve uma melhora na redução de artefatos indesejados que haviam sido apresentados anteriormente. Essa alteração é facilmente notada no caso de 60%(40%) de perda de espessura quando comparado ao resultado obtido através da mudança de distribuição probabilística. Através da utilização dos dois métodos de pós-processamento em conjunto, nota-se que os artefatos presentes próximos ao defeito tiveram sua amplitude reduzida.

Para se avaliar o efeito causado pela utilização dos dois métodos de pós-processamento de forma conjunta em imagens que não foram geradas nas melhores condições de operação do sistema, são apresentados a seguir dois exemplos gerados utilizando-se o conjunto completo dos dez transdutores instalados no corpo de provas atuando com frequência central de 40kHz. Na Figura 109 são apresentados os resultados da imagem original gerada pelo algoritmo DAS e a imagem resultante do pós-processamento para o caso do Defeito 1 com 20% de perda de espessura. Nota-se que na imagem original gerada com o

algoritmo DAS não é possível de se localizar o defeito, visto que são notados apenas artefatos espalhados pela região do arranjo, impossibilitando qualquer tipo de afirmação a respeito da correta localização do mesmo. Ao se avaliar o resultado da imagem processada, percebe-se uma região destacada que se encontra muito próxima do defeito, que foi possível de ser notada somente após a diminuição de artefatos que estavam mascarando a presença da mesma.

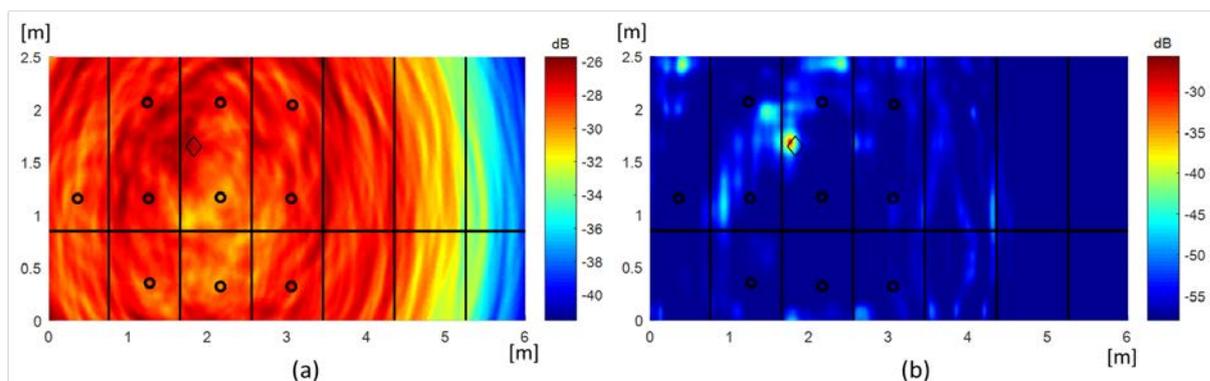
Figura 109 – Processamento utilizando conjunto de dez transdutores – Exemplo para Defeito 1 com 20% de perda de espessura. (a) Imagem original do algoritmo DAS. (b) Imagem resultante do pós-processamento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 110 apresenta os resultados da imagem original gerada pelo algoritmo DAS e a imagem resultante do pós-processamento para o caso do Defeito 2 com 50% de perda de espessura. Este caso se trata de uma das maiores dimensões de defeito testadas no corpo de prova e, portanto, o defeito deveria ser localizado de forma bastante clara. No entanto, nota-se que o mesmo não está claramente indicado ao se avaliar a imagem originalmente gerada pelo algoritmo DAS. A presença de transdutores perto das bordas do painel, onde estão presentes um ou mais reforços estruturais entre suas posições e o defeito, introduz muitas reflexões indesejadas com alta amplitude nos sinais adquiridos. Estas reflexões geram artefatos que podem inclusive mascarar a presença de um defeito de grandes dimensões, conforme observado na Figura 110 (a). Com a aplicação dos métodos de pós-processamento na imagem original percebe-se que o defeito passa a ser localizado de forma bastante clara, visto que os artefatos de alta amplitude que prejudicavam a visualização do mesmo foram suprimidos.

Figura 110 – Processamento utilizando conjunto de dez transdutores – Exemplo para Defeito 2 com 60%(50%) de perda de espessura. (a) Imagem original do algoritmo DAS. (b) Imagem resultante do pós-processamento.

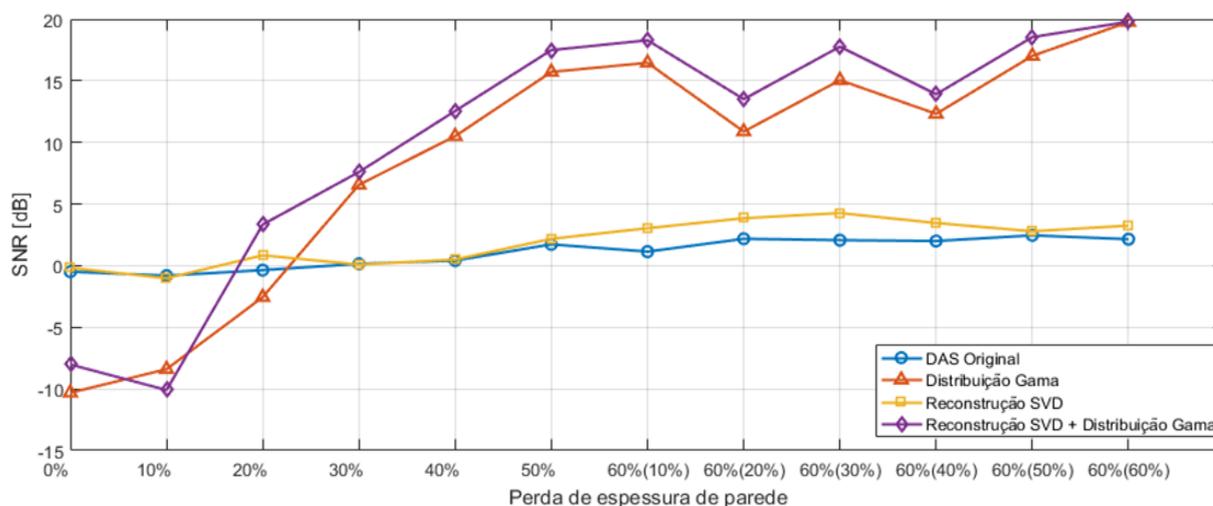


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4.3.4 Avaliação dos Níveis de Sinal Ruído

A Figura 111 apresenta os níveis da relação sinal-ruído (SNR) para os diferentes métodos de pós-processamento aplicados aos dados em cada profundidade de defeito.

