

UTILIZAÇÃO DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS DE LAMB NA INSPEÇÃO DE
MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS FIBRA-METAL

Cláudia Teresa Teles Farias

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Prof. João Carlos Machado, Ph. D.

Prof. Julio Cezar Adamowski, D. Sc.

Prof. Fernando Reizzel Pereira, D.Sc.

Prof. Maurício Saldanha Motta, D. Sc.

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2006

FARIAS, CLÁUDIA TERESA TELES

Utilização das ondas ultra-sônicas de Lamb na inspeção de materiais compósitos laminados fibra-metal [Rio de Janeiro] 2006

XXXVI, 206p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2006)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Ensaio Não-Destrutivo
 2. Ultra-som
 3. Ondas de Lamb
 4. Compósitos Laminados Fibra-Metal
 5. Detecção de Danos
- I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A memória de meu pai

Nadyr Farias

***À minha família:
minha gratidão, meu amor.***

***Aos meus filhos Heitor e Beatriz:
minha esperança.***

Agradecimentos

À **Joaquim Eleutério Batista Neto** e a todos os amigos que estiveram torcendo por mim mesmo à distância.

Aos professores **João Marcos Alcoforado Rebello** e **João Carlos Machado**, pela orientação, apoio e disponibilidade no auxílio dos trabalhos e na resolução dos mais diversos problemas.

Aos grandes amigos **Ivan Costa de Silva** e **Antônio Lúcio** pelo auxílio na parte experimental do trabalho e pela constante disposição em ajudar, quaisquer que fossem as tarefas.

Aos **colegas do Laboend** pela solidariedade e companheirismo no convívio diário.

Aos professores, funcionários e alunos do **Laboratório de Ultra-Som (LUS)** do Programa de Engenharia Biomédica da COPPE/UFRJ pelo apoio na realização dos experimentos.

Ao professor **Fernando Luiz Bastian** e a equipe de pesquisa do Laboratório de Compósitos do PEMM pelas sugestões que foram fornecidas e utilizadas na confecção dos corpos de prova.

Ao corpo de funcionários da **Zamec Usinagem Ltda.** Pela ajuda, solidariedade e auxílio nos trabalhos e na resolução dos diversos problemas surgidos durante a confecção dos corpos de prova e no empenho em solucionar os problemas no sistema de varredura.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais: **Márcia, Robson, Laércio, Paulo Menezes, Cláudia Lauria, Bruno, Célia, Francisco e Elias**, pelo suporte e atenção.

À **Universidade Livre de Bruxelas (VUB)** bem como professores, corpo técnico e discente do Departamento de Mecânica de Materiais e Construções, em especial ao professor **Danny Van Hemelrijck** e aos amigos **Myriam Bourlau, Frans Boulpaep e Arwen Smits**, pela utilização de seus laboratórios para confecção dos corpos de prova e pelo apoio e amizade durante a minha estada em Bruxelas.

À **Universidade Católica de Leuven (KU-LEUVEN)** em atenção ao prof. **Christ Glorieux** e aos alunos **Nikolas** e **Jozefien Goossens** do Departamento de Acústica e Termo-física pela utilização do laboratório de laser e pelo apoio durante a minha estada em Leuven.

À **Universidade de Gent** em atenção aos profs. **Joris Degrieck** e **Nico Declercq** e a **Els** do Departamento de Mecânica e Construções pela utilização do laboratório óptico-acústico e apoio durante a minha estada em Gent.

Ao prof. **Arthur Braga**, professor do Departamento de Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo apoio .

À **Hexcel Composites** pela doação de material para a confecção dos corpos de prova.

Aos Engenheiros do IEN **Carlos Alfredo Lamy** e **Marcelo Bittencourt** pelo incentivo;

Ao **CNPq** e a **Capes** pelo apoio financeiro.

Ao **CEFET-BA** pela liberação para a realização do doutorado.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UTILIZAÇÃO DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS DE LAMB NA INSPEÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS FIBRA-METAL

Cláudia Teresa Teles Farias

Agosto / 2006

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello
João Carlos Machado

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Os compósitos laminados fibra-metal (LFM) são cada vez mais utilizados por apresentarem, em geral, propriedades mecânicas superiores às ligas do metal isoladamente e menor densidade. Estes materiais foram recentemente lançados no mercado, sendo utilizados principalmente na indústria aeronáutica. É de extrema importância que sejam avaliados métodos não-destrutivos eficazes na detecção de danos comuns aos LFM, para a segurança e a confiabilidade das estruturas que os utilizam. Nesta tese foi avaliado o uso das ondas ultra-sônicas de Lamb na inspeção de dois tipos de corpos de prova de LFM: alumínio e epóxi reforçado por fibras de vidro e alumínio e epóxi reforçado por fibras de carbono, ambos com espessura total de 1,34 mm. As curvas de dispersão dos corpos de prova foram simuladas para a determinação da frequência e do ângulo de incidência do feixe sônico, necessários à geração dos modos de propagação fundamentais das ondas de Lamb A_0 e S_0 . Foram implantados defeitos simulando fratura de fibras e delaminação. Além das técnicas de inspeção ultra-sônica na frequência de 0,6 a 1,0 MHz por imersão e por contato usando sapata de perspex, foram utilizadas as técnicas de fotografia Schlieren e a geração de ultra-som por laser. Os resultados experimentais obtidos na determinação das velocidades de fase e de grupo estão de acordo com os simulados. Foi possível detectar a fratura de fibras em todos os corpos de prova.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ULTRASONIC LAMB WAVES USED IN THE INSPECTION OF
FIBRE-METAL LAMINATES

Cláudia Teresa Teles Farias

August / 2006

Advisors: João Marcos Alcoforado Rebello
João Carlos Machado

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Fibre metal laminated composites (FML) have been more and more used because of their superior mechanical properties and lower density when compared with pure metal alloy. These materials were recently launched in the market and have been used mainly in the aeronautic industry. Therefore, it is extremely important the evaluation of nondestructive tests for detection of common damages in FML to guarantee the safe and reliable structures. In this thesis ultrasonic Lamb waves were applied for inspection of metal fibre laminate composite (FML) materials. Two kinds of FML were fabricated: Aluminum reinforced with glass fibre and epoxy; aluminum reinforced with carbon fibre and epoxy. Defects simulating cracking fibre and delamination were inserted in the FML. Simulation of dispersion curves for the FML were carried out to determine the frequency and incident angle of the ultrasonic beam, necessary to generate the main propagation modes of Lamb waves, A_0 , and S_0 . Immersion and contact ultrasonic techniques were used and the obtained results for phase and group velocity are in agreement with the simulated ones. Ultrasound generated by laser radiation and Schlieren photography were also used. It was possible to detect the fibre crack defect which demonstrates the potential use of Lamb waves in this kind of materials.

SUMÁRIO

	Pág.
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Compósitos laminados fibra-metal.....	5
2.2 Danos presentes nos LFM.....	8
2.3 Utilização das ondas de Lamb em ensaios não-destrutivos.....	9
2.3.1 Histórico.....	9
2.3.2 Modos de propagação das ondas de Lamb.....	10
2.3.3 Aplicações das Ondas de Lamb na detecção de defeitos.....	16
2.3.3.1 Aplicações das ondas de Lamb em compósitos laminados fibra-metal..	31
2.3.4 Geração de ondas de Lamb a partir do Laser.....	38
2.3.4.1 Geração de ondas de Lamb com transdutores piezo-elétricos	44
2.4 Ondas <i>Leaky</i> Lamb.....	47
2.4.1 Aplicações das ondas <i>Leaky</i> Lamb em materiais compósitos.....	48
2.4.2 Fotografia <i>Schlieren</i>	50
2.4.2.1 Aplicações da fotografia <i>Schlieren</i>	51
2.5 Considerações finais.....	54
CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	55
3.1 Ondas ultra-sônicas em meios elásticos.....	55
3.2 Propriedades da onda acústica.....	57
3.2.1 Velocidade de Fase, (v_f).....	57
3.2.2 Velocidade de Grupo, (v_g).....	61
3.2.3 DISPERSÃO.....	64
3.3 Propagação da onda acústica em meio elástico isotrópico.....	65
3.4 Propagação da onda em estruturas em forma de placas.....	70
3.5 Ondas Ultra-sônicas de Lamb.....	73
3.5.1 Características das ondas de Lamb.....	76
3.5.1.1 Números de onda e frequência crítica.....	76
3.5.1.2 Velocidades de fase e de grupo das ondas de Lamb.....	77
3.5.1.3 Inspeções utilizando ondas de Lamb.....	78
3.6 Geração de ultra-som em placas a partir do Laser.....	80
3.7 Transformada de Fourier bi-dimensional.....	82

	CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
4.1	Confeção dos corpos de prova.....	84
4.1.1	Laminados de alumínio e epóxi reforçado por fibras de vidro.....	86
4.1.2	Laminados de alumínio e epóxi reforçado por fibras de carbono.....	88
4.1.3	Chapas de alumínio.....	90
4.2	Técnicas aplicadas à pesquisa.....	91
4.2.1	Simulação das curvas de dispersão para os modos de propagação.....	92
4.2.1.1	Entrada de dados relativos às propriedades dimensões físicas	92
4.2.1.2	Determinação do ângulo de incidência do feixe sônico	95
4.2.1.2.1	Ensaio de imersão	96
4.2.1.2.2	Ensaio por contato com sapata de perspex	100
4.2.2	Inspeção ultra-sônica utilizando transdutores de contato e de imersão .	103
4.2.2.1	Inspeção por imersão.....	104
4.2.2.2	Inspeção por contato com sapata de perspex.....	105
4.2.2.2.1	Configuração transmissão-recepção.....	106
4.2.2.2.2	Configuração transmissão-reflexão.....	107
4.2.2.3	Processamento dos sinais obtidos nas inspeções ultra-sônicas.....	109
4.2.3	Geração de modos de propagação das ondas de Lamb a partir do.....	109
4.2.3.1	Processamento dos sinais obtidos.....	110
4.2.4	Fotografias <i>Schlieren</i>	111
	CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	113
5.1	Simulação das curvas de dispersão dos modos	114
5.1.1	Ensaio por imersão.....	114
5.1.2	Ensaio por contato.....	118
5.1.3	Ensaio por não-contato.....	121
5.2	Ensaio ultra-sônicos de imersão e contato.....	124
5.2.1	Ensaio de imersão na configuração transmissão.....	124
5.2.1.1	Atraso e amplitude do pulso transmitido.....	132
5.2.2	Ensaio de contato com sapata de perspex.....	144
5.2.2.1	Ensaio de contato na configuração transmissão.....	150
5.2.2.1.1	Atraso e amplitude do pulso transmitido.....	151
5.2.2.2	Ensaio de contato na configuração transmissão.....	153
5.3	Curvas de dispersão experimentais obtidas.....	163
5.4	Feixe ultra-sônico visualizado por fotografia <i>Schlieren</i>.....	173

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES.....	179
CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	181
CAPÍTULO 8: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182
APÊNDICE A.....	191
ANEXO A.....	201

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1- Ilustração do empilhamento de um LFM 3/2 com três camadas de alumínio e duas camadas intermediárias de prepreg com fibras nas direções de 0° e 90° .	1
Figura 2.1 – Ilustração do efeito <i>Crack Bridging</i> decorrente da presença de fibras sob a trinca de fadiga gerada em compósito laminado reforçado por fibras.	6
Figura 2.2 – Vista do corte lateral de um LFM 3/2 com a presença de delaminação na lâmina metálica superficial e trincas internas nas camadas de fibras.	8
Figura 2.3 – Três sinais diferentes (1, 2 e 3) são detectados pelo receptor baixa freqüência de excitação.	12
Figura 2.4 - Quatro sinais diferentes recebidos em quatro instantes diferentes para um mesmo corpo de prova imerso em água.	12
Figura 2.5 – (a) Excitação por contato direto; (b) configuração para geração das ondas de Lamb com transdutores imersos em água.	13
Figura 2.6 – Transdutor acoplado a sapata com ângulo de incidência variável.	14
Figura 2.7 - Ensaios com excitação de um pulso de banda larga em configuração transmissão-recepção em chapa de aço: (a) sinal de saída do transdutor-transmissor posicionado a 40mm da região da borda da placa; (b) resposta contendo a reflexão da borda a 60 mm do transdutor-transmissor; (c) amplitude do espectro para o sinal mostrado em (b); (d) resultado da transformada inversa de Fourier do sinal mostrado em (c), após filtragem para remover componentes de freqüência acima de 3 MHz.	15
Figura 2.8 – Curvas de dispersão para o aço. A caixa retangular mostra a região não-dispersiva para excitação do modo de propagação S_0 .	16

- Figura 2.9** – Sinais obtidos para chapa de alumínio contendo furo com diâmetro de 50 mm: (a) por simulação via FEM considerando sinal gerado a 350 mm do defeito; (b) experimentalmente utilizando EMAT a 425 mm da borda do furo. **17**
- Figura 2.10** – Curva de dispersão para um compósito laminado unidirecional de fibra de carbono/epóxi com 30 camadas de prepreg. **18**
- Figura 2.11**– Diagrama esquemático para a montagem experimental na configuração transmissão-recepção. **19**
- Figura 2.12** – Esquema experimental para medições da velocidade do modo de propagação S_0 . **20**
- Figura 2.13** – Resultados experimentais e simulados para laminados compósitos *cross-ply* de fibra de vidro (GFRP) e fibra de carbono (CFRP) em função da razão de delaminação. (a) Rigidez normalizada. (b) Velocidade do modo de propagação S_0 normalizada. **21**
- Figura 2.14** – Ilustração para modelo de propagação da onda de Lamb em região delaminada em placa de compósito laminado *cross-ply*. **22**
- Figura 2.15** - Diagrama do esquema experimental utilizado para a geração e detecção da delaminação por ondas de Lamb. **23**
- Figura 2.16** - Representação esquemática das varreduras em linha. A primeira varredura mede o tempo de chegada do modo de propagação S_0 transmitido ao longo da direção 0° para detectar e avaliar o tamanho da delaminação, e a segunda varredura para medir a amplitude máxima do primeiro pacote da onda a fim encontrar a borda da delaminação. **24**
- Figura 2.17** – A-scan do sinal da onda detectada pelo receptor a 210 mm a partir do transmissor: (a) no corpo de prova sem defeito; (b) na posição $Y = 100,5$ mm no corpo de prova com defeito. **25**

Figura 2.18 – Esquema experimental com as configurações transmissão-recepção utilizadas nas medições das ondas de Lamb: (a) transmissão do modo de propagação S_0 ; (b) conversão do modo de propagação S_0 ; (c) reflexão do modo de propagação S_0 . **E** é a borda esquerda da placa e **D** a borda direita. **26**

Figura 2.19 – Curva de dispersão para compósito laminado de fibra de carbono/epóxi *cross-ply* $[(0,90)_2]_S$ com os ângulos de incidência indicados a direita da figura. **27**

Figura 2.20 – A-scans obtidos por medições do modo de propagação S_0 transmitido em corpos de prova de compósito laminado *cross-ply* de fibra de carbono utilizando a configuração de ensaio transmissão-recepção com sapata angular: (a) corpo de prova sem defeito; (b) corpo de prova com delaminação de 20 mm de comprimento. **28**

Figura 2.21 – A-scans mostrando a conversão do modo de propagação S_0 em modo de propagação A_0 utilizando o esquema experimental da figura 2.18(b) nos laminados *cross ply* de fibra de carbono: (a) corpo de prova sem defeito; (b) corpo de prova com delaminação de 20 mm de comprimento. **29**

Figura 2.22 – A-scan das medições dos modos de propagação S_0 refletidos utilizando o esquema experimental ilustrado na figura 2.18(c) para varreduras em corpos de prova de laminado *cross-ply* de fibra de carbono: (a) corpo de prova sem defeito; (b) corpo de prova com delaminação de 20 mm de comprimento. **30**

Figura 2.23 - Configuração do compósito GLARE[®] 3/2. **32**

Figura 2.24 – Esquema experimental para a determinação do ângulo ótimo de excitação da onda de Lamb, θ_i é o ângulo de incidência da onda. **33**

Figura 2.25 – Dependência angular da amplitude do sinal transmitido através do laminado. θ_1 e θ_2 são os ângulos ótimos para geração do modo de propagação A_0 . **34**

Figura 2.26 – Esquema experimental para medidas do tempo de percurso da onda de Lamb. **34**

Figura 2.27 – Curva de dispersão por ensaio de contato, calculadas pelo software Disperse [®] : (a) para corpo de prova de GLARE [®] com fração volumétrica das fibras de vidro igual a 0.11; (b) para placa de alumínio com 1,5 mm de espessura.	36
Figura 2.28 – Resultados experimentais mostrando o aumento na velocidade de grupo do modo de propagação S0 com o aumento da área delaminada.	37
Figura 2.29 – Posicionamento dos transdutores em relação à profundidade da delaminação.	38
Figura 2.30 – Ondas de Lamb geradas por laser pulsado (regime termoelástico) e detectado por interferômetro a 24 mm da fonte de laser em chapas de alumínio de diferentes espessuras; (a) chapa de alumínio com 425 µm; (b) chapa de alumínio com 80 µm.	39
Figura 2.31 – Comparação de curvas de dispersão obtidas via FFT-2D para chapa de alumínio de espessura 3,2 mm: (a) experimental; (b) simulação.	40
Figura 2.32 – Esquema experimental para geração e detecção de ondas de Lamb utilizando laser.	41
Figura 2.33 – Curva de dispersão teórica e experimental, número de onda em função da frequência, para chapa de alumínio de 1,5 mm .	42
Figura 2.34 – Curva de dispersão – velocidade de fase em função da frequência, teórica e experimental das ondas de Lamb para o alumínio.	42
Figura 2.35 - Curvas de dispersão teóricas e experimentais, número de onda em função da frequência, para compósito de fibra de carbono.	43
Figura 2.36 - Curva de dispersão – velocidade de fase em função da frequência, teórica e experimental das ondas de Lamb para compósito laminado de fibra de carbono.	44

Figura 2.37 – Esquema experimental para a geração das ondas de Lamb utilizando transdutor-transmissor piezo-cerâmico com sapata angular e detecção por vibrômetro a laser.	44
Figura 2.38 – Deslocamentos normais à placa: sinais, $s(x_1, t)$, obtidos em função do tempo e espaço com reflexão na borda da chapa.	45
Figura 2.39 – Ondas incidentes: (a) no domínio frequência e número de onda; (b) no domínio do tempo e espaço.	46
Figura 2.40 – Ondas refletidas: (a) no domínio frequência e número de onda; (b) no domínio do tempo e espaço.	46
Figura 2.41 – Sinal janelamento espaço-temporal $s'(x_1, t)$.	47
Figura 2.42 - Onda guiada de Lamb propagando através de uma placa de aço, criando uma onda <i>leaky</i> no meio fluido em um ângulo característico θ_{leaky} .	47
Figura 2.43 - Esquema de posicionamento dos defeitos implantados no corpo de prova do material compósito inspecionado por varredura ultra-sônica no trabalho de CHIMENTI <i>et al.</i>	48
Figura 2.44 – C-scan com visualização de defeitos na placa de compósito laminado de fibra de carbono/ epóxi $[0^0]_{32}$ com defeitos visualizados. Defeitos em profundidades maiores aparecem em escala de cinza mais escuro.	49
Figura 2.45 – Imagem C-scan convencional mostrando a porosidade e os cortes nas camadas do material compósito para simular a variação de espessura.	49
Figura 2.46 - Esquema experimental para obtenção de fotografias Schlieren.	50
Figura 2.47 – Ilustração do efeito Schoch: Campo nulo devido à interferência destrutiva entre as reflexões geométrica e não-especular.	51

Figura 2.48 - Fotografias Schlieren: Visualização de um feixe ultra-sônico de 1 cm de diâmetro, frequência 3 MHz, com ângulo de incidência 19° incidindo sobre chapa de alumínio de 1,45 mm de espessura imersa em água – modo de propagação gerado A1. (a) feixe incidente a 0,20 cm da borda; (b) feixe incidente a -0,10 cm da borda; (c) feixe incidente a -0,30 cm da borda. 52

Figura 2.49– Fotografias Schlieren: feixe ultra-sônico de 2,5 cm de largura e 10 MHz incidente sobre a superfície do corpo de prova. (a) a partir do feixe refletido foi extraída área denotada pelo retângulo branco para o estudo; (b) padrão de feixe refletido sobre chapa de alumínio. Franjas não são visíveis; (c) padrão de feixe refletido para um compósito de fibra de carbono/epoxi unidirecional; (d) padrão de feixe refletido para um compósito de fibra de vidro/epóxi unidirecional. 53

Figura 3.1 – Propagação da onda: (a) volumétrica; (b) guiada. 57

Figura 3.2– Representação gráfica de $p = p_0 \cos(\omega t + kx)$ em três instantes no tempo: $t = 0$, $t = \frac{T}{4}$ e $t = \frac{T}{2}$. Um ponto F, ponto de fase constante, move-se para a esquerda com a progressão do tempo. 59

Figura 3.3 - Representação gráfica de $p = p_1 \cos(\omega t - kx)$ em três instantes no tempo: $t = 0$, $t = \frac{T}{4}$ e $t = \frac{T}{2}$. Um ponto F, ponto de fase constante, move-se para a direita com a progressão do tempo. 60

Figura 3.4 – O ponto F em fase constante na onda move-se na velocidade de fase v_f , enquanto o ponto G no envelope da onda move-se com a velocidade de grupo v_g . Na ilustração a velocidade de grupo é a metade da velocidade de fase. 63

Figura 3.5 - Ilustração de uma estrutura em forma de placa com espessura d , mostrando a orientação dos eixos, a direção de propagação da onda plana e as frentes de onda. 67

Figura 3.6 - Esquema mostrando a direção de propagação das ondas de Lamb. 73

- Figura 3.7** – (a) Ondas de Lamb propagando em uma placa de espessura d ; (b) modos simétricos; (c) modos assimétricos. **74**
- Figura 3.8** – Curva de dispersão para uma lâmina de Alumínio com 0.5 mm de espessura imersa em água. Os modos de propagação assimétricos estão legendados por A. Os modos de propagação simétricos estão legendados por S. **79**
- Figura 3.9** – Principais formas de geração de ultra-som por lase: (a) Regime termo-elástico; (b) Regime abrasivo. **81**
- Figura 3.10** – Exemplo de aplicação da FFT-2D nos sinais capturados por varredura de um corpo de prova pela técnica que utiliza o laser na geração dos modos propagação das ondas de Lamb. As ondas incidentes (i) e refletidas (r) são visualizadas separadamente. **83**
- Figura 4.1** – CP1 e CP3 contendo duas camadas de prepreg com fibras paralelas à direção de laminação do alumínio. **84**
- Figura 4.2** – CP4 contendo duas camadas de prepreg com fibras perpendiculares à direção de laminação do alumínio. **85**
- Figura 4.3** – Dimensões e posicionamento dos defeitos nos corpos de prova LFM de fibra de vidro: (a) fratura de fibra; (b) delaminação. **87**
- Figura 4.4** – Sistema de empilhamento e prensagem mecânica dos corpos de prova CP1: (a) vista superior; (b) vista inferior. **88**
- Figura 4.5** - Dimensões e posicionamento dos defeitos nos corpos de prova LFM de fibra de carbono: (a) fratura de fibra; (b) delaminação. **89**
- Figura 4.6** – Ciclo de cura para prepreg de fibra de carbono Fibredux® 920CX-TS-5-42. São mostrados os valores dos parâmetros temperatura, pressão e vácuo em função do tempo para a cura total do prepreg. **90**

Figura 4.7 – Chapas de alumínio com espessura de 0,5 mm e furo em forma de quadrado simulando o defeito.	90
Figura 4.8 – Diagrama esquemático das técnicas empregadas nos corpos de prova.	91
Figura 4.9 - Janela do programa de simulação mostrando a entrada de dados para a chapa de alumínio (adaptada da janela original, em inglês).	93
Figura 4.10 - Sistema de orientação adotado para a propagação da onda de Lamb.	93
Figura 4.11 – (a) Eixos de coordenadas cartesianas para placa de prepreg transversalmente isotrópica em relação ao eixo x. (b) Rebatimento espacial da placa de prepreg nos corpos de prova CP3 em relação a direção de propagação das ondas de Lamb. (c) Rebatimento espacial da placa de prepreg nos corpos de prova CP4.	94
Figura 4.12 - Janela do programa de simulação (adaptada da janela original, em inglês), mostrando a entrada de dados para a placa de prepreg presente no corpo de prova CP3.	95
Figura 4.13 - Janela do programa de simulação (adaptada da janela original, em inglês), mostrando a entrada de dados para a placa de prepreg presente no corpo de prova CP4.	95
Figura 4.14 - Curva de dispersão simulada para o alumínio com espessura de 0,5 mm em ensaio de imersão: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação A_0, \dots, A_3 e S_0, \dots, S_4 .	96
Figura 4.15 – Curva de dispersão simulada para o alumínio com espessura de 0,5 mm em ensaio de imersão: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 .	97

- Figura 4.16** - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação A_0 , S_0 , H_1, \dots, H_6 . **98**
- Figura 4.17** – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 , H_1 e H_2 . **98**
- Figura 4.18** - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação A_0 , S_0 , H_1, \dots, H_7 . **99**
- Figura 4.19** – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em imersão: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 . **99**
- Figura 4.20** - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato com sapata de perspex: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação A_0 , S_0 , H_1, \dots, H_8 . **101**
- Figura 4.21** – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm por contato com sapata de perspex: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0, H_1 e H_2 . **101**
- Figura 4.22** - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato com sapata de perspex: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação A_0 , S_0, H_1, \dots, H_8 . **102**
- Figura 4.23** – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm por contato com sapata de perspex: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 . **102**

Figura 4.24 – Espectro de frequências obtido via FFT do sinal capturado, utilizando transdutores de imersão de 1 MHz por incidência normal em configuração transmissão-recepção.	104
Figura 4.25 – Esquema experimental utilizado nos ensaios ultra-sônicos por imersão.	105
Figura 4.26 – Esquema de varredura pelos transdutores no corpo de prova na configuração transmissão-recepção no corpo de prova em forma de chapa.	105
Figura 4.27 – Espectro de frequências obtido via FFT do sinal capturado utilizando transdutores de contato de 1 MHz em sapata de perspex por incidência normal em configuração transmissão-recepção.	106
Figura 4.28 – Esquema experimental utilizado no ensaio por contato na configuração transmissão-recepção.	106
Figura 4.29 – Esquema experimental para o ensaio por contato na configuração transmissão-reflexão.	107
Figura 4.30 - Esquema de varredura pelos transdutores no corpo de prova na configuração transmissão-reflexão.	107
Figura 4.31 – Esquema experimental da técnica “ <i>probe scanning line</i> ”.	109
Figura 4.32 – Posicionamento da fonte de laser e detector na técnica “ <i>probe scanning line</i> ”. O detector mede os deslocamentos superficiais ao corpo de prova das ondas incidentes (i) e refletidas (r).	110
Figura 4.33 – Feixe de laser perpendicular a direção z.	111
Figura 4.34 – Direção dos feixes ultra-sônico e de laser com o posicionamento dos parafusos para marcação dos defeitos nos corpos de prova CP1_F: (b) feixe ultra-sônico paralelo à direção das fibras.	112

- Figura 4.34** – Direção dos feixes ultra-sônico e de laser com o posicionamento dos parafusos para marcação dos defeitos nos corpos de prova CP1_D: feixe ultra-sônico paralelo à direção das fibras. 112
- Figura 5.1** – Curva de dispersão simulada para o alumínio com espessura de 0,5 mm em ensaio de imersão: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 . 115
- Figura 5.2** – Curva de dispersão simulada para o alumínio com espessura de 0,5 mm em ensaio de imersão: Velocidades de grupo na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 . 115
- Figura 5.3** - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 . 116
- Figura 5.4** – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidades de grupo na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 . 116
- Figura 5.5** - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 . 117
- Figura 5.6** - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidades de grupo na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 . 117
- Figura 5.7** - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato em sapata de perspex: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 e H_2 . 119

Figura 5.8 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato em sapata de perspex: Velocidades de grupo na faixa de freqüência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 , H_1 e H_2 . 119

Figura 5.9 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato em sapata de perspex: Velocidades de fase na faixa de freqüência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 . 120

Figura 5.10 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato em sapata de perspex: Velocidades de grupo na faixa de freqüência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 , H_1 . 120

Figura 5.11 - Curva de dispersão para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm por não-contato: freqüência x número de onda. 122

Figura 5.12 - Curva de dispersão para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm por não-contato: freqüência x número de onda. 123

Figura 5.13 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura da chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura num total de 80 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra o defeito. 125

Figura 5.14 - Velocidade de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura da chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura num total de 80 pontos com passo de 2 mm em ensaio de imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra o defeito. 126

Figura 5.15 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. 127

Figura 5.16 - Velocidade de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra o defeito. **128**

Figura 5.17 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **128**

Figura 5.18 - Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **129**

Figura 5.19 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **130**

Figura 5.20 - Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **131**

Figura 5.21 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. **131**

Figura 5.22 - Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação **132**

Figura 5.23 – Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 da chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura num total de 80 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra o furo. 135

Figura 5.24 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura da chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura num total de 80 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As setas verticais delimitam a região onde se encontra o furo. 135

Figura 5.25 – Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. 136

Figura 5.26 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP3_F em ensaio por imersão num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. 136

Figura 5.27 – A-scan dos sinais obtidos por incidência normal em imersão por transmissão-recepção no corpo de prova CP3_F nas regiões: (a) sem defeito; (b) sob a fratura de fibras. 137

Figura 5.28 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. 138

Figura 5.29 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP3_D em ensaio por imersão num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. 138

Figura 5.30 – A-scan dos sinais obtidos por incidência normal em imersão por transmissão-recepção no corpo de prova CP3_D nas regiões: (a) sem defeito; (b) sob a delaminação. **139**

Figura 5.31 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **140**

Figura 5.32 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP4_F em ensaio por imersão num total de 50 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **140**

Figura 5.33 – A-scan dos sinais obtidos por incidência normal em imersão por transmissão-recepção no corpo de prova CP4_F nas regiões: (a) sem defeito; (b) sob a fratura de fibras. **141**

Figura 5.34 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. **142**

Figura 5.35 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP4_D em ensaio por imersão num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. **142**

Figura 5.36 – A-scan dos sinais obtidos por incidência normal em imersão por transmissão-recepção no corpo de prova CP4_D nas regiões: (a) sem defeito; (b) sob a delaminação. **143**

Figura 5.37 – Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **145**

Figura 5.38 – Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **145**

Figura 5.39 – Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. **146**

Figura 5.40 – Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. **146**

Figura 5.41 – Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. **148**

Figura 5.42 – Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras **148**

Figura 5.43 – Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. **149**

Figura 5.44 – Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. 149

Figura 5.45 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. 152

Figura 5.46 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP3_F em ensaio por contato com sapata de perspex num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. 152

Figura 5.47 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.a delaminação. 153

Figura 5.48 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida na varredura do corpo de prova CP3_D em ensaio por contato com sapata de perspex num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. 153

Figura 5.49 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. 154

Figura 5.50 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida na varredura do corpo de prova CP4_F em ensaio por contato com sapata de perspex num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras. 154

Figura 5.51 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. 155

Figura 5.52 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida na varredura do corpo de prova CP4_D em ensaio por contato com sapata de perspex num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação. 155

Figura 5.53 – A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP3_F obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova. S_0RD é o eco referente a reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 no defeito. 158

Figura 5.54 – A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP3_D obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova 159

Figura 5.55 – A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP4_F obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova. S_0RD é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 no defeito.

160

Figura 5.56 – A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 propagando paralelamente a direção das fibras, no corpo de prova CP4_F obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova. S_0RD é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 no defeito.

161

Figura 5.57– A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP4_D obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova.

162

Figura 5.58 – As ilustrações (a), (b) e (c) representam o B-scan dos corpos de prova CP3_SD, CP3_F e CP3_D, respectivamente, obtidos por varredura pelo vibrômetro a laser num passo de 0,1 mm em média de 200 posições em direção a fonte de laser. **I** representa as ondas de Lamb incidentes e **R** a região de interferência entre as ondas refletidas. A onda sônica que propaga no ar próxima a superfície dos corpos de prova também é capturada pelo detector.