Figura 111 – Relação Sinal-Ruído (SNR) para cada resultado de processamento de imagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A partir dos resultados apresentados, é evidenciado que os processamentos envolvendo uma mudança na distribuição probabilística da imagem geram um impacto muito maior em relação ao aumento dos níveis de sinal-ruído da imagem. O processamento utilizando a reconstrução por SVD apresentou, de uma maneira geral, ganhos menores do que os apresentados utilizando a mudança na distribuição probabilística da imagem. No entanto, tais ganhos foram obtidos através de alterações nos elementos que formam a imagem, o que poderá possibilitar também uma melhora na sensibilidade de localização dos defeito.

Para os casos até 20% de perda de espessura percebe-se que a relação sinal-ruído é afetada muitas vezes de forma negativa. Visto que a ausência da correta localização do defeito nestes casos resulta com que os elementos aleatórios de maior amplitude da imagem sejam realçados quando a imagem é processada através da mudança na distribuição probabilística. Para as relações apresentadas nos casos em que o Defeito 1 é localizado, é notável que existe um crescimento monotônico da mesma de acordo com o aumento da profundidade do defeito. Esta característica não é notada para o Defeito 2, onde existe uma oscilação dos valores apresentados. Esse comportamento pode ser explicado devido à forma de evolução do Defeito 2 a qual, embora tenha apresentado um crescimento na amplitude das reflexões diretamente oriundas da frente de onda que interage com o mesmo, também apresentou uma significativa interferência em outros sinais que foram refletidos de elementos benignos da estrutura. Como resultado, ocorreu também um aumento na amplitude dos sinais residuais da imagem.

De uma maneira geral, os resultados para a relação sinal-ruído obtidos através do pós-processamento utilizando a reconstrução SVD combinada com a mudança na distribuição probabilística da imagem apresentaram as maiores amplitudes. Comparando-se os resultados de imagem entre todos os processamentos testados no presente capítulo, nota-se que este tipo de estratégia foi a que trouxe um maior benefício em relação à correta localização do defeito e diminuição de artefatos indesejados da imagem.

5 CONCLUSÕES

Um novo sistema para monitoramento por ondas guiadas utilizando um arranjo esparsos de transdutores de modo SH_0 omnidirecional e operando em uma configuração *pitch-catch* foi testado com sucesso em um painel que simula uma região representativa de um tanque de carga de uma unidade FPSO, no qual foram usinados defeitos artificiais com severidade crescente para simular perdas de espessura por corrosão localizada. O arranjo de transdutores permanentemente instalados na estrutura foi capaz de localizar corretamente defeitos circulares de 50mm de diâmetro com profundidades acima de 20% de perdas de espessura de parede. Defeitos maiores usinados de forma subsequente também foram localizados de forma satisfatória.

Ambos os índices de dano testados, médias e valores máximos dos pixels resultantes da imagem do algoritmo DAS, apresentaram um crescimento monotônico relativo ao incremento de severidade dos defeitos do painel. Estas duas métricas demonstraram, portanto, serem capazes de acusar a presença dos defeitos dentro da região do arranjo de transdutores.

A aplicação do algoritmo DAS nos sinais residuais obtidos através dos transdutores do arranjo utilizado permitiu a localização de grande parte dos defeitos com diferentes profundidades testadas. No entanto, em diversas destas medidas a relação sinal-ruído apresentada entre artefatos indesejados e a indicação do defeito foi baixa, na ordem de 2 dB. Para aumentar a relação sinal-ruído das imagens, suprimir artefatos indesejados e melhorar a visualização e interpretação dos resultados foram propostos três diferentes métodos de pós-processamento dos resultados de imagem: um baseado em uma transformação na distribuição probabilística da imagem, outro baseado em uma reconstrução da imagem utilizando SVD, e o terceiro sendo uma combinação dos dois primeiros métodos.

O método baseado na transformação da distribuição probabilística da imagem apresentou um aumento na relação sinal-ruído de até 17,2 dB. O método que utiliza uma reconstrução da imagem utilizando SVD apresentou um incremento na relação sinal-ruído de até 2,5 dB. Este método também gerou alterações no formato dos artefatos indesejados presentes, tornando os mesmos menos pronunciados. A utilização do método que combina os dois processamentos anteriores levou a ganhos na relação sinal-ruído de até 18 dB, sendo este o método de pós-processamento que apresentou o melhor desempenho entre os três, unindo as vantagens apresentadas por cada um dos métodos anteriormente testados.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, novas configurações de ensaios podem ser realizadas como a inclusão de defeitos com geometrias diferentes das utilizadas. Além disso, o sistema poderá ser testado em condições alternativas de operação como, por exemplo, em um ambiente submerso, verificando-se a aplicabilidade do mesmo em condições mais próximas das condições de operação de uma estrutura real.

Outro estudo relevante que poderá ser conduzido é o teste do sistema ao longo do tempo, aguardando períodos maiores entre a coleta de medidas de base e medidas com defeitos presentes. Desta forma, será possível de se avaliar a estabilidade e confiabilidade do mesmo após longos períodos, verificando-se também a influencia do envelhecimento de adesivos de acoplamento na resposta gerada, e também a eficácia dos algoritmos de compensação de temperatura e fase utilizados na fase de pré-processamento dos sinais.

Utilizando-se os dados gerados no presente trabalho, novos algoritmos para detecção e localização dos defeitos poderão ser estudados, aplicando-se técnicas mais recentes como algoritmos de aprendizagem de máquina.

REFERÊNCIAS

ABAQUS DOCUMENTATION. **Simulia Abaqus 6.14 Documentation**. Disponível em:

<<http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>>. Acesso em: 04 mai. 2016.

AL-AMEEN, Z. et al. An innovative technique for contrast enhancement of computer tomography images using normalized gamma-corrected contrast-limited adaptative histogram equalization. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, v. 2015:32, Abr. 2015.

ALLEYNE, D., CAWLEY, P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multicode signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 89, n. 3, p. 1159-1168, Mar. 1991.

ALLEYNE, D. N. et al. Rapid, long range Inspection of chemical plant pipework using guided waves. **AIP Conference Proceedings**, v. 557, Issue 1, n. 180, Jun. 2001.

ALOKITA, S. et al. Recent advances and trends in structural health monitoring. In: JAWAID, M., THARIQ, M., SABA, N. **Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**. 1st ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2019. cap. 4, p. 53-73.

AMAFABIA, D. M. et al. A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite Structures. **Structural Durability & Health Monitoring**, v. 11(2), p. 91-147, 2017.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **ABS: Rules for Survey After Construction – Part 7: Appendix 1: Section 4, Guide for Hull Thickness Measurement**. Houston, TX, 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 580: Risk-Based Inspection**. 2nd ed. Washington, D.C., 2009.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 581: Risk-Based Inspection Technology**. 2nd ed. Washington, D.C., 2008.

ATTARIAN, V. A., CEGLA, F. B., CAWLEY, P. Long-term stability of guided wave structural health monitoring using distributed adhesively bonded piezoelectric transducers. **Structural Health Monitoring**, v. 13(3), p. 265-280, Fev. 2014.

AULD, B. A. **Acoustic Fields and Waves in Solids Volume II**. Stanford: John Wiley & Sons Inc., 1973.