164

Figura 5.59 – As ilustrações (a), (b) e (c) representam o B-scan dos corpos de prova CP4_SD, CP4_F e CP4_D, respectivamente, obtidos por varredura pelo vibrômetro a laser num passo de 0,1 mm em média de 200 posições em direção a fonte de laser. **I** representa as ondas de Lamb incidentes e **R** a região de interferência entre as ondas refletidas. A onda sônica que propaga no ar próxima a superfície dos corpos de prova também é capturada pelo detector. **165**

Figura 5.60 – Modos de propagação de Lamb obtidos via FFT-2D dos sinais no domínio do tempo e espaço. As ilustrações à esquerda representam as ondas incidentes e as da direita representam as ondas refletidas correspondentes: (a) e (b)CP3_SD; (c) e (d) CP3_F; (e) e (f) CP3_D. **167**

Figura 5.61 – Modos de propagação de Lamb obtidos via FFT-2D dos sinais no domínio do tempo e espaço. As ilustrações à esquerda representam as ondas incidentes e as da direita representam as ondas refletidas correspondentes: (a) e (b)CP4_SD; (c) e (d) CP4_F; (e) e (f) CP4_D. **168**

Figura 5.62 – Curvas de dispersão experimental e simulada em termos de frequência e número de onda dos modos de propagação das ondas de Lamb incidentes para os Corpos de Prova CP3. São visualizados os modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 . **169**

Figura 5.63 – Curvas de dispersão experimental e simulada em termos de frequência e número de onda dos modos de propagação das ondas de Lamb incidentes para os Corpos de Prova CP4. São visualizados os modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 . **169**

Figura 5.64– As ilustrações mostram as velocidades de fase em função da frequência para as ondas incidentes e refletidas para os corpos de prova: (a) CP3_SD; (b) CP3_F; (c) CP3_D. **171**

Figura 5.65 - As ilustrações mostram as velocidades de fase em função da frequência para as ondas incidentes e refletidas para os corpos de prova: (a) CP4_SD; (b) CP4_F; (c) CP4_D. **172**

Figura 5.66 – Fotografias Schlieren dos corpos de prova: (a) CP1_SD com feixe ultra-sônico incidente paralelo as fibras; (b) CP21_SD com feixe ultra-sônico incidente perpendicular as fibras. Nas imagens, é visualizado o feixe ultra-sônico que incide sobre a superfície do corpo de prova, o feixe transmitido e a região de interferência (campo nulo) entre as reflexões geométrica e não especular (efeito Schoch). **173**

Figura 5.67 – Fotografias Schlieren do corpo de prova CP1_F com o feixe ultra-sônico incidente paralelo à direção das fibras: (a) sobre a região com fratura de fibras; (b) em região sem defeito. Os posicionadores delimitam a região do defeito. **174**

Figura 5.68 – Fotografias Schlieren do corpo de prova CP1_F com o feixe ultra-sônico incidente perpendicular a direção das fibras: (a) sobre a região com fratura de fibras; (b) em região sem defeito. Os posicionadores delimitam a região do defeito. **175**

Figura 5.69 – Fotografias Schlieren do corpo de prova CP1_D com o feixe ultra-sônico incidente paralelo à direção das fibras: (a) saindo da região sem defeito; (b) totalmente sobre a área delaminada. **176**

Figura 5.70 – Fotografias Schlieren do corpo de prova CP1_D com o feixe ultra-sônico incidente perpendicular à direção das fibras: (a) saindo da região sem defeito; (b) na borda da delaminação **177**

Figura 5.71 – Ensaio de incidência normal por imersão no corpo de prova CP1_D em configuração transmissão-recepção: (a) A-scan sobre região sem defeito; (b) A-scan sobre a região delaminada. **178**

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 – Resumo dos compósitos laminados fibra-metal disponíveis comercialmente.	7
Tabela 4.1 – Principais características dos corpos de prova de LFM.	85
Tabela 4.2 – Composição química da chapa de Alumínio comercial.	86
Tabela 4.3 – Propriedades do prepreg com fibra de vidro unidirecional S_2 / epóxi.	86
Tabela 4.4 – Propriedades do prepreg (UD) com fibra de carbono/ epóxi .	88
Tabela 4.5 – Ângulos de incidência para geração do modo de propagação S_0 na faixa de frequência entre 0,55 e 1,0 MHz por ensaio de imersão de chapa de alumínio com 0,5 mm de espessura, LFM/CP3 e LFM/CP4 com 1,34 mm de espessura.	100
Tabela 4.6 – Ângulos de incidência para geração do modo de propagação S_0 na faixa de frequência entre 0,55 e 1,0 MHz por ensaio de contato com sapata de perspex em LFM/CP3 e LFM/CP4 com 1,34 mm de espessura.	103
Tabela 5.1 – Ângulo de incidência do feixe ultra-sônico para geração do modo de propagação S_0 , velocidades de fase e grupo na faixa de frequência de 0 a 1 MHz, em ensaio por imersão na chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura e CP3 e CP4 com 1,34 mm de espessura.	118
Tabela 5.2 – Ângulos de incidência do feixe ultra-sônico para geração do modo de propagação S_0 , velocidades de fase e grupo na faixa de frequência de 0 a 1 MHz, em ensaio por contato com sapata de perspex em CP3 e CP4 com 1,34 mm de espessura.	121

Tabela 5.3 – Valores do número de onda e velocidade de fase em cada frequência para o modo de propagação A_0 no LFM/CP3 por ensaio de não-contato. **122**

Tabela 5.4– Valores do número de onda e velocidade de fase em cada frequência para o modo de propagação A_0 no LFM/CP4 por ensaio de não-contato. **123**

Tabela 5.5 – Valores simulados e experimentais do número de onda em função da frequência para o corpo de prova CP3. **170**

Tabela 5.6 – Valores simulados e experimentais do número de onda em função da frequência para o corpo de prova CP4. **170**

LISTA DE SÍMBOLOS

A	amplitude
f, f_0	freqüência
ω, ω_0	freqüência angular
ρ	densidade
μ, λ	constantes de Lamé
λ	Comprimento de onda
v	velocidade do som
k	número de onda
C_{ij}	constante elástica
p	flutuação de pressão acústica
p'	Valor máximo da amplitude de p
P_t	pressão total
P	pressão constante no meio
t	variável tempo
T	período
p_0, p_1	Amplitude da onda acústica
ϕ	potencial de deslocamento escalar
ψ	potencial de deslocamento vetorial
k_t	número de onda transversal)
k_l	número de onda (longitudinal)
d	Espessura da placa
Re	Parte real de uma função complexa
ν	Constante de Poisson
$\vec{\sigma}$	Tensor tensão
$\vec{\varepsilon}$	Tensor deformação relativa
\vec{c}	Tensor de rigidez elástica

\mathbf{u}	Vetor deslocamento de campo
u_x	deslocamento (eixo x _ direção de propagação)
u_y	deslocamento (eixo y _ direção de propagação)
u_z	deslocamento (eixo z _ direção de propagação)
v_f	velocidade de fase
v_g	velocidade de grupo
v_l	velocidade de fase de ondas longitudinais
v_t	velocidade de fase de ondas transversais
$\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$	componentes de tensão
N_s	números de modos simétricos
N_a	números de modos assimétricos

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os compósitos laminados fibra-metal (LFM) foram recentemente lançados no mercado e são utilizados principalmente na indústria aeronáutica. Consistem de camadas alternadas de finas chapas metálicas e de pré-impregnados (prepreg) que, por sua vez, são constituídos de uma matriz, agente de reforço e interfaces, as quais detêm grande importância, pois influenciam no comportamento mecânico destes materiais ^[1,2]. As matrizes podem ser poliméricas, cerâmicas ou metálicas tendo fibras como agente de reforço. O material combina as propriedades do metal com as propriedades das fibras. Como resultado, os LFM possuem em geral, propriedades mecânicas superiores às ligas do metal isoladamente, mas com densidade menor. É de extrema importância que sejam avaliados por métodos não-destrutivos eficazes na detecção de danos comuns a fim de assegurar a segurança e a confiabilidade das estruturas que utilizam estes materiais

A figura 1.1 ilustra a montagem de um LFM de alumínio 3/2, isto é, três camadas de chapas de alumínio intercaladas com duas camadas adesivas de fibras ^[3].

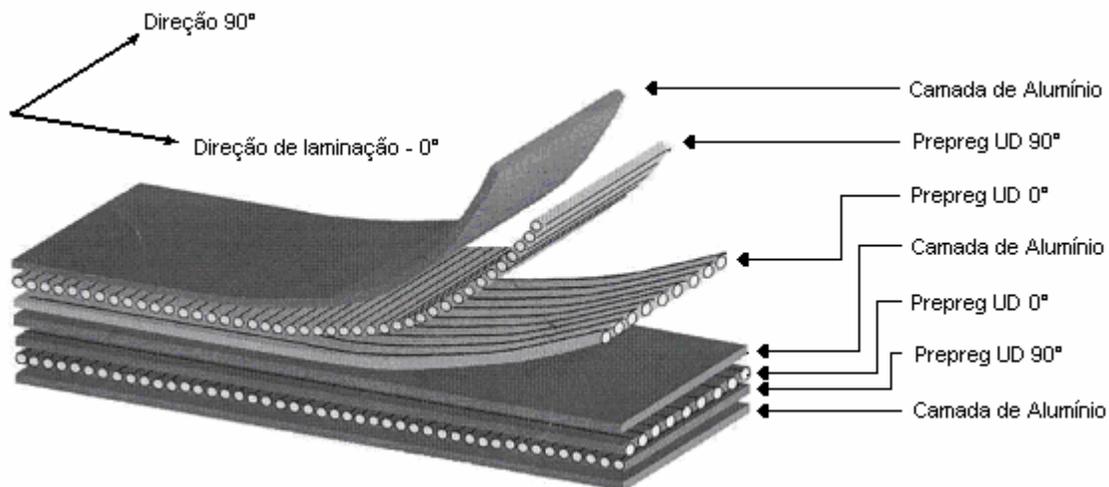


Figura 1.1 - Ilustração do empilhamento de um LFM 3/2 com três camadas de alumínio e duas camadas intermediárias de prepreg com fibras nas direções de 0° e 90° ^[3].

Nos LFM a camada intermediária adesiva de fibras consta de duas ou mais camadas de prepreg unidirecionais (UD). A direção das fibras na camada de prepreg está relacionada à direção de laminação das chapas de alumínio: fibras em 0° estão na mesma direção de laminação (longitudinal); fibras em 90° , direção transversal à laminação [3].

Na avaliação não-destrutiva tradicional as técnicas usadas freqüentemente em materiais metálicos nem sempre são adaptáveis aos compósitos devido à sua natureza heterogênea e anisotrópica.

Atualmente as inspeções em compósitos empregam técnicas de avaliação não-destrutivas tais como radiografia, holografia óptica, ultra-som, correntes parasitas, emissão acústica e termografia.

A termografia pulsada [4] pode ser uma alternativa de ensaio, mas o custo/benefício deve ser analisado em função do custo do equipamento. A radiografia é uma técnica eficaz quando os danos de impacto causam uma abertura na superfície do material compósito, por onde um contraste, de elevado coeficiente de absorção aos raios- X, é aplicado à superfície escoando para o interior das delaminações. O contraste absorve os raios X e conseqüentemente as delaminações são identificadas. Entretanto, esta técnica não pode ser usada em delaminações posicionadas no interior do compósito [4]. A inspeção por correntes parasitas pode ser usada em alguns tipos de LFM detectando defeitos tais como ruptura de fibras devido a danos de impacto [5], mas são ineficazes em defeitos importantes como delaminações. O ultra-som convencional não é facilmente adaptável a compósitos devido à heterogeneidade e natureza anisotrópica destes [4]. Além disso, as técnicas ultra-sônicas tais como as de pulso-eco de incidência normal, em função da pequena espessura das lâminas de compósitos, têm dificuldades na resolução de defeitos próximos a superfície, onde as reflexões das descontinuidades se encontram freqüentemente dentro do comprimento do pulso ultra-sônico transmitido. Isto impõe um limite numa profundidade mínima para que um defeito possa ser identificado com um transdutor de baixa freqüência. Melhorar este limite mínimo de profundidade usando um transdutor de alta freqüência, sem uma metodologia adequada e sem processamento de sinal, pode ser problemático para um compósito laminado, pois podem ocorrer reflexões devido às interfaces entre as várias camadas e aos contornos livres da placa, o que dificultaria a visualização das reflexões dos defeitos [4]. E ainda, no ultra-som

convencional, a área sob investigação é limitada à região coberta pelo feixe ultra-sônico do transdutor. Este tipo de ensaio local consome muito tempo na inspeção de grandes estruturas em forma de chapas pela necessidade do transdutor realizar uma varredura em toda a área a ser inspecionada. Portanto, há a necessidade do desenvolvimento de uma técnica de ensaio para a detecção de danos em materiais compósitos de forma mais rápida e com confiabilidade. Na indústria, uma forma de encurtar o tempo de inspeção de chapas produzidas em série, poderia ser através do emprego de uma matriz (“array”) de transdutores, permitindo uma varredura eletrônica.

Entre as várias técnicas disponíveis, as ondas ultra-sônicas guiadas, em especial as ondas de Lamb, oferecem um método que pode ser conveniente na avaliação de materiais compósitos, pois podem ser propagadas em pequena espessura e a longas distâncias. A propagação depende da densidade e das propriedades elásticas dos materiais, sendo influenciadas pela seleção da frequência da onda, do ângulo de incidência do feixe sônico e da espessura do material.

Estas ondas oferecem um potencial maior para ser utilizado em inspeções não-destrutivas devido:

- Ao caráter de múltiplos modos de propagação;
- A sensibilidade a diferentes tipos de falhas;
- A propagação a longas distâncias;
- Ao caráter de guia o que as permite seguir a curvatura e alcançar partes não acessíveis da estrutura ^[6].

Embora áreas específicas da aplicação das ondas de Lamb sejam encontradas em ensaios não-destrutivos, há pouca informação disponível sobre a utilização destas ondas nas pesquisas em materiais compósito laminado fibra-metal, com a finalidade de detecção de danos. Durante a presente pesquisa, foram encontrados apenas os trabalhos de CHIU *et al.* ^[7] e DEMCENKO *et al.* ^[8].

O principal objetivo do presente trabalho é a aplicação de diversas metodologias para inspecionar materiais compósitos laminados fibra-metal utilizando ondas de Lamb em corpos de prova em forma de placas com defeitos implantados. Para tal, foram utilizadas diferentes técnicas para a geração destas ondas.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre os LFMs, como também dos artigos que abordam sobre técnicas de inspeção utilizando as ondas ultra-sônicas de Lamb em chapas de alumínio e materiais compósitos de matriz epóxi reforçada por fibras.

No capítulo 3 é feita uma revisão teórica sobre os princípios básicos necessários ao entendimento da propagação das ondas de Lamb em placas, a geração de ultra-som a partir do laser e a utilização da Transformada de Fourier bi-dimensinal como uma ferramenta na separação das ondas de Lamb incidentes e refletidas.

No capítulo 4 são descritos os processos de fabricação dos corpos de prova de LFMs que foram utilizados na pesquisa, as metodologias aplicadas nas inspeções e o processamento dos sinais capturados.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos na pesquisa bem como a sua discussão.

As conclusões deste trabalho são apresentadas no capítulo 6. Adicionalmente, há um apêndice com os resultados do mapeamento automático dos corpos de prova pela técnica de pulso-eco por imersão pela qual, imagens C-scan foram obtidas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é a apresentação de uma revisão bibliográfica sobre os principais temas envolvidos nesta pesquisa, incluindo a caracterização dos compósitos laminados fibra-metal bem como os possíveis danos tipo fratura de fibras e delaminação e a aplicação de ensaios não-destrutivos ultra-sônicos utilizando as ondas de Lamb na inspeção desses materiais.

2.1- COMPÓSITOS LAMINADOS FIBRA-METAL

Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados por apresentarem vantagens sobre as ligas metálicas convencionais. Em particular, na indústria aeronáutica, onde a segurança é fator crítico, elementos primários e secundários da fuselagem eram projetados e produzidos somente por ligas metálicas, como as de alumínio. As atuais aeronaves civis usam materiais compósitos poliméricos reforçados por fibra de carbono, a fim de melhorar a resistência das ligas de alumínio à propagação de danos por fadiga como também a diminuição do excesso de peso estrutural. Há inconvenientes em ambos os sistemas: as ligas de alumínio são vulneráveis ao crescimento de trinca por fadiga e à exposição ambiental, e os materiais compósitos são susceptíveis a danos por impacto. Para diminuir estes inconvenientes foram desenvolvidos os primeiros compósitos laminados fibra-metal, representando uma evolução significativa nos sistemas materiais para uso em estruturas aeronáuticas. BASTIAN *et al.* [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16], apresentaram diversos trabalhos envolvendo estudos sobre tensão residual, tenacidade à fratura, micro-mecanismos de fratura em LFM's unidirecionais, comprovando as características superiores destes materiais.