BARRETO, L. S. et al. Damage indices evaluation for one-dimensional guided wave-based structural health monitoring. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 18(2), e354, Fev. 2021.

BIASOTTO, P., ROUHAN, A. Survey and Inspection Management for FPSOs. **Proceedings of OMAE04 – 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, Vancouver: Jun, 2004.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 100067:1997**: Hot rolled bulb flats. Dimensions and tolerances on shape, dimension and mass. BSI Standards Publication, 1997.

BURGOS, D. A. T. et al. Damage Identification in Structural Health Monitoring: A Brief Review from its Implementation to the Use of Data-Driven Applications. *Sensors*, 20, 733, Jan. 2020.

CALDWELL, R. Hull Inspection Techniques and Strategy – Remote Inspection Developments. **SPE Offshore Europe Conference & Exhibition**. Aberdeen: Set, 2017.

CLARKE, T. **Guided Wave Health Monitoring of Complex Structures**. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Mechanical Engineering, Imperial College London. London, 2009.

CLARKE, T., SIMONETTI, F., CAWLEY, P. Guided wave health monitoring of complex structures by sparse array systems: Influence of temperature changes on performance. *Journal of Sound and Vibration*, v. 329, p. 2306-2322, Mar. 2009.

CROXFORD, A. J. et al. Efficient temperature compensation strategies for guided wave structural health monitoring. *Ultrasonics*, v. 50, p. 517-528, 2010.

CROXFORD, A. J. et al. Strategies for guided-wave structural health monitoring. **Proceedings of The Royal Society A**, v. 463, p. 2961-2981, Ago. 2007.

CROXFORD, A. J., WILCOX, P. D., DRINKWATER, B. W. Guided wave SHM with a distributed sensor network. **Proc. SPIE 6935, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008**, 69350E. San Diego, CA: Abr. 2008.

DILIGENT, O. et al. The low-frequency reflection and scattering of the S_0 Lamb mode from a circular through-thickness hole in a plate: Finite Element, analytical and experimental studies. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 112, n. 6, p. 2589-2601, Dez. 2002.

DISPERSE. **Guided wave dispersion curve calculation**. Disponível em:

< <http://www.disperse.software>>. Acesso em: 11 Nov. 2016.

DUGGAL, A., IZADPARAST, A., MINNEBO, J. Integrity, Monitoring, Inspection, and Maintenance of FPSO Turret Mooring Systems. **Offshore Technology Conference – OTC-27938-MS**. Houston: Mai, 2017.

EPPS, B. P., KRIVITZKY, E. M. Singular value decomposition of noisy data: noise filtering. **Experiments in Fluids**, v. 60, n. 126, Jul. 2019.

FARIAS, B. V. **Inferência Bayesiana de Dados de Inspeção de Estrutura de Casco de Navio Plataforma**. Dissertação de Mestrado – Programa de Engenharia Oceânica III. – COOPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

FARRAR, C. R., WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of The Royal Society A**, v. 365, p. 303-315, Dez. 2007.

FENG, Y. et al. The influence of viscous liquid to the propagation of torsional wave in pipes. **Journal of Vibroengineering**. v. 15, I. 3, Set. 2013.

FERROPERM PIEZOCERAMICS. **High Quality Components and Materials for the Electronic Industry**. Disponível em: <<http://www.ferroperm-piezo.com/>>. Acesso em: 16 set. 2016.

FLYNN, E. B. et al. Maximum-likelihood estimation of damage location in guided-wave structural health monitoring. **Proceedings of The Royal Society A**, v. 467, p. 2575-2596, Abr. 2011.

FROMME, P. Influence of guided ultrasonic wave scattering directionality on the detection sensitivity for SHM of fatigue cracks. **Proc. SPIE 7650, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2010**, 76501M. San Diego, CA: Abr. 2010.

GALVAGNI, A. **Pipeline Health Monitoring**. Thesis (Doctor of Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Imperial College London. London, 2013.

GIURGIUTIU, V., ZAGRAI, A. N. Characterization of Piezoelectric Wafer Active Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 11, Issue 12, p. 959-976, Dez. 2000.

GRAFF, K. F. **Wave Motion in Elastic Solids**. New York: Dover Publications Inc., 1991.

GUIDEDWAVE. **Plates and Shells**. Disponível em:

<<http://www.gwultrasonics.com/knowledge/plateshell/>>. Acesso em: 28 abr. 2017.

GUO, N., CAWLEY, P., HITCHINGS, D. The Finite Element Analysis of the Vibration Characteristics of Piezoelectric Discs. **Journal of Sound and Vibration**, v. 159(1), p. 115-138, 1992.

HALL, J. S., MICHAELS, J. E. Minimum Variance Ultrasonic Imaging to an *In Situ* Sparse Guided Wave Array. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 57, n. 10, p. 2311-2323, Out. 2010.

HARLEY, J. B., MOURA, J. M. F. Data-driven matched field processing for Lamb wave structural health monitoring. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 135(3), p. 1231-1244, Mar. 2014.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. **HSE RESEARCH REPORT 328**: Acoustic monitoring of the hulls of Floating Production Storage and Offloading facilities (FPSOs) for corrosion and damage. 1st ed. Cambridge, 2005.

HERDOVICS, B., CEGLA, F. Compensation of phase response changes in ultrasonic transducers caused by temperature variations. **Structural Health Monitoring**, v. 18(2), p. 508-523, Mar. 2018.

HWANG, J., ROH, M., LEE, K. Detailed design and construction of the hull of a floating, production, storage and off-loading (FPSO) unit. **Ships and Offshore Structures**, v. 5(2), p. 93-104, Jul. 2009.

HUANG, H. et al. Design and performance analysis of a tracked wall-climbing robot for ship inspection in shipbuilding. **Ocean Engineering**, v. 131, p. 224-230, Jan. 2017.

JORDAN, T. L., OUNAIES, Z. **Piezoelectric Ceramics Characterization**. Hampton: National Aeronautic and Space Administration, 2001. NASA/CR-2001-211225. ICASE Report No. 2001-28.

KHAN, M. F., KHAN, E., ABBASI, Z. A. Artifact Suppressed Image Enhancement through Bi Histogram Equalization. **Proc. IEEE IMPACT-2013**, p. 66-70. Aligarh, India: Nov. 2013.

KHOLMOVSKI, E. G., ALEXANDER, A. L., PARKER, D. L. Correction of Slab Boundary Artifact Using Histogram Matching. **Journal of Magnetic Resonance Imaging**, v. 15, p. 610-617, Abr. 2002.

KINO, G. S. **Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing**. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1987.

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

KRALOVEC, C., SCHAGERL, M. Review of Structural Health Monitoring Methods Regarding a Muti-Sensor Approach for Damage Assesment of Metal and Composite Structures. **Sensors**, 20, 826, Fev. 2020.

LAMB, H. On waves in an elastic plate. **Proceedings of The Royal Society A**, v. 93, Issue 648, Mar. 1917.