Em 1978, um compósito de nome comercial ARALL[®] (Aramid Reinforced ALuminum Laminate) foi desenvolvido na Holanda pela Universidade Técnica de Delft (TUDelft) usando fibras de aramida. O resultado foi um material tolerante a danos e em conformidade com as necessidades dos fabricantes de aeronaves através de baixa densidade, rigidez elevada, resistência à corrosão, resistência à fadiga e elevada tenacidade à fratura. No ARALL[®] e em outros LFM's, as camadas internas de fibras reduzem o crescimento da trinca por fadiga nas camadas de alumínio, construindo "uma ponte" (efeito *crack bridging*) sobre a região da trinca, reduzindo a intensidade da

tensão na ponta da trinca, figura 2.1 ^[17]. Este laminado foi produzido em escala comercial pela ALCOA[®] a partir de 1984.

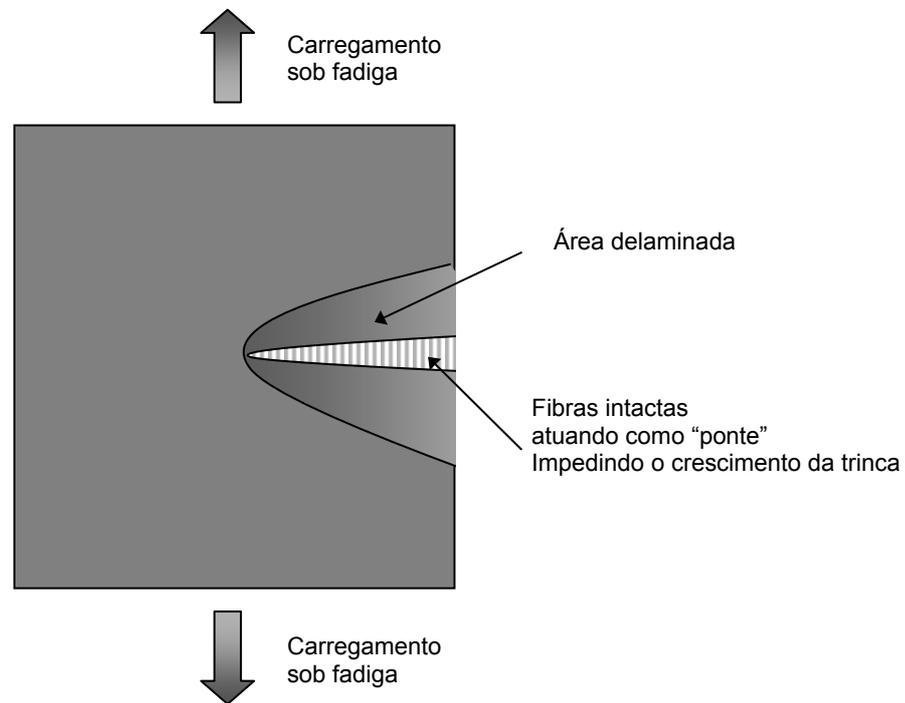


Figura 2.1 – Ilustração do efeito *Crack Bridging* decorrente da presença de fibras sob a trinca de fadiga gerada em compósito laminado reforçado por fibras.

Atualmente já são conhecidas algumas deficiências no ARALL[®], como por exemplo, a baixa resistência na interface entre a matrix epóxi e as fibras, a absorção de umidade e falha subsequente na interface entre as fibras de aramida ^[18]. Também foram observadas falhas nas fibras sob regimes de carregamento de fadiga por tensão-compressiva, o que reduz a eficiência do efeito *crack bridging* bem como o “comportamento sem corte” na ponta da trinca, devido ao limite da tensão de falha das fibras de aramida. Para superar estes problemas, laminados alternativos foram desenvolvidos incorporando a fibra de carbono (CARE[®] - CARbon REinforced) e a fibra de vidro (GLARE[®] - GLASS REinforced). Problemas imediatos foram observados nos LFM de carbono incluindo a corrosão galvânica entre a liga e as fibras, além de um pior “comportamento sem corte” na ponta da trinca do que o ARALL[®], devido à menor tensão de falha das fibras de carbono. Recentemente, as fibras de carbono foram reconsideradas para o uso em laminados com ligas do alumínio-lítio e com ligas de titânio ^[19].

Em 1990, a fibra de vidro foi utilizada em substituição às fibras de carbono e de aramida nos LFM. Com isso houve melhora na resistência aos danos por compressão em relação às fibras de aramida, sendo as fibras de vidro menos sensíveis aos danos por fadiga por tensão-compressiva. Trabalhos recentes ^[3, 17] mostraram benefícios deste novo material compósito sobre as ligas de alumínio e das fibras de vidro, isoladamente, principalmente quanto a resistência à fadiga e ao impacto. O desenvolvimento contínuo e a aplicação comercial do GLARE[®] vieram quando a Airbus Industry decidiu usá-lo na aeronave A-380. Como desvantagens, o GLARE[®] apresenta custos de produção mais elevados quando comparados à produção de ligas de alumínio tradicionais. Entretanto, estes custos são compensados por baixos custos de manutenção e pela diminuição do consumo de combustível devido à estrutura da aeronave ser mais leve ^[3, 17].

Diversas variantes dos compósitos laminados fibra-metal estão atualmente disponíveis comercialmente ou em desenvolvimento. Um resumo mostrando a nomenclatura dos LFM, pesquisadores que desenvolveram, fabricantes comerciais e materiais utilizados na produção é mostrado na tabela 2.1 ^[20].

Tabela 2.1 – Resumo dos compósitos laminados fibra-metal disponíveis comercialmente ^[20]

Status	Pesquisadores / Fabricantes	Nome	Liga	Fibra / Matrix
Disponíveis comercialmente	TU Delft/Structural Laminates Corporation	GLARE [®]	Al: 2024-T3 e 7475-T76	Vidro / epóxi
	TU Delft/Structural Laminates Corporation	ARALL [®]	Al: 2024-T3 e 7475-T76	Aramida / epóxi
	TU Delft/Structural Laminates Corporation	CARE [®]	Al: 2024-T3 e 7475-T76	Carbono / epóxi

2.2 – DANOS PRESENTES NOS LFM

Uma grande variedade de modos de deformação pode levar à falha dos compósitos reforçados por fibras. Os principais tipos de danos que podem reduzir a resistência mecânica do LFM são a ruptura de fibras, o descolamento fibra/matriz e a delaminação ^[21]. O modo de falha operante depende, dentre outros fatores, das condições de carregamento e da estrutura interna (empilhamento, direção das fibras) do sistema compósito específico. Associados a esta estrutura interna têm-se a influência do diâmetro da fibra, fração volumétrica de fibra, distribuição geométrica da fibra e danos resultantes de tensões térmicas que podem se desenvolver durante a fabricação e/ou em serviço ^[21].

Ao contrário dos materiais compósitos tradicionais, os LFMs não são susceptíveis à formação de grandes áreas de danos internos quando sujeitos a impacto. Danos internos, devidos a impacto a baixa velocidade, são os mais encontrados em estruturas compósitas e consistem em trincas na matriz polimérica, assim como delaminação e ruptura das fibras, sendo, geralmente, invisíveis a olho nu. Entre os vários tipos de danos, a delaminação causa uma perda significativa da resistência à compressão e rigidez ^[3,17]. A figura 2.2 ilustra um LFM 3/2 com presença de delaminação na lâmina metálica superficial e trincas internas presentes nas camadas de fibras ^[17].

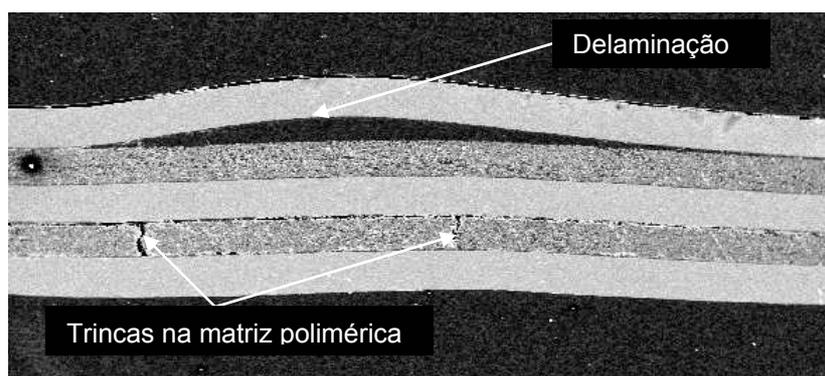


Figura 2.2 – Vista do corte lateral de um LFM 3/2 com a presença de delaminação na lâmina metálica superficial e trincas internas nas camadas de fibras ^[17].

2.3 – UTILIZAÇÃO DAS ONDAS DE LAMB EM ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

2.3.1- HISTÓRICO

A primeira teoria da propagação da onda em meio formado por multicamadas foi descrita por Lord Rayleigh em 1885, resultando na determinação da velocidade de propagação da onda ao longo de superfícies livres num meio elástico semi-infinito ^[22].

Em 1917, Horace Lamb, introduziu o conceito da camada homogênea de espessura finita e descreveu equações da velocidade de propagação das ondas em chapas contínuas com contornos livres, obtendo duas soluções: uma para modos de propagação assimétricos, dadas por funções do tipo seno e outra para modos de propagação simétricos, representadas por funções do tipo co-seno. Uma descrição física detalhada das propriedades e aplicações das ondas de Lamb foi apresentada por Viktorov ^[22].

Um resumo das teorias mencionadas anteriormente foi feito por Stoneley em 1924, o qual investigou a propagação das ondas ao longo da interface entre dois meios sólidos elásticos diferentes. Posteriormente, estudos foram direcionados para condições onde as ondas pudessem propagar sem perda de energia nos sólidos (modos de propagação “verdadeiros”) e, com “vazamento” de parte da energia sônica para o meio circundante (modos de propagação das ondas *leaky* Lamb) ^[23].

O reconhecimento das ondas de Lamb, como um meio não-destrutivo de detecção de danos, ocorreu, aparentemente, somente em 1960 por Worlton ^[24, 25]. No seu trabalho, ele investigou as curvas da dispersão dos modos de propagação das ondas de Lamb no alumínio e no zircônio. Os deslocamentos das partículas e as velocidades de propagação das ondas no interior dos corpos de prova foram descritos, bem como os efeitos da presença de danos implantados e da variação de espessura. A sensibilidade à detecção de danos e a economia de tempo nos ensaios com as ondas de Lamb foram comparados aos resultados obtidos em ensaios ultra-sônicos convencionais.

2.3.2 - MODOS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE LAMB

Há dois aspectos importantes associados às ondas de Lamb: primeiro, existe um número infinito de modos de propagação diferindo em velocidade de fase e na distribuição dos deslocamentos das partículas e das tensões através da espessura ^[22]; segundo, a velocidade de fase é uma função da frequência, isto é, em relação às ondas de Lamb o meio de propagação pode ser dispersivo. Com isto, havendo dispersão, a forma da onda muda com a distância percorrida ao longo do trajeto de propagação. Isto faz com que a interpretação dos sinais da onda seja complexa e também surjam problemas devido à relação sinal/ruído uma vez que a envoltória do sinal da onda diminui rapidamente com a distância.

Dependendo do meio de propagação, é possível selecionar faixas de frequência que contêm modos de propagação onde suas respectivas velocidade de fase não variam com a frequência. Segundo KARPUR *et al.* ^[26] os modos de propagação simétrico S_0 e assimétrico A_0 não são igualmente sensíveis a defeitos encontrados no plano central de placas de alumínio e aço. Em geral, o modo de propagação S_0 é mais rápido e sua velocidade não varia tanto com a frequência como no modo de propagação A_0 . Por outro lado, o modo de propagação A_0 é mais sensível aos danos do que os modos de propagação S_0 ^[27].

Na prática, torna-se difícil a geração de um único modo de propagação, pois deve existir um controle fino da banda de frequência e do ângulo de incidência do feixe ultra-sônico no material inspecionado ^[7, 8, 28]. Conseqüentemente, a detecção de danos utilizando estas ondas requer experiência e compreensão sobre:

- O tipo de ensaio (por imersão, contato, não-contato) a ser utilizado na inspeção;
- A forma de gerar e detectar as ondas de Lamb (laser, transdutores piezo-compósitos, transdutores piezo-élétricos de titanato zirconato de chumbo (PZT), transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT), transdutores interdigitais, sensores de fibra óptica);
- A configuração de ensaio (pulso-eco, transmissão-recepção, pulso-reflexão);

- O posicionamento dos transdutores no material a ser inspecionado (distância entre os sensores, distância do(s) sensor(es) em relação as bordas para o caso de inspeção de chapas);
- A escolha da banda de frequência e outros parâmetros descritos em ^[6, 29].

Os modos de propagação que refletem nos contornos e bordas das chapas podem interferir com os componentes das ondas geradas por espalhamento nos defeitos. Para evitar o surgimento de artefatos, o corpo de prova inspecionado deve ser relativamente grande, e com danos cujas áreas são relativamente pequena ^[6].

Pesquisadores ^[26, 30, 31, 32, 33, 34, 35] estudaram a propagação da onda de Lamb em placas de vidro, aço, alumínio e placas material compósito de múltiplas camadas com matriz polimérica para detectar danos internos. Nestas investigações, a frequência do sinal foi elevada, acima de 1 MHz. Os corpos de prova foram imersos em tanque d'água e neles foram feitas varreduras por dois transdutores em configuração transmissão-recepção ^[30, 32]. Os sistemas apresentaram bons resultados somente para os corpos de prova de pequenas dimensões, entretanto, não foram eficientes para inspecionar corpos de prova de maiores. Estes necessitam de tanque e áreas grandes de varredura, o que consome grande tempo de inspeção. Segundo KARPUR *et al.* ^[26], para inspecionar placas grandes, é necessário usar um sinal de baixa frequência de forma que este possa propagar ao longo da placa sem ser atenuado rapidamente. Todavia, esta atenuação própria de sinais de baixa frequência, adiciona um outro grau de dificuldade à técnica de inspeção de placas grandes se a inspeção for realizada por imersão. Quando a placa está imersa no líquido, o transmissor e o receptor estão posicionados acima do corpo de prova como mostrado na figura 2.3. O sinal recebido pelo receptor é composto de diversos sinais ou ondas, incluindo as ondas de Lamb propagando através do corpo de prova (sinal 1), as ondas longitudinais refletindo pela superfície superior do líquido (sinal 2), e das ondas longitudinais que atravessam a chapa e geram múltiplas reflexões entre o corpo de prova e a base inferior do tanque (sinal 3). Um pequeno distúrbio na superfície da água afeta significativamente o sinal recebido.

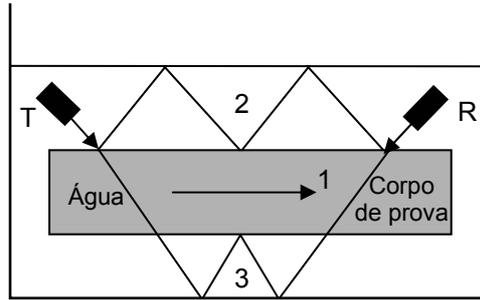


Figura 2.3 – Três sinais diferentes (1, 2 e 3) são detectados pelo receptor baixa frequência de excitação ^[26].

Nos ensaios por imersão, por exemplo, quando a superfície livre da água é perturbada pode acontecer variação na forma do sinal obtido. A figura 2.4 mostra quatro sinais recebidos em quatro instantes diferentes para uma mesma configuração do corpo de prova / transdutor-receptor, estando a superfície da água em movimento. Observa-se que a forma e a amplitude do sinal variam significativamente entre os quatro instantes. As formas dos sinais das ondas superior e inferior da figura 2.4 alcançaram a saturação em algumas regiões enquanto as formas de onda intermediárias não. É difícil obter resultados consistentes para sinais de baixa frequência, com este arranjo, já que o sinal recebido é sensível ao movimento da água. Este problema não ocorre quando sinais em alta frequência são usados para inspecionar corpos de prova pequenos porque os sinais de alta frequência têm pulsos mais estreitos e são facilmente diferenciados dos sinais da onda de Lamb que estão sendo recebidos pelo receptor.