LEVINE, R. M., MICHAELS, J. E. Model-based imaging of damage with Lamb waves via sparse reconstruction. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 133(3), p. 1525-1534, Mar. 2013.

LIZÉ, E. **Détection d'endommagement sans état de référence et estimation de la température pour le contrôle santé intégré de structures composites par ondes guidées**. Thesis (Doctor of Philosophy) – Sciences des Métiers de l'ingénieur – École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2018.

LOWE, M. J. S. et al. The low frequency reflection characteristics of the fundamental antisymmetric Lamb wave a_0 from a rectangular notch in a plate. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 112, n. 6, p. 2612-2622, Dez. 2002.

LU, Y., MICHAELS, J. E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations. **Ultrasonics**, v. 43, p. 717-731, Jun. 2005.

MARIANI, S., HEINLEIN, S., CAWLEY, P. Compensation for temperature-dependent phase and velocity of guided wave signals in baseline subtraction for structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, v. 19(1), p. 26-47, Mar. 2019.

MATLAB DOCUMENTATION. **Matlab**. Disponível em:

<<https://www.mathworks.com/help/matlab/>>. Acesso em: 18 mai. 2020.

MAULDIN JR, F. W., LIN, D., HOSSACK, J. A. The Singular Value Filter: A General Filter Design Strategy for PCA-Based Signal Separation in Medical Ultrasound Imaging. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 30, n. 11, p. 1951-1964, Nov. 2011.

MAZZOTI, M. et al. Leakage of Guided Waves in Embedded Waveguides of Arbitrary Cross Section. **IWSHM 2013 - 9th International Workshop on Structural Health Monitoring**. Stanford, United States of America: Set. 2013.

MENIN, P. D., CLARKE, T. G. R. Development of an Omnidirectional Shear Horizontal Wave Transducer for Structural Health Monitoring. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 37:84, Out. 2018.

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**, v. 17, Mai. 2008.

MICHAELS, J. E. Sparse array imaging with guided waves under variable environmental conditions. In: YUAN, F. **Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures**. 1st ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2016. cap. 9, p. 255-284.

MITRA, M., GOPALAKRISHNAN, S. Guided wave based structural health monitoring: A review. **Smart Materials and Structures**, v. 25, 053001, Mar. 2016.

MOORE, P. O., et al. **Nondestructive Testing Handbook Volume 6: Acoustic Emission Testing**. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005.

PARK, S. et al. PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components. **Smart Materials and Structures**, v.15, p. 957-966, Jun. 2006.

PIPELINE OPERATORS FORUM. **Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines**. Version - 2009.

POGGI, L. et al. Recent developments in remote inspection of ship structures. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 12, p. 881-891, Nov. 2020.

QUAEGEBEUR, N. et al. Dispersion-based imaging for structural health monitoring using sparse and compact arrays. **Smart Materials and Structures**, v. 20, Jan. 2011.

RATASSEPP, M. et al. Scattering of the fundamental shear horizontal mode in a plate when incident at a through crack aligned in the propagation direction of the mode. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 124, n. 5, p. 2873-2882, Nov. 2008.

RAYLEIGH, L. On the Free Vibration of an Infinite Plate of Homogeneous Isotropic Elastic Matter. **Proceedings of the London Mathematical Society**, v. s1-20, Issue 1, p. 225-237, Nov. 1888.

REDDY, K. A., KUMAR, J. V. Motion Artifact Reduction in Photoplethysmographic Signals using Singular Value Decomposition. **IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC 2007**. Warsaw, Polônia: Mai. 2007.

RIBICHINI, R. et al. Study and Comparison of Different EMAT Configurations for SH Wave Inspection. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 58, n. 12, p. 2571-2581, Dez. 2011.

RIZZO, C. M. Inspection of aged ships and offshore structures. In: PAIK, J. K., MELCHERS, R. E. **Condition assessment of aged structures**. 1st ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2008. cap. 13, p. 367-406.

RIZZO, C. M. et al. Current practices and recent advances in condition assessment of aged ships. **Ships and Offshore Structures**, v.2(3), p.261-271, Nov. 2007.

RIZZO, P., DI SCALEA, F. L. Feature Extraction for Defect Detection in Strands by Guided Ultrasonic Waves. **Structural Health Monitoring**, v. 5(3), p. 297-308, Set. 2006.

ROBERTS, T. M., TALEBZADEH, M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. **Journal of Constructional Steel Research**, v 59, p. 695-712, Jul. 2002.

ROSE, J. L. Dispersion Curves in Guided Wave Testing. **ASNT Materials Evaluation**, v.61, p.20-22, Jan. 2003.

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

ROSENBLATT, M. Remarks on a Multivariate Transformation. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 23(3), p. 470-472, Set. 1952.

RYTTER, A. **Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures**. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Building Technology and Structural Engineering – University of Aalborg, Aalborg, 1993.

SCHANZE, T. Compression and Noise Reduction of Biomedical Signals by Singular Value Decomposition. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, Issue 2, p.361-366, 2018.

SEUNG, H. M., PARK, I., KIM, Y. Y. An omnidirectional shear-horizontal guided wave EMAT for a metallic plate. **Ultrasonics**, v. 69, p. 58-66, Jul. 2016.

SIMONETTI, F. Lamb wave propagation in elastic plates coated with viscoelastic materials. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 115 (5), p. 2041-2053, Mai. 2004.

STEWART, G. W. On the Early History of the Singular Value Decomposition. **SIAM Review**, v. 35, Issue 4, p. 551-566, Dez. 1993.

STONELEY, R. Elastic waves at the surface of separation of two solids. **Proceedings of The Royal Society A**, v. 106, Issue 738, Out. 1924.

SU, Z., YE, L. **Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications**. London: Springer, 2009.

SURACE, C. **Novel Approaches for Structural Health Monitoring**. Based: MDPI, 2021.

WANG, C. H., ROSE, J. T., CHANG, F. A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring. **Smart Materials and Structures**, v. 13, p. 415-423, Mar. 2004.

WANG, G., SARRATELLA, C., KALGHATGI, S. Current practices in condition assessment of aged ships and floating offshore structures. In: PAIK, J. K., MELCHERS, R. E. **Condition assessment of aged structures**. 1st ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2008. cap. 1, p. 3-35.

WEAVER, R. L., LOBKIS, O. I. Temperature dependence of diffuse field phase. **Ultrasonics**, v. 38, p. 491-494, 2000.

WILCOX, P. D. et al. A comparison of Temperature Compensation Method for Guided Wave Structural Health Monitoring. **AIP Conference Proceedings 975**, 1453, Mar. 2008.