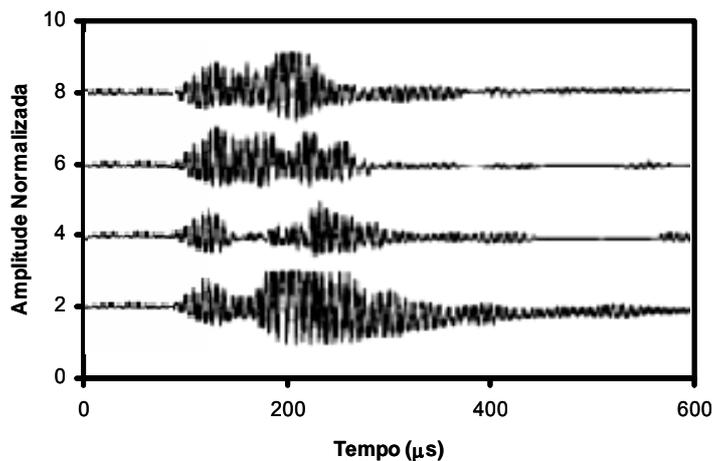


Figura 2.4 - Quatro sinais diferentes recebidos em quatro instantes diferentes para um mesmo corpo de prova imerso em água ^[26].

O contato direto entre transdutores e o corpo de prova, como mostra a figura 2.5(a), evita o uso de um tanque de imersão e da água como líquido acoplante. Entretanto, neste caso não se pode gerar apenas um modo de propagação específico de Lamb sem ajuste do ângulo de incidência dos transdutores relativo ao corpo de prova para uma dada frequência do sinal como foi feito por KUNDU *et al.* em [32].

Embora o uso de transdutores por contato com ângulo de incidência variável possam ser considerados (ver figura 2.6), a técnica do contato apresenta outra desvantagem: o sinal recebido varia significativamente com a pressão de contato entre os transdutores e o corpo de prova. Para evitar os problemas descritos anteriormente, o transmissor e o receptor estão dispostos em dois recipientes de água pequenos, colocados diretamente sobre a placa como mostra a figura 2.5(b). Este arranjo permite que somente a onda de Lamb alcance o receptor e as ondas longitudinais (ver ondas 2 e 3 da figura 2.3) sejam eliminadas. Este sistema fornece um sinal mais estável, e permite que o transmissor e o receptor possam ser inclinados em relação ao corpo de prova. Assim, os modos de propagação específicos de Lamb podem ser gerados.

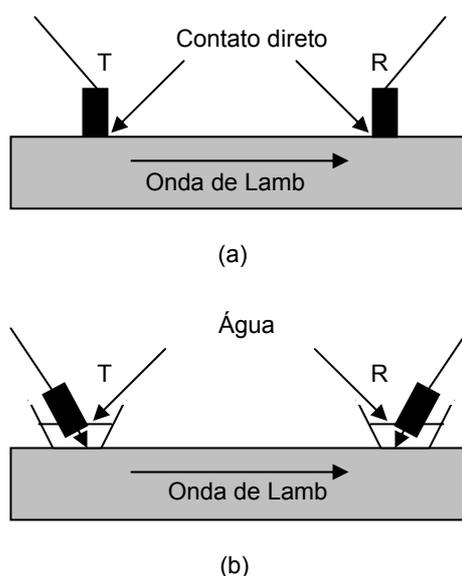


Figura 2.5 – (a) Excitação por contato direto; (b) configuração para geração das ondas de Lamb com transdutores imersos em água [26].

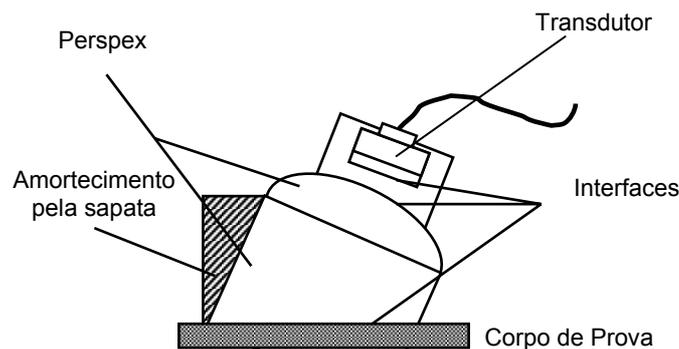


Figura 2.6 – Transdutor acoplado a sapata com ângulo de incidência variável [7].

A técnica de ensaio ultra-sônico convencional utiliza a excitação de um pulso, o que pode ser inconveniente na geração de um modo específico da onda de Lamb, pois a largura de banda do pulso possui vários componentes espectrais que podem estimular a geração de outros modos de propagação. A outra desvantagem da excitação em banda larga é que o modo de propagação desejado tenderá a ser excitado em regiões dispersivas conjuntamente com a faixa não-dispersiva desejada. ALLEYNE *et al.* [36] propuseram um método para solucionar problemas decorrentes da utilização do pulso de banda larga e assim, otimizar o uso da técnica de inspeção por ondas de Lamb. A figura 2.7 mostra o sinal correspondente a excitação de um pulso numa placa de aço de 0.6 mm de espessura. Foram utilizados transdutores com ângulo de incidência variável (ver figura 2.6) na configuração transmissão-recepção, sendo utilizado um ângulo de incidência de 30° para geração do modo de propagação S_0 num baixo valor do produto frequência-espessura. Quando o transdutor-transmissor estava posicionado numa região a 40 mm das bordas da placa, o sinal mostrado pela figura 2.7(a) pode esconder as reflexões características ao longo do trajeto de propagação da onda. Isto é ilustrado na figura 2.7(b), que contém a reflexão da borda a 60 mm do transmissor. A onda refletida referente ao modo de propagação mais rápido é recebida juntamente com os modos de propagação mais lentos. A figura 2.7(c) mostra a amplitude do espectro do sinal da figura 2.7(b). Observa-se que há energia significativa do sinal em frequências abaixo de 3 MHz (1,8 MHz.mm) e entre 5 e 6 MHz (3-3,6 MHz.mm).

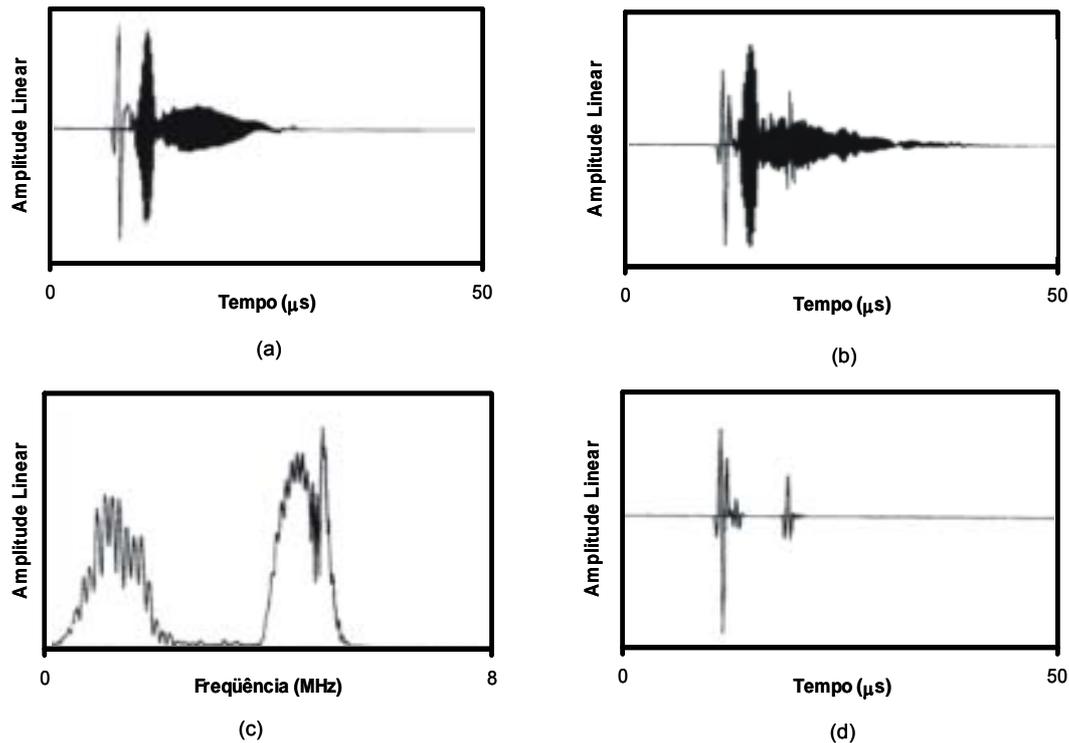


Figura 2.7 - Ensaios com excitação de um pulso de banda larga em configuração transmissão-recepção em chapa de aço: (a) sinal de saída do transdutor-transmissor posicionado a 40mm da região da borda da placa; (b) resposta contendo a reflexão da borda a 60 mm do transdutor-transmissor; (c) amplitude do espectro para o sinal mostrado em (b); (d) resultado da transformada inversa de Fourier do sinal mostrado em (c), após filtragem para remover componentes de frequência acima de 3 MHz ^[36].

A amplitude do espectro de frequência do sinal mostrado na figura 2.7(b) foi praticamente nula na faixa de frequência de 2-4 MHz, pois a placa atua como um filtro mecânico e transmite somente em regiões do espectro onde os modos de propagação das ondas de Lamb são excitados. A dispersão mostrada nas figuras 2.7(a) e 2.7(b) foi devida aos componentes do sinal com frequência mais elevada que foram provavelmente os modos de propagação de A_1 e S_1 em torno de 5-6MHz (3-3,6 MHz.mm) uma vez que a curva de dispersão para o aço (figura 2.8) mostra que nesta faixa de frequência as velocidades de fase e os comprimentos de onda destes modos de propagação possuem valores próximos aos do modo de propagação S_0 para baixos valores do produto frequência-espessura e portanto serão excitados com os mesmos ângulos de incidência do feixe sônico.

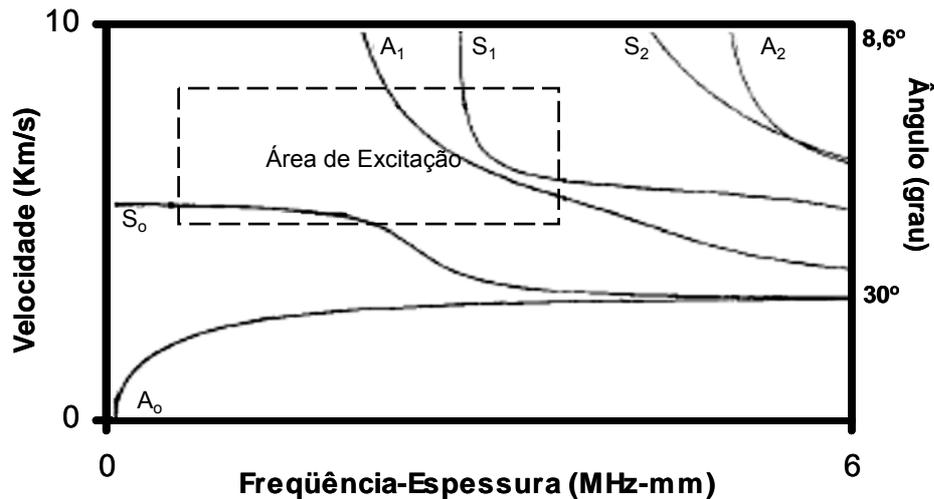


Figura 2.8 – Curvas de dispersão para o aço. A caixa retangular mostra a região pouco dispersiva para excitação do modo de propagação S_0 [36].

A modulação mostrada na figura 2.7(c) foi devida à interferência da reflexão do sinal proveniente da borda com o sinal gerado (emitido) pelo transdutor. A figura 2.7(d) mostra o resultado da edição do espectro da figura 2.7(c), após remoção dos componentes da freqüência acima de 3 MHz, por transformada inversa de Fourier. O sinal resultante no domínio de tempo se mostra muito mais simples do que o da figura 2.7(b) e o modo de propagação S_0 gerado, assim como sua reflexão da borda, podem ser facilmente vistos [36]. Os autores concluíram que a aplicação de um filtro para a remoção de componentes de freqüência acima de 3 MHz seguidas da transformada inversa de Fourier possibilitaram a visualização de um único modo de propagação (S_0) e de sua reflexão na borda da chapa.

2.3.3 - APLICAÇÕES DAS ONDAS DE LAMB NA DETECÇÃO DE DEFEITOS

LOWE *et al.* [37] apresentaram resultados da pesquisa sobre o comportamento do modo de propagação da onda de Lamb S_0 quando este incide numa chapa de alumínio com um furo circular plano (profundidade de 50% da espessura da placa), representando uma perda de espessura por corrosão. Neste trabalho, o furo em profundidade adicionou um fator a ser considerado: as conversões de modos de propagação entre ondas simétrica e assimétrica. Uma análise foi realizada em função das dimensões do furo. Apesar da descontinuidade não representar fielmente a perda de espessura por corrosão, o comportamento encontrado neste estudo foi análogo ao comportamento em casos reais. Na primeira parte deste trabalho, a reflexão do modo

de propagação da onda foi prevista através de modelagem por elementos finitos (FEM) e foram considerados diversos fatores: a interferência entre os fenômenos de reflexão das bordas com o furo e das reflexões secundárias, e o decréscimo na amplitude da onda refletida. Na segunda parte da pesquisa, dados experimentais foram obtidos a partir da geração do modo de propagação da onda de Lamb por transdutores EMAT na configuração transmissão-recepção.

Na etapa experimental, foram utilizadas três chapas de alumínio com 1 m² de área e 3 mm de espessura contendo cada uma um furo com os respectivos diâmetros 30, 40 e 50 mm e profundidade de 50% da espessura da chapa. O sinal da onda foi gerado por *tone-burst* com 5 ciclos no janelamento Hanning. As medições foram realizadas em cinco diferentes valores de frequência correspondendo ao produto frequência-espessura de 450, 570, 660, 810 e 1020 kHz.mm.

A figura 2.9 mostra sinais obtidos experimentalmente e por simulação. Uma análise foi realizada considerando as profundidades dos furos, os comprimentos de onda, e as reflexões características para cada defeito. A figura 2.9(a) mostra a simulação do sinal por varredura em linha, com o defeito (furo com 50 mm de diâmetro) a 250 mm da borda da chapa, observam-se os ecos correspondentes ao modo de propagação incidente da onda de Lamb S_0 e sua reflexão na borda do defeito. Foi observada uma boa correlação entre os resultados da simulação e experimental.

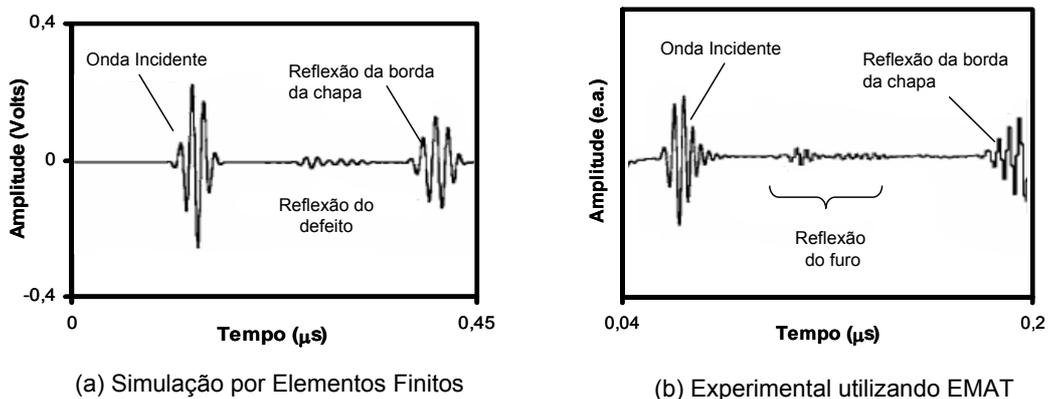


Figura 2.9 – Sinais obtidos para chapa de alumínio contendo furo com diâmetro de 50 mm: (a) por simulação via FEM considerando sinal gerado a 350 mm do defeito; (b) experimentalmente utilizando EMAT a 425 mm da borda do furo ^[37].

GUO *et al.* ^[4] propuseram um método de varredura em linha ao longo de placas de compósitos laminados de fibra de carbono e epóxi utilizando ondas de Lamb para

detectar defeitos do tipo delaminação com diferentes dimensões e profundidades. Para isso, realizaram ensaios de contato utilizando transdutores nas configurações transmissão-recepção e pulso-eco. Os laminados inspecionados foram produzidos pelo empilhando de 30 camadas de prepreg de fibra de carbono/epóxi unidirecionais curadas em autoclave e possuindo as seguintes dimensões: 300 mm X 220 mm X 4,59 mm. Delaminações foram implantadas entre as camadas de prepreg com diâmetros de 60 mm.

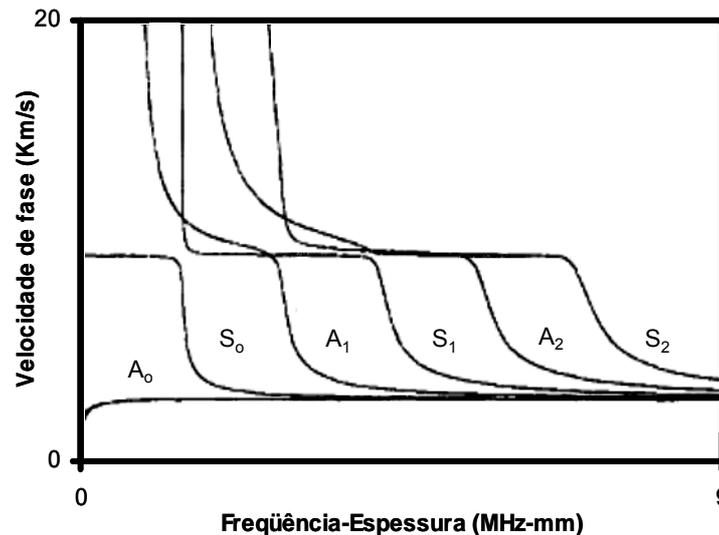


Figura 2.10 – Curva de dispersão para um compósito laminado unidirecional de fibra de carbono/epóxi com 30 camadas de prepreg ^[4].

A figura 2.10 mostra a curva de dispersão simulada para este compósito na faixa de frequência de 0-10 MHz, assumindo que a onda propaga ao longo da direção das fibras ^[38]. Através da curva de dispersão pode-se visualizar que abaixo da frequência de corte do modo de propagação A_1 só existem os modos de propagação fundamentais A_0 e S_0 . Para o modo de propagação S_0 o material compósito laminado apresenta região não-dispersiva entre 0 a 2 MHz e sua velocidade de fase é aproximadamente 8800 m/s. Nesta faixa de frequência a variação da velocidade é pequena. Para o modo de propagação A_0 esse material é dispersivo em frequências muito baixas, tendo uma velocidade de fase que aumenta de forma assintótica para um valor constante o qual corresponde à velocidade da onda superficial de Rayleigh, região de frequência na qual o material é não-dispersivo.

A figura 2.11 ilustra o diagrama esquemático do ensaio ultra-sônico em configuração transmissão-recepção realizado com transdutor-transmissor de 0.5 MHz e ângulo de incidência obtido via acoplamento com sapata de perspex de ângulo variável (0° a

60°). O transdutor-receptor utilizado foi de 5 MHz com banda larga e incidência normal.

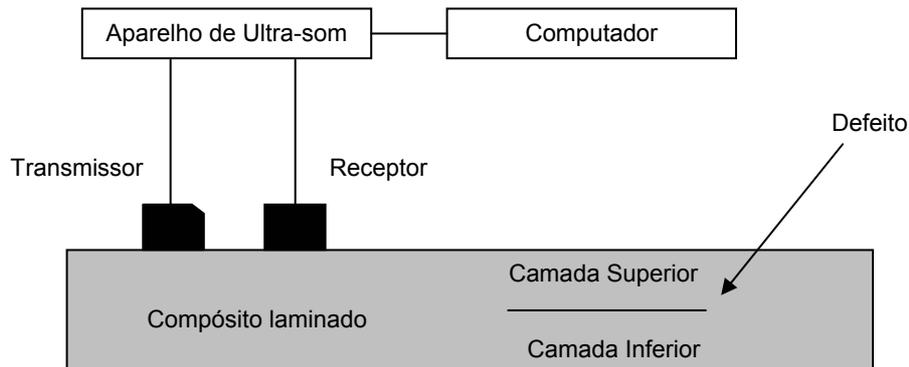


Figura 2.11– Diagrama esquemático para a montagem experimental na configuração transmissão-recepção ^[4].

Durante a varredura sob a superfície delaminada foi observada uma variação da amplitude da onda e, portanto as dimensões das delaminações puderam ser medidas pelo monitoramento da amplitude do modo de propagação das ondas de Lamb S_0 . Posteriormente, a técnica de pulso-eco convencional por incidência normal foi usada para varrer a área correspondente ao defeito a fim de dimensionar a delaminação com precisão. Para tal, foram utilizados transdutores de contato com frequências de 2, 4 e 15 MHz. Os autores compararam as técnicas de pulso-eco de incidência normal e da propagação das ondas de Lamb na configuração transmissão-recepção, concluindo que para uma dada frequência e ângulo de incidência específico, as ondas de Lamb mostraram ser experimentalmente sensíveis a defeitos tipo delaminações próximas à superfície em placas de materiais compósitos de fibra de carbono. Através de medição da amplitude das ondas de Lamb, foi dimensionada a delaminação com 5% de precisão. Isto é particularmente útil no dimensionamento de defeitos próximos a superfície, onde o método pulso-eco de incidência normal tem problemas, devido à localização do defeito ou o eco de fundo se encontram dentro do campo-próximo do transdutor.

TOYAMA *et al.* ^[39, 40, 41, 42, 43] realizaram pesquisas para avaliar as variações das propriedades elásticas em materiais compósitos laminados *cross-ply* (compósitos laminados com camadas de fibras em direções perpendiculares entre si - $[0^\circ/90^\circ]$). Avaliaram também o mecanismo de propagação das ondas de Lamb nestes materiais e o efeito de danos, tais como trincas transversais e delaminações, na velocidade destas ondas. Concluíram que a inspeção ultra-sônica por ondas de Lamb é um

método atrativo, pois a velocidade destas ondas é sensível à rigidez, no plano, nos laminados compósitos.

Em ^[42], TOYAMA *et al.* realizaram medições da rigidez e da velocidade do modo de propagação das ondas de Lamb S_0 em laminados de fibra de carbono e fibra de vidro *cross-ply* nas seqüências de empilhamento $[0_2/90_{12}/0_2]$ e $[0/90_8/0]$ respectivamente. A variação da rigidez e da velocidade do modo de propagação S_0 foram previstas analiticamente em função do comprimento da delaminação e comparadas com resultados experimentais. As delaminações foram simuladas pela inserção de lâmina de teflon de 20 μm de espessura (com dimensões de 10, 20, 30, 40 e 50 mm de comprimento e 15 mm de largura) entre as camadas de prepreg 0° e 90° . Os corpos de prova com e sem delaminação, com área de 200 mm X 15 mm, foram curados em autoclave. A rigidez e a deformação nos corpos de prova foram medidas através de ensaios de tensão, sendo que no ensaio de deformação foi utilizado um extensômetro. A figura 2.12 mostra o esquema experimental necessário às medições da velocidade do modo de propagação S_0 . A velocidade do modo de propagação S_0 foi determinada dividindo a distância entre os sensores de detecção pela diferença do tempo de chegada do modo de propagação S_0 detectado pelo par de sensores.

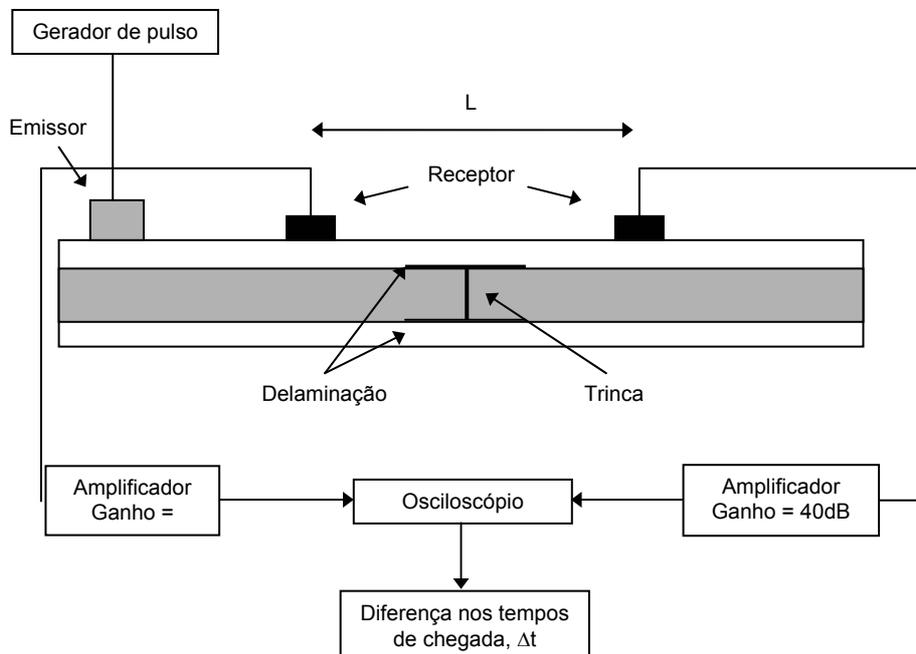


Figura 2.12 – Esquema experimental para medições da velocidade do modo de propagação S_0 ^[42].

As variações de rigidez foram traçadas em função da razão de delaminação (comprimento da delaminação dividido pela medida de L pelo extensômetro), figura 2.13(a). Foi observado que a rigidez decresce com o aumento da razão de delaminação, resultados que estão em acordo com os simulados. Em trabalho anterior [101], um dos autores havia colocado que a diminuição da rigidez, devido à presença de trincas verticais, poderia ser avaliada através de uma redução da velocidade do modo de propagação S_0 . Mas, o contrário foi verificado na presente pesquisa onde a velocidade do modo de propagação S_0 aumenta com o aumento da área delaminada, figura 2.13(b).

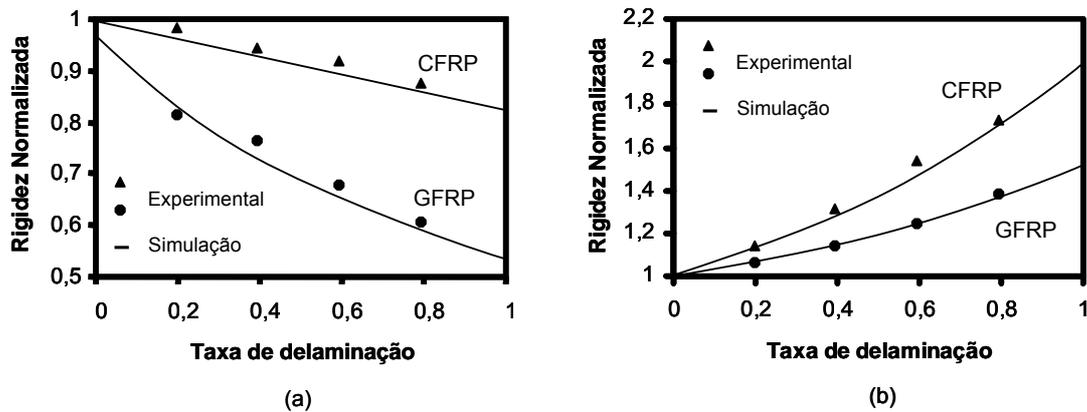


Figura 2.13 – Resultados experimentais e simulados para laminados compósitos *cross-ply* de fibra de vidro (GFRP) e fibra de carbono (CFRP) em função da razão de delaminação. (a) Rigidez normalizada. (b) Velocidade do modo de propagação S_0 normalizada [42]

Com base nos resultados obtidos, foi proposto um modelo para a propagação da onda de Lamb nos laminados *cross-ply* com delaminação entre a interface das camadas de 0° e 90° , ilustrado pela figura 2.14. Segundo os autores [42], a onda de Lamb propaga com uma velocidade inicial antes da delaminação e, propaga separadamente através da camada 0° na região delaminada porque a continuidade interfacial entre as camadas de fibras 0° e 90° não se faz presente. Após propagação pela área delaminada a velocidade da onda volta a ter o valor inicial. Por isso, a velocidade da onda na região delaminada depende da localização, isto é, se a delaminação inicia na interface da camada 0° ou 90° e do tamanho da delaminação no compósito laminado [42].

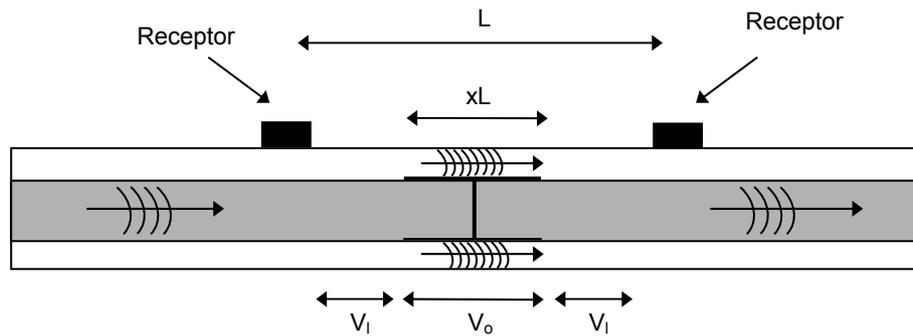


Figura 2.14 – Ilustração para modelo de propagação da onda de Lamb em região delaminada em placa de compósito laminado *cross-ply* ^[42].

TOYAMA *et al.* ^[42] formularam a relação entre a velocidade do modo de propagação S_0 e a área delaminada baseada no modelo descrito anteriormente, como mostra a equação 2.1:

$$\frac{V}{V_i} = \frac{V^0}{xV_i + (1-x)V^0}, \quad (2.1)$$

onde V e V_i são as velocidades do modo de propagação S_0 nos laminados com e sem defeito, respectivamente, e V^0 é a velocidade do modo de propagação S_0 na camada 0° .

Em outro trabalho, TOYAMA *et al.* ^[39] desenvolveram uma técnica rápida e quantitativa de inspeção para detectar delaminação induzida por impacto em compósito laminado *cross-ply* de fibra de carbono e epóxi. Neste trabalho foram avaliados o posicionamento e a dimensão da delaminação utilizando a velocidade e a atenuação do modo de propagação da onda de Lamb S_0 . Placas compósitas de dimensões 300 mm x 300 mm x 90 mm, foram fabricadas com prepreg unidirecional e curadas em autoclave. Foram geradas delaminações por impacto de baixa velocidade.

Os autores propuseram um modelo para avaliar a dimensão da delaminação. Consideraram a presença de uma delaminação de comprimento L nos corpos de prova e a diferença entre o tempo de propagação da onda transmitida em L antes e após a presença da delaminação pode ser expressa por:

$$\Delta t = \left(\frac{1}{V_i} - \frac{1}{V^0} \right) L, \quad (2.2)$$

onde, V_i e V^0 são as velocidades da onda no laminado sem defeito e na camada 0° , respectivamente. Então, L pode ser expressa por:

$$L = \frac{V^0 V_i}{V_0 - V_i} \Delta t. \quad (2.3)$$

Através da equação (2.3), pode-se avaliar o tamanho da delaminação em função da diferença do tempo de chegada da onda de Lamb ^[39].

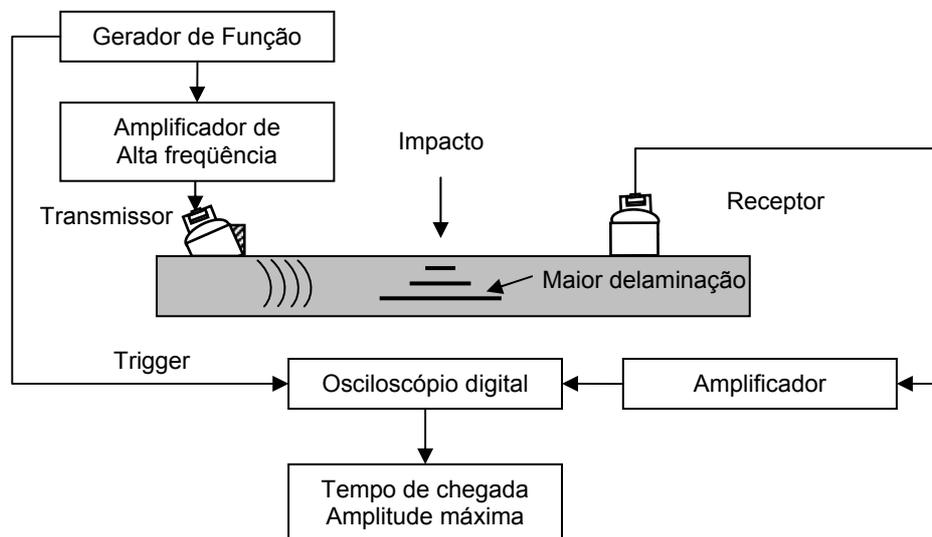


Figura 2.15 - Diagrama do esquema experimental utilizado para a geração e detecção da delaminação por ondas de Lamb ^[39].