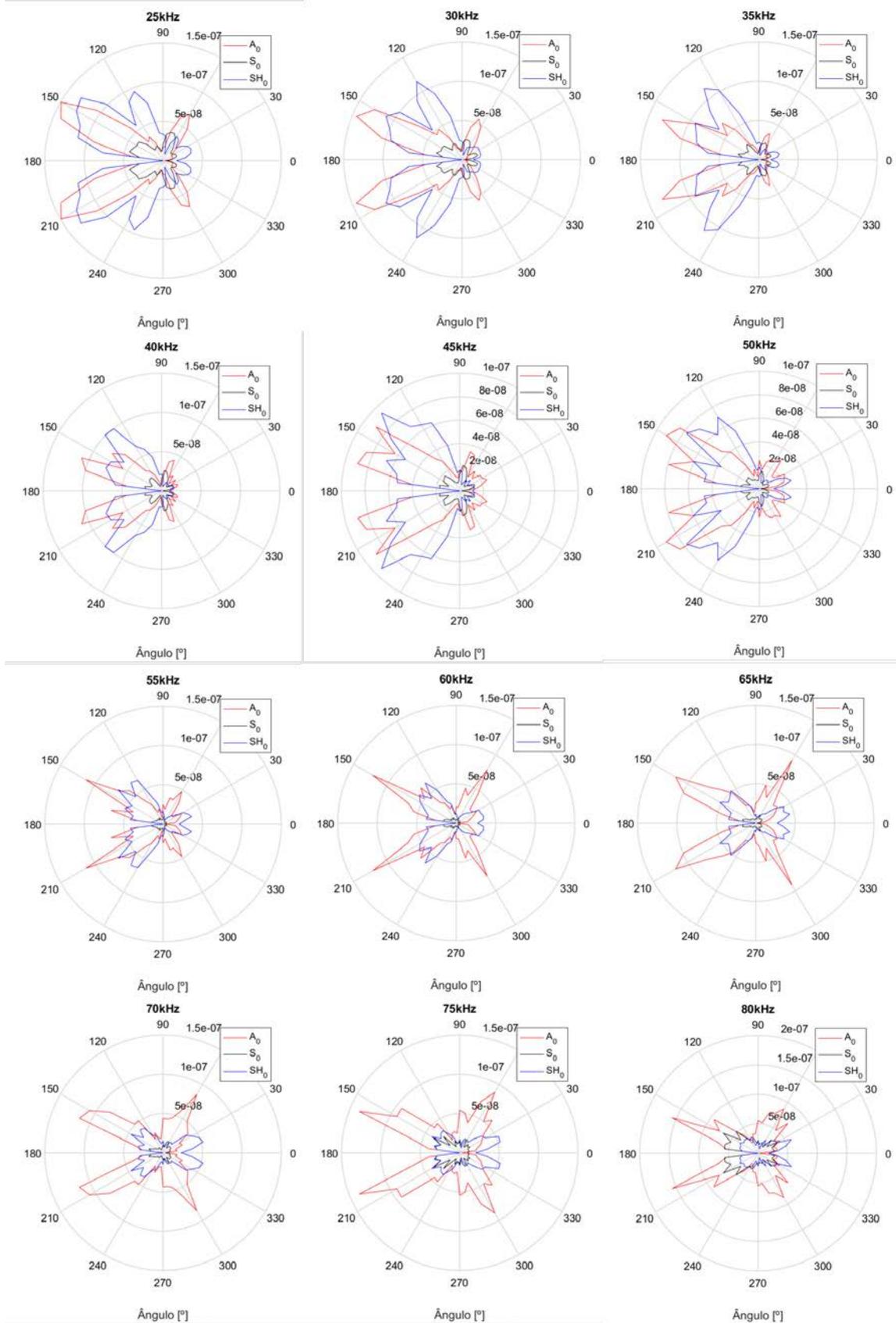
WILCOX, P. D., LOWE, M. J. S, CAWLEY, P. The Excitation and Detection of Lamb Waves with Planar Coil Electromagnetic Acoustic Transducers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 52, n. 12, p. 2370-2383, Dez. 2005.

WORDEN, K. et al. The fundamental axioms of structural health monitoring. **Proceedings of The Royal Society A**, v. 463, p. 1639-1664, Abr. 2007.

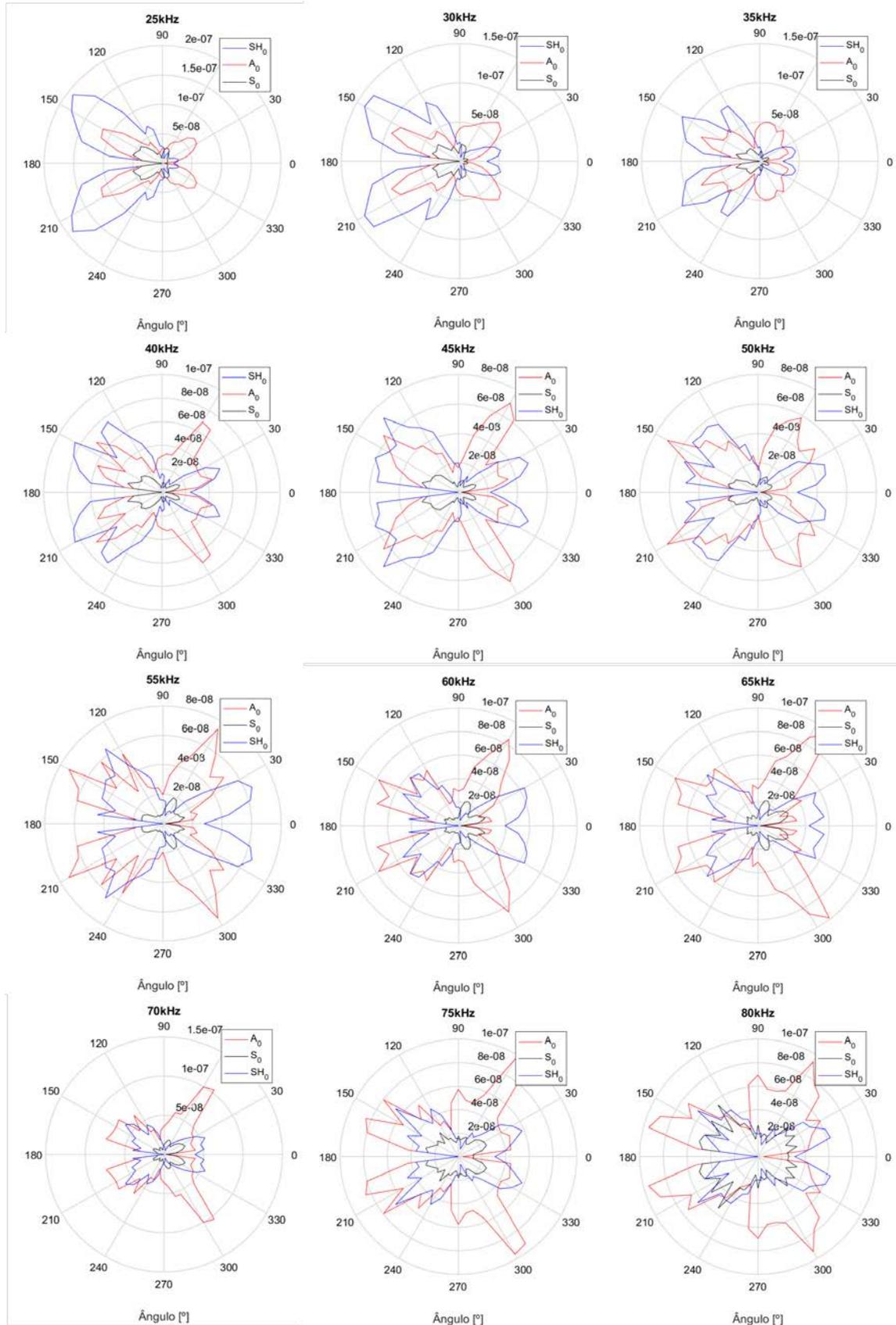
WORDEN, K., DULIEU-BARTON, J. M. An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. **Structural Health Monitoring**, v. 3(1), p. 0085-98, 2004.

ZHAO, X. et al. Active health monitoring of na aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring. **Smart Materials and Structures**, v. 16, p. 1208-1217, 2007.

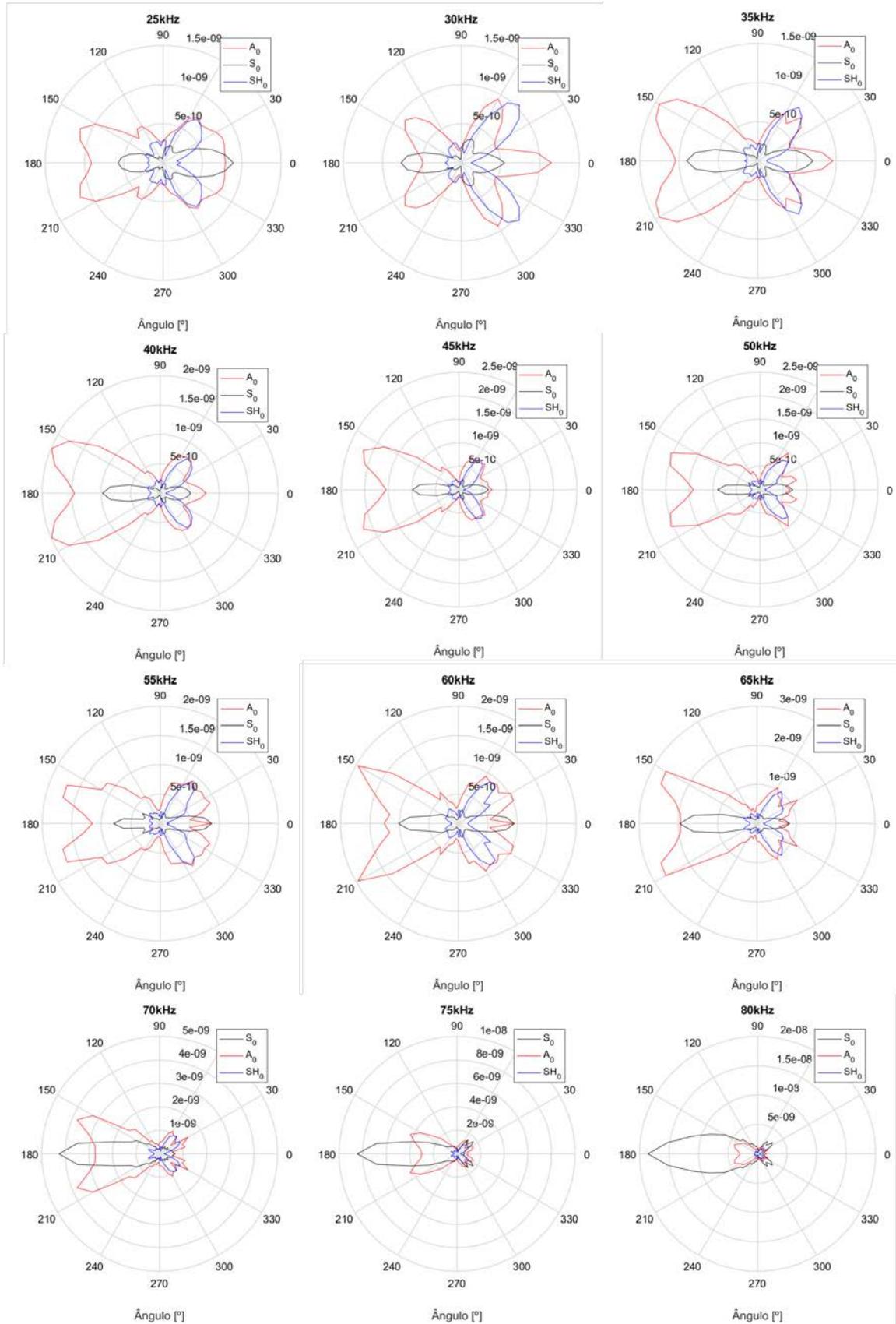
**APENDICE B – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO SH_0 PARA
INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 40% DE PERDA DE ESPESSURA**



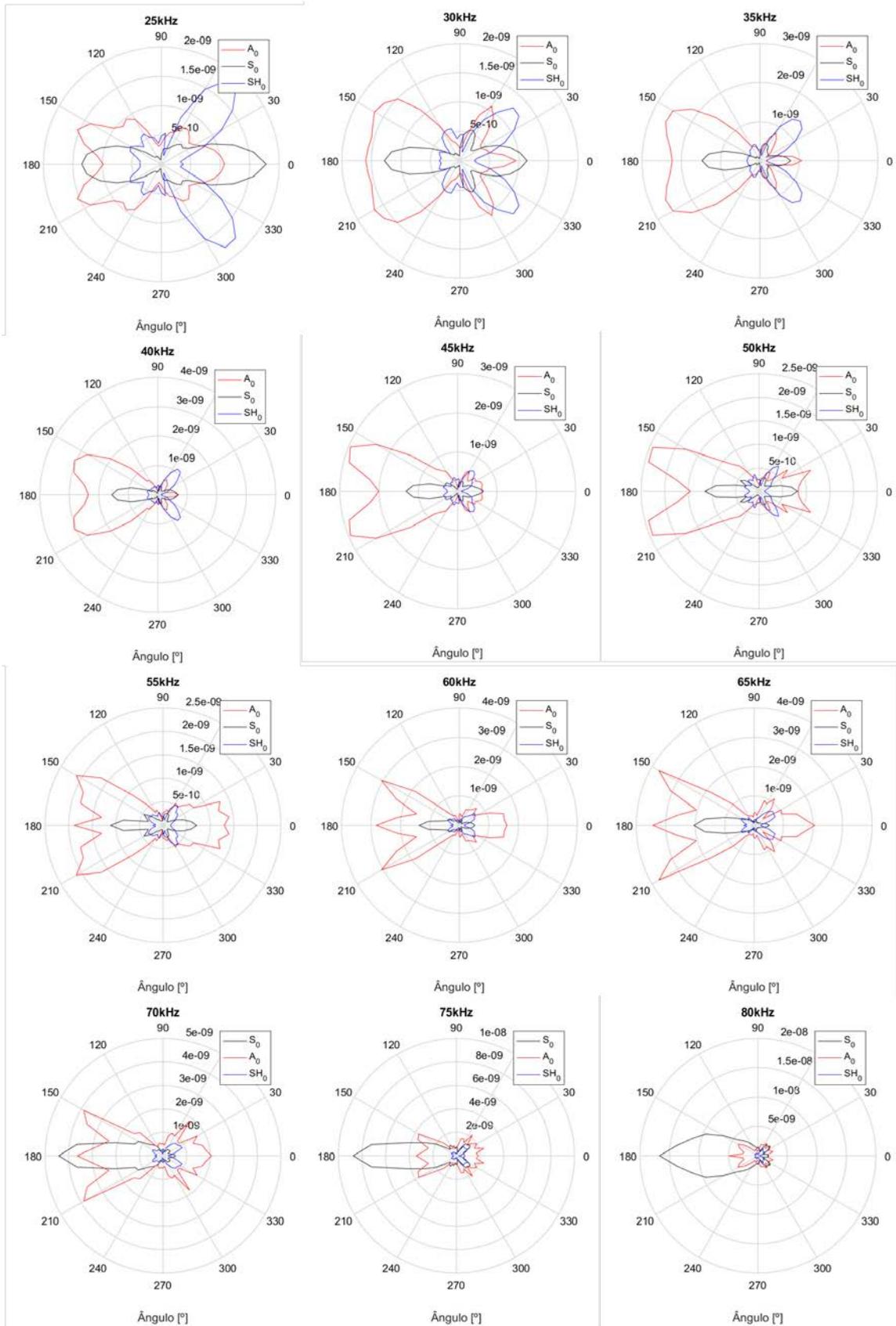
**APENDICE C – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO SH_0 PARA
INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 60% DE PERDA DE ESPESSURA**