A figura 2.15 ilustra o diagrama experimental para a geração e detecção da onda de Lamb. Um transdutor-transmissor de 0,5 MHz acoplado a sapata de ângulo variável foi excitado por gerador de função arbitrária e *tone-burst* de 5 ciclos a 0,3 MHz para gerar o modo de propagação S_0 . O método experimental consiste em realizar duas varreduras em linha ao longo da direção Y na configuração transmissão-recepção mantendo uma distância constante entre os sensores, como ilustra a figura 2.16. Os sinais foram capturados por transdutor-receptor de 0,3 MHz. A primeira varredura mediu a distribuição dos tempos de chegada do modo de propagação S_0 transmitido ao longo da camada de fibras na direção 0° antes e após o impacto, para detectar e avaliar o tamanho da delaminação. Uma diminuição do tempo de chegada do sinal da

onda após impacto no corpo de prova indicou a presença de delaminação. Entretanto, esta varredura não conseguiu determinar em que posição estava localizada o defeito.

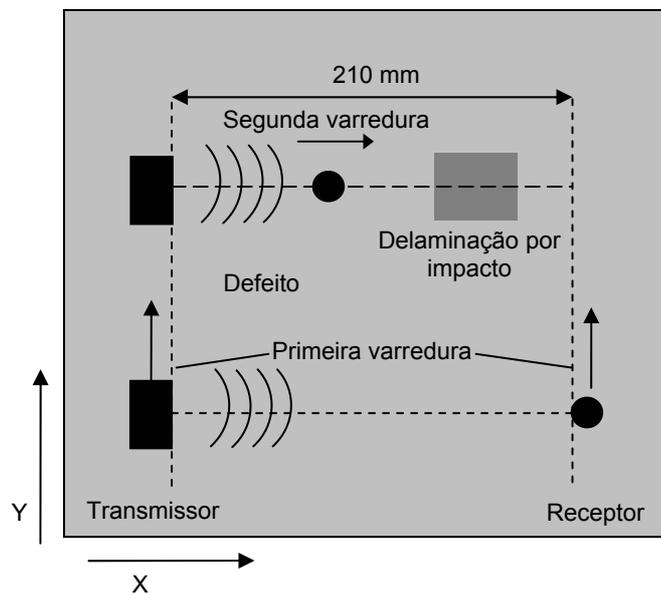


Figura 2.16 - Representação esquemática das varreduras em linha. A primeira varredura mede o tempo de chegada do modo de propagação S_0 transmitido ao longo da direção 0° para detectar e avaliar o tamanho da delaminação, e a segunda varredura para medir a amplitude máxima do primeiro pacote da onda a fim encontrar a borda da delaminação ^[39].

Uma nova varredura teve como objetivo a localização da delaminação. Nesta varredura o transmissor é posicionado fixo à frente da região delaminada (região onde ocorre a maior diferença de tempo de chegada da onda na primeira varredura) e, a partir do transmissor, o receptor varre em linha paralelamente a direção X, conforme mostra a figura 2.16. Foram realizadas medições da amplitude para cada passo de 10 mm do receptor. Quando a amplitude do conteúdo inicial (pacote) mais adiantado da onda que chega do receptor varia bruscamente, ocorre a detecção da posição da delaminação ^[42]. O tempo de chegada da onda transmitida no receptor foi determinado pelo primeiro pico do pacote de onda inicial, como ilustra a figura 2.17.

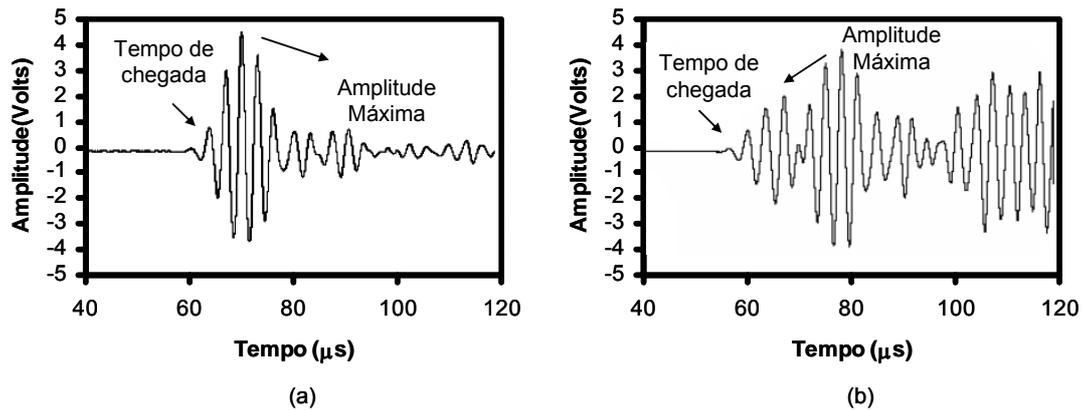


Figura 2.17 – A-scan do sinal da onda detectada pelo receptor a 210 mm a partir do transmissor: (a) no corpo de prova sem defeito; (b) na posição $Y = 100,5$ mm no corpo de prova com defeito ^[39].

A possibilidade de utilizar ondas de Lamb em avaliações não-destrutivas a longa distância em compósitos laminados foi investigada por GUO e CAWLEY ^[44] que descreveram sobre a interação do modo de propagação das ondas de Lamb S_0 com delaminações. Nesta pesquisa, corpos de prova de compósito laminado de fibra de carbono/epóxi *cross-ply* foram confeccionados com as seguintes dimensões: 290 mm x 90 mm x 1 mm. Foram investigados corpos de prova sem defeito e com delaminação de 20 mm de comprimento localizada entre as camadas do laminado e produzida por carregamento flexural. A pesquisa foi realizada com base na montagem experimental ilustrada pela figura 2.18, considerando três estratégias de ensaios:

- Por transmissão do modo de propagação S_0 ;
- Por conversão do modo de propagação S_0 para A_0 ;
- Por reflexão do modo de propagação S_0 .

Em todos os experimentos o modo de propagação S_0 foi excitado numa faixa de frequência-espessura não-dispersiva abaixo de 1 MHz.mm (ver figura 2.19), com diferentes configurações na recepção do sinal.

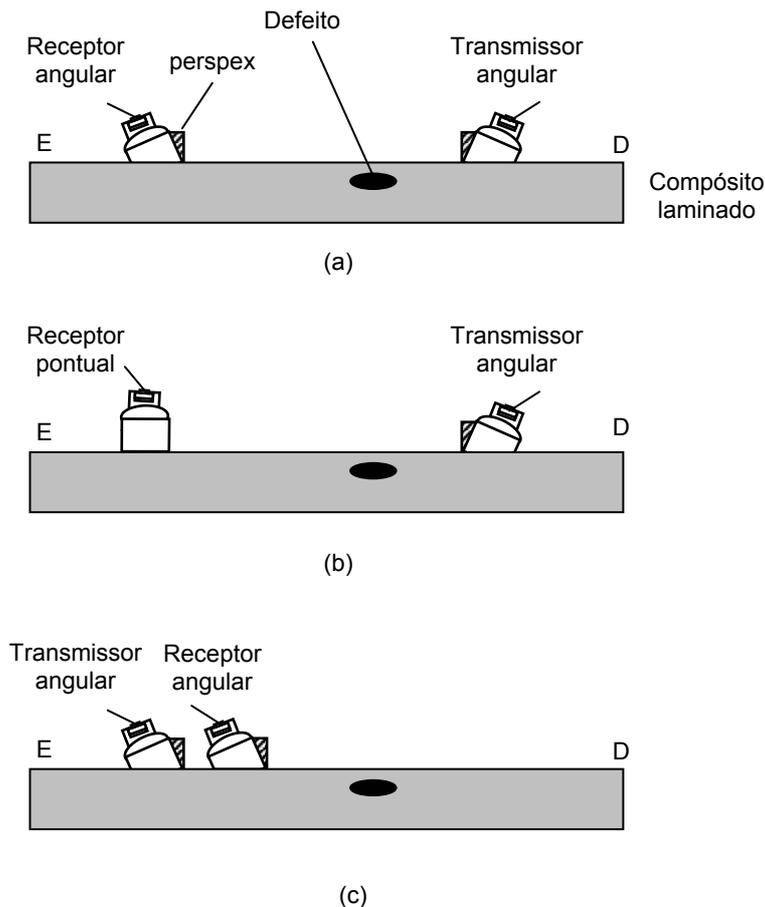


Figura 2.18 – Esquema experimental com as configurações transmissão-recepção utilizadas nas medições das ondas de Lamb: (a) transmissão do modo de propagação S_0 ; (b) conversão do modo de propagação S_0 ; (c) reflexão do modo de propagação S_0 . **E** é a borda esquerda da placa e **D** a borda direita^[44].

Para a geração de ângulos específicos de incidência do feixe sônico foi utilizada uma sapata de perspex de ângulo variável (ver figura 2.6) e transdutores de frequência central de 4 MHz com resposta em satisfatória em 0.5 MHz. A excitação do sinal aplicada ao transdutor foi de 10 ciclos por *tone-burst* formatado por janelamento Gaussiano através de gerador de função. De acordo com a curva de dispersão mostrada pela figura 2.19, o ângulo de incidência do feixe necessário à geração do modo de propagação S_0 na faixa de frequência mencionada é 26° .

Com a configuração de ensaio ilustrada na figura 2.18(a), foram feitas medições para o modo de propagação S_0 transmitido usando o mesmo sistema sapata angular de perspex/transdutor como sensor de recepção, posicionado de forma que a delaminação estivesse localizada entre os transdutores. No experimento representado pela figura 2.18(b), a sapata de perspex não pôde ser utilizada na detecção do modo

de propagação A_0 devido ao fato de que a velocidade de fase deste modo é menor que a velocidade de fase do modo de propagação A_0 no perspex. Por isso, como mostra a figura 2.18(b), foi utilizado um receptor pontual para detectar ambos os modos de propagação A_0 e S_0 . Em relação às medições do modo de propagação S_0 refletido, realizadas de acordo com o esquema experimental ilustrado pela figura 2.18(c), o sistema sapata angular/transdutor receptor foi posicionado próximo ao transdutor- transmissor.

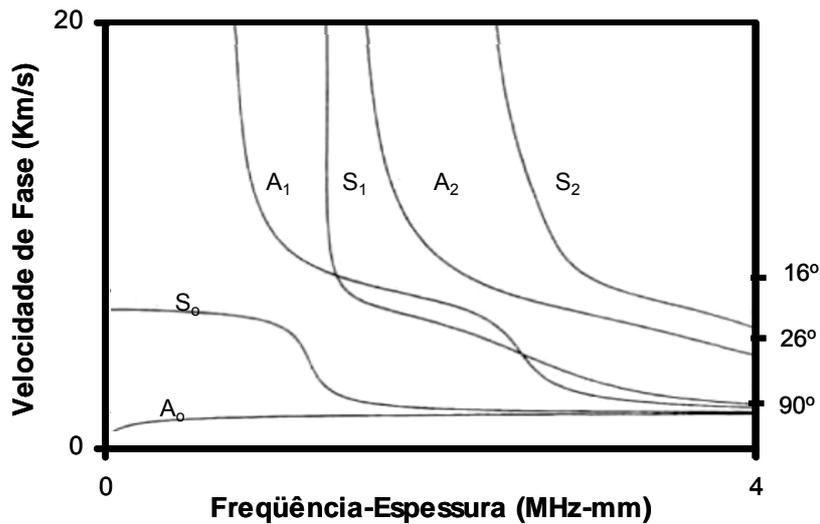
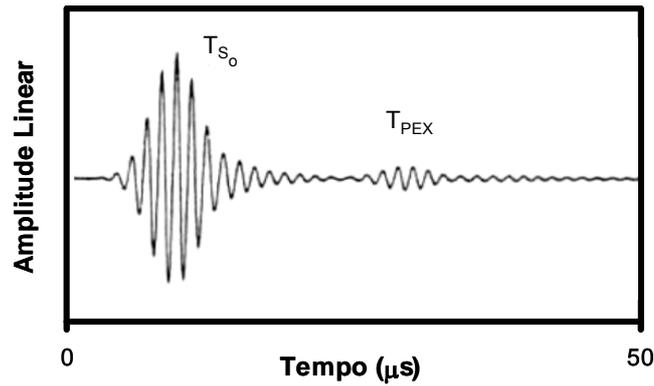
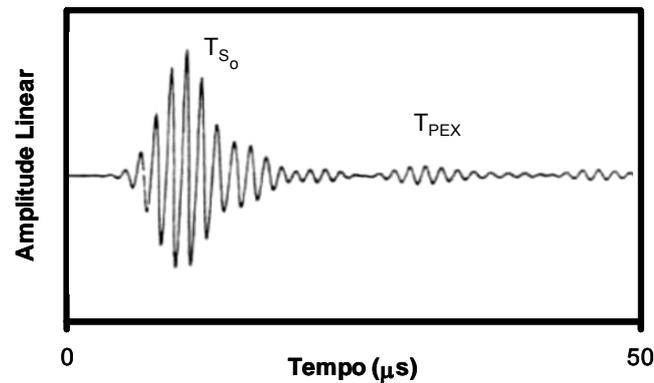


Figura 2.19 – Curva de dispersão para compósito laminado de fibra de carbono/epóxi *cross-ply* $[(0,90)_2]_s$ com os ângulos de incidência indicados a direita da figura ^[44].

A figura 2.20 mostra os resultados obtidos para as medições da resposta do sinal no tempo, para o modo de propagação S_0 transmitido. A figura 2.20(a) ilustra o A-scan para o corpo de prova sem defeito. Somente o modo de propagação S_0 transmitido, identificado na figura como T_{S_0} , propagou no laminado. O sinal de pequena amplitude, T_{pex} que aparece após T_{S_0} , foi identificado como a onda reverberada no interior da sapata. A figura 2.20(b) ilustra o A-scan do corpo de prova com delaminação e, pode ser observado, que houve apenas uma pequena variação na amplitude do sinal do modo de propagação S_0 transmitido, utilizando sapata angular. Por conclusão seria difícil utilizar esta técnica como um método de detecção ^[44].



(a)



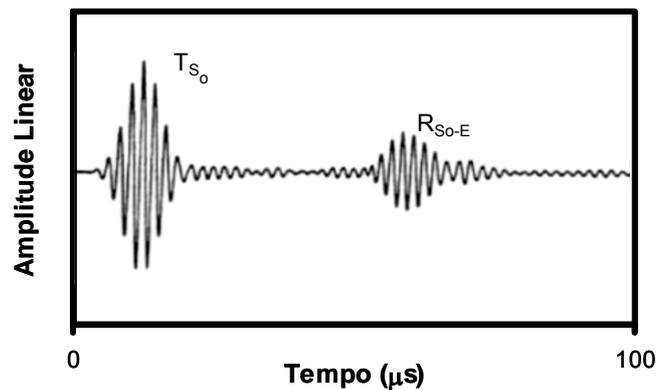
(b)

Figura 2.20 – A-scans obtidos por medições do modo de propagação S_0 transmitido em corpos de prova de compósito laminado *cross-ply* de fibra de carbono utilizando a configuração de ensaio transmissão-recepção com sapata angular: (a) corpo de prova sem defeito; (b) corpo de prova com delaminação de 20 mm de comprimento ^[44].

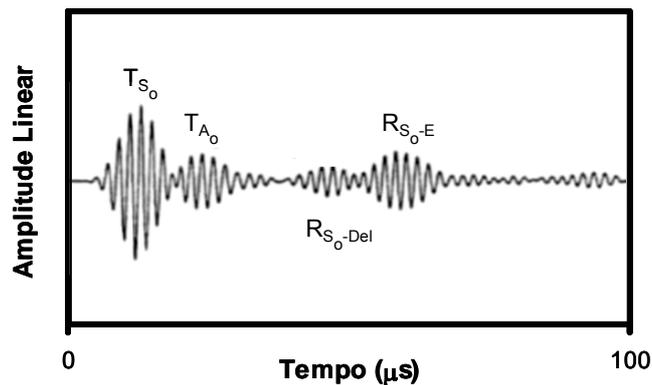
Os resultados obtidos a partir de medições da conversão do modo de propagação S_0 em A_0 são mostrados através dos A-scans presentes na figura 2.21. Em função do receptor pontual foi utilizado para detectar conjuntamente os modos de propagação A_0 e S_0 e este sensor é igualmente sensível para ondas que propagam nos sentidos positivo e negativo de uma mesma direção. Com isso, a forma de onda do sinal de recepção foi mais complexa do que a dos A-scans da figura 2.20.