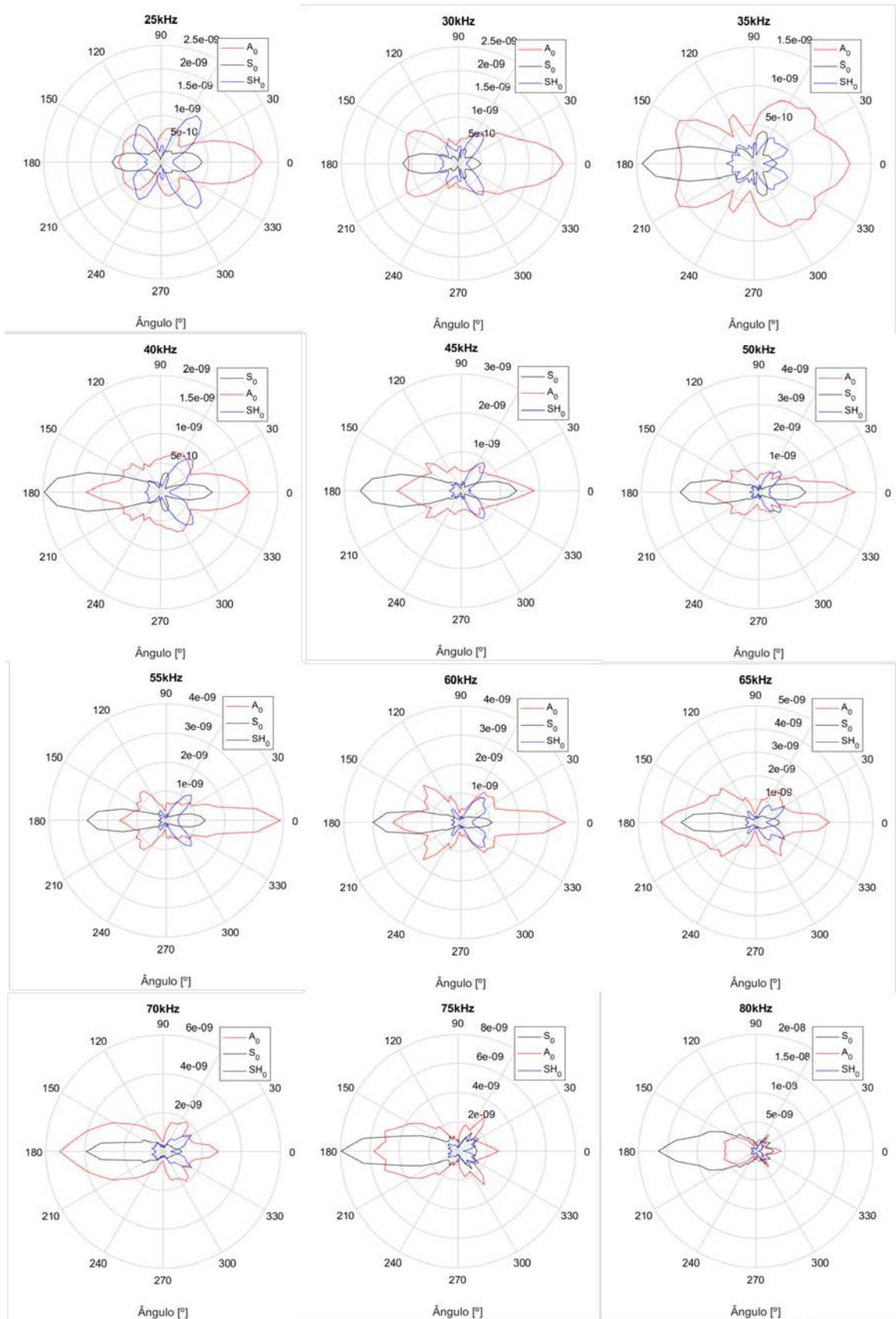
**APENDICE D – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO S_0 PARA
INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 20% DE PERDA DE ESPESSURA**



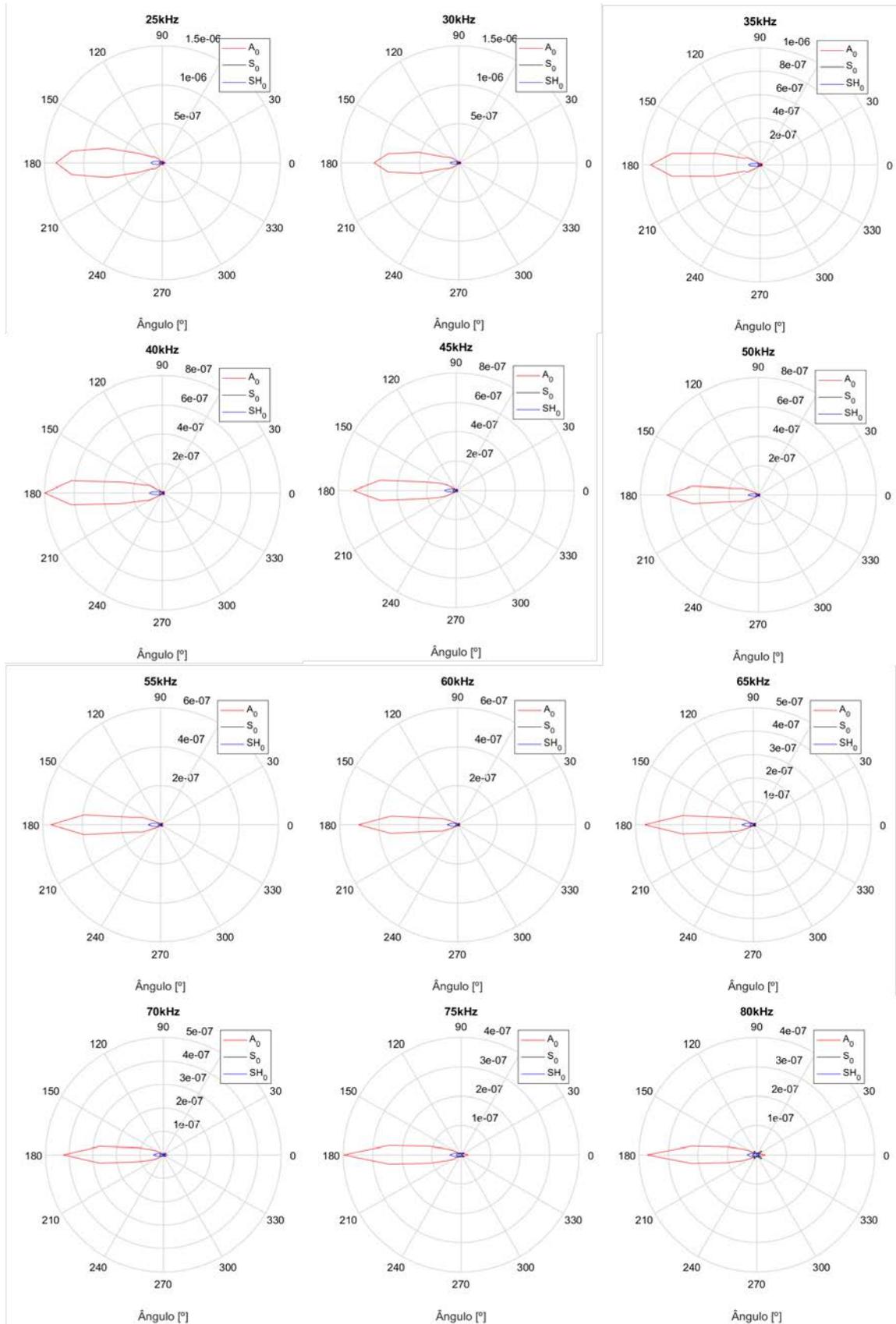
**APENDICE E – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO S_0 PARA
INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 40% DE PERDA DE ESPESSURA**



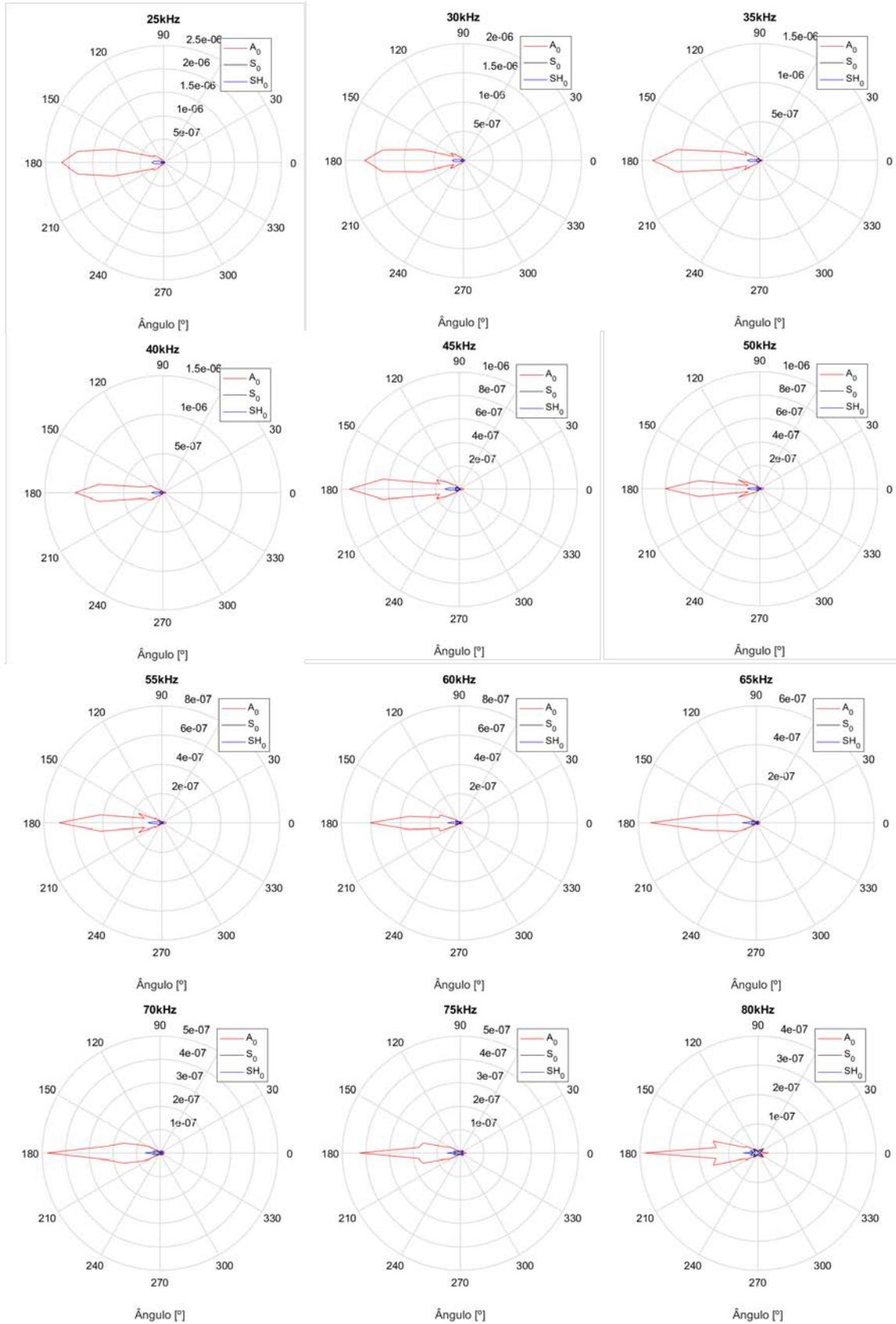
**APENDICE F – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO S_0 PARA
INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 60% DE PERDA DE ESPESSURA**



**APENDICE G – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO A_0 PARA
INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 20% DE PERDA DE ESPESSURA**



**APENDICE H – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO A_0 PARA
INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 40% DE PERDA DE ESPESSURA**



APENDICE I – PADRÃO DE ESPALHAMENTO SIMULADO DO MODO A_0 PARA INCIDÊNCIA EM DEFEITO COM 60% DE PERDA DE ESPESSURA