A figura 2.21(a) mostra o sinal de recepção, entre 0 e 100 μs , para o corpo de prova sem defeito. Além do eco referente ao modo de propagação transmitido, legendado por T_{S_0} , aparece um segundo eco, legendado na figura por R_{S_0-E} , que corresponde à reflexão da borda esquerda no laminado sem defeito a qual propaga em sentido oposto ao modo de propagação incidente S_0 . A figura 2.21(b) ilustra o A-scan do sinal captado no corpo de prova com delaminação. Neste caso o modo de propagação

transmitido S_0 é seguido pelo modo de propagação A_0 , legendado na figura por T_{A_0} que é gerado por conversão de modo quando o modo de propagação S_0 transmitido interage com a delaminação. O modo de propagação legendado por $R_{S_0\text{del-D}}$ que aparece nas medições do corpo de prova com defeito, corresponde ao modo de propagação S_0 transmitido refletido na delaminação e refletido novamente na borda à direita do laminado.



(a)

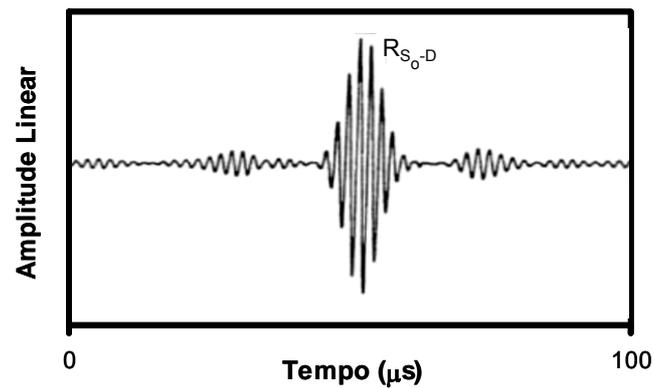


(b)

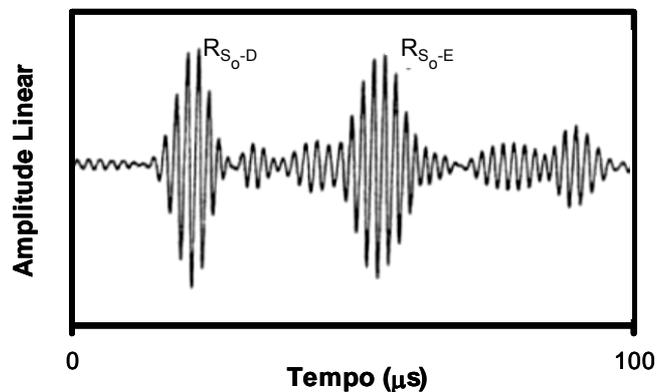
Figura 2.21 – A-scans mostrando a conversão do modo de propagação S_0 em modo de propagação A_0 utilizando o esquema experimental da figura 2.18(b) nos laminados *cross ply* de fibra de carbono: (a) corpo de prova sem defeito; (b) corpo de prova com delaminação de 20 mm de comprimento ^[44].

Analisando agora os A-scans da figura 2.22, obtidos utilizando o esquema experimental da figura 2.18(c) para medições dos modos de propagação S_0 refletidos, diferenças significativas são observadas entre os laminados com e sem defeito. No sinal da figura 2.22(a), aparece o eco correspondente a reflexão do modo de propagação S_0 transmitido que reflete na borda direita do laminado sem defeito, legendado por R_{S_0-D} . Sinais de baixa amplitude são visualizado antes e após R_{S_0-D} e são devidos à captação direta do modo de propagação S_0 transmitido pelo transdutor-

transmissor e a reverberação no interior da sapata de perspex respectivamente. As amplitudes são baixas devido ao transdutor-receptor estar orientado para detectar sinais provenientes da propagação de ondas a partir da direita para a esquerda do corpo de prova. Para o laminado com defeito, figura 2.22 (b), em adição ao sinal do corpo de prova sem defeito há um eco de amplitude elevada que chega antes de R_{S_0-D} . Esta reflexão foi identificada como ocorrendo na borda da delaminação sendo legendada por R_{S_0-del} .



(a)



(b)

Figura 2.22 – A-scan das medições dos modos de propagação S_0 refletidos utilizando o esquema experimental ilustrado na figura 2.18(c) para varreduras em corpos de prova de laminado *cross-ply* de fibra de carbono: (a) corpo de prova sem defeito; (b) corpo de prova com delaminação de 20 mm de comprimento ^[44].

Com os resultados mostrados através das figuras 2.20, 2.21 e 2.22, os autores concluíram que o modo de propagação das ondas de Lamb S_0 na configuração transmissão-recepção não é adequado a detecção por ensaios a longa distância, uma vez que não houve mudanças quantitativas na resposta do sinal no tempo. A detecção

do modo de propagação A_0 por conversão de modo pode ser utilizada. Entretanto, é limitada a uma pequena faixa de inspeção uma vez que a velocidade do modo de propagação A_0 é muito menor do que a velocidade do modo de propagação S_0 . A configuração esquematizada na figura 2.18(c) mostrou ser a técnica mais aceitável da pesquisa e, portanto pode ser promissora na inspeção de materiais compósitos laminados, pois uma reflexão extra, indica a presença do defeito ^[44].

2.3.3.1 - APLICAÇÕES DAS ONDAS DE LAMB EM COMPÓSITOS LAMINADOS FIBRA-METAL

No item 2.3 foram citados alguns exemplos de aplicações das ondas de Lamb na detecção de defeitos em chapas metálicas e compósitos laminados. É de conhecimento geral que os modos de propagação das ondas de Lamb em materiais compósitos dependem das propriedades elásticas do laminado, espessura da placa, orientação das fibras, disposição das camadas, e da presença de descontinuidades internas ^[31]. Embora áreas específicas de aplicação sejam encontradas para materiais compósitos tradicionais, há pouca informação disponível sobre a utilização destas ondas, com a finalidade de detecção de danos, em materiais compósitos laminados fibra-metal.

DEMCENKO *et al.* ^[8] investigaram a precisão das medidas da velocidade de fase do modo de propagação da onda de Lamb A_0 em material compósito laminado fibra-metal GLARE[®] usando transdutores ultra-sônicos de 500 kHz com acoplamento a ar. Um laminado GLARE[®] 3/2 de 1,65 mm de espessura foi utilizado como corpo de prova na investigação. O LFM consiste de três camadas de liga de alumínio com 0.3 mm de espessura intercaladas com duas camadas de prepreg de 0.25 mm de espessura. Cada camada do prepreg consiste de duas camadas de prepregs de fibra de vidro/epoxi perpendiculares entre si. A configuração do compósito é mostrada na figura 2.23.

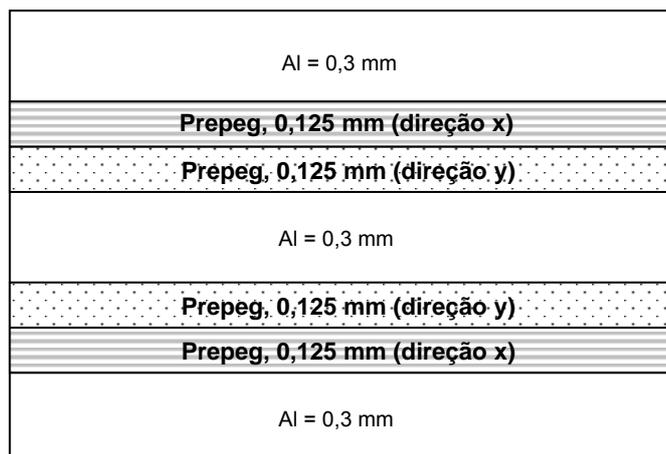


Figura 2.23 - Configuração do compósito GLARE[®] 3/2 ^[8].

Em relação ao uso da técnica ultra-sônica de acoplamento a ar, apesar da diferença de impedâncias acústicas entre transdutor/ar e corpo de prova/ar impor perdas significativas de energia transmitida para o LFM e além disso, a atenuação das ondas ultra-sônicas ser elevada no ar em altas frequências (>500 kHz), nestas frequências são gerados os modos de propagação das ondas de Lamb de ordem superiores. Medições utilizando esta técnica podem se tornar mais eficazes quando realizadas com os modos de propagação fundamentais S_0 e A_0 , utilizando transdutor de baixa frequência. Outro motivo para que o modo de propagação A_0 seja gerado em baixas frequências está no fato do sinal ser mais limpo, não estando sobreposto com os outros modos, tornando a interpretação dos resultados menos complexa ^[8].

Para a determinação do ângulo específico de excitação, diversas medições dos sinais em configuração transmissão-recepção foram realizadas usando diferentes ângulos de incidência. A Figura 2.24 ilustra o esquema experimental. O corpo de prova situa-se entre dois transdutores, podendo girar variando o ângulo de incidência θ_i . A amplitude pico-a-pico do sinal captado pelo transdutor-receptor foi medida para cada ângulo. O ângulo ótimo para a geração da onda foi o que forneceu amplitude máxima.

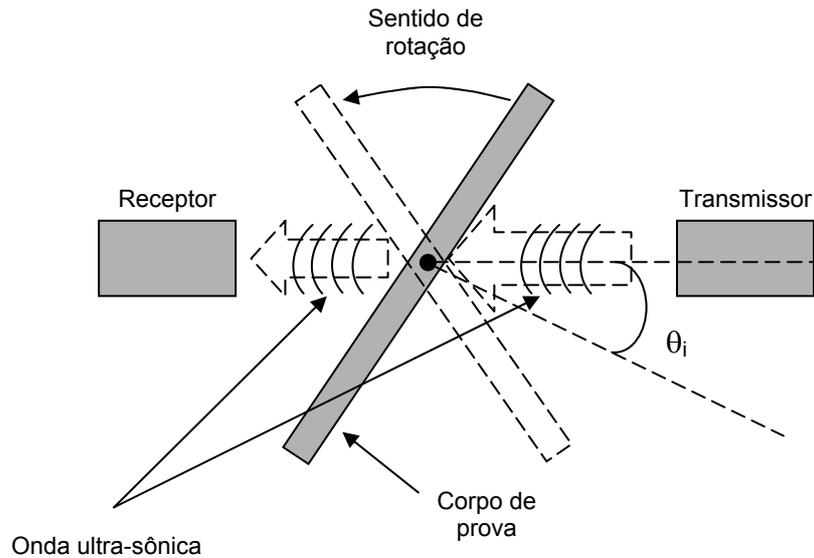


Figura 2.24 – Esquema experimental para a determinação do ângulo ótimo de excitação da onda de Lamb, θ_i é o ângulo de incidência da onda ^[8].

Na investigação esta suposição quanto ao ângulo ótimo foi válida, considerando a relação $\rho_a / \rho_p \ll 1$ [23], onde ρ_a é a densidade do ar e ρ_p é a densidade do corpo de prova. Este ângulo “ótimo” deve satisfazer à lei de Snell ^[8]:

$$c = \frac{c_{ar}}{\text{sen}\theta_k}, \quad (2.4)$$

onde, c é a velocidade da onda de Lamb excitada, c_{ar} é a velocidade do som no ar e θ_k é o ângulo médio para a geração da onda de Lamb.

A figura 2.25 mostra a amplitude do sinal em função do ângulo de rotação na placa. Os ângulos de $\theta_1 = -12.461^\circ$ e $\theta_2 = 12.467^\circ$ foram selecionados por fornecerem as maiores amplitudes pico a pico.

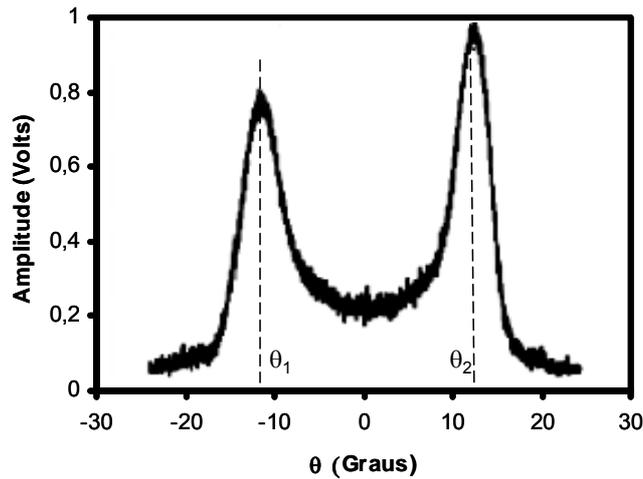


Figura 2.25 – Dependência angular da amplitude do sinal transmitido através do laminado. θ_1 e θ_2 são os ângulos ótimos para geração do modo de propagação A_0 [8].

O ângulo médio de excitação foi obtido por

$$\theta_k = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2}. \quad (2.5)$$

Os autores propõem ainda um esquema experimental para a determinação da velocidade da onda de Lamb baseada na técnica da medida do tempo de percurso, figura 2.26.

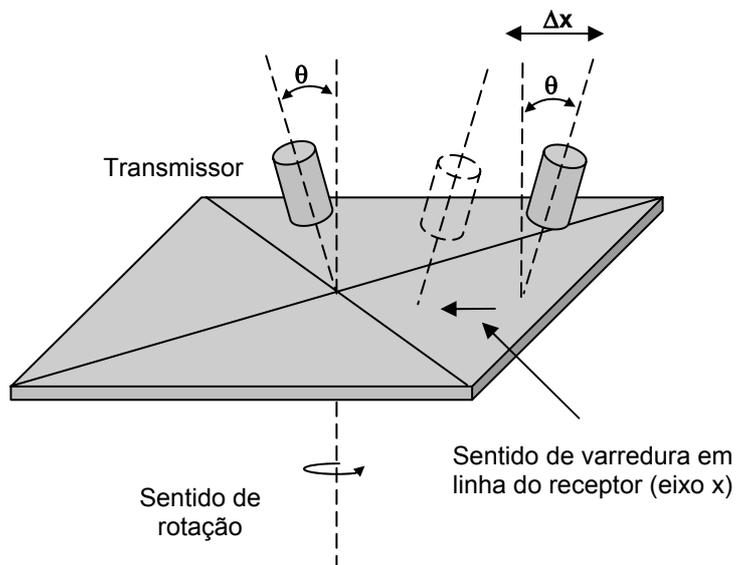


Figura 2.26 – Esquema experimental para medidas do tempo de percurso da onda de Lamb [8].

A idéia principal da técnica se baseia no tempo de percurso da onda de Lamb medido para posições diferentes do transdutor-receptor. Assim, se a distância Δx for conhecida, a velocidade da onda de Lamb pode ser determinada através da equação 2.6.

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad , \quad (2.6)$$

onde, $\Delta x = x_1 - x_2$, e x_1 e x_2 as posições em que os sinais foram coletados e, $\Delta t = t_1 - t_2$, sendo, t_1, t_2 os tempos de propagação da onda de Lamb medidos para o receptor nas posições x_1, x_2 .

Segundo os autores, a velocidade de fase da onda de Lamb pode ser calculada pela equação 2.6, medindo-se o tempo de percurso como o instante correspondente ao ponto de máxima amplitude da onda. A aplicação do método é válida quando as formas dos sinais são similares. Em outros casos as medidas estarão incorretas, isto é, o valor da velocidade estimada estará entre a velocidade de fase e a velocidade do grupo [8].

Considerando o valor médio θ_k do ângulo crítico e utilizando a equação 2.4 foi encontrado o valor da velocidade de 1588,7m/s, para a velocidade do modo A_0 , enquanto que o valor experimental médio foi de 1603,8m/s, utilizando a equação 2.6. Os autores concluíram que houve uma boa correlação entre os resultados.

CHIU *et al.* [7] desenvolveram um método para a detecção de delaminação em corpos de prova de GLARE®, numa configuração transmissão-recepção utilizando sapatas de perspex em ensaios por contato. A dependência da velocidade de grupo com o produto frequência.espessura foi utilizada para prever a variação desta velocidade com o aumento da área delaminada. Para os modos de propagação fundamentais de Lamb, os autores consideraram a hipótese de que a velocidade de grupo aumenta proporcionalmente com aumento no tamanho da delaminação. Entretanto, há outros fatores que foram considerados nesta hipótese. Um deles considera a velocidade como dependente da rigidez, ou do módulo de Young [7].

Entre dois corpos de prova com rigidez diferentes, a onda de Lamb propaga mais lentamente naquele de menor rigidez. Isto é verificado através de comparação entre as curvas de dispersão mostradas na figura 2.27, geradas pelo software Disperse[®] [45]. Na figura 2.27(a), curva de dispersão do GLARE[®] por ensaio de contato, a presença das fibras de vidro causa diminuição da velocidade de grupo das ondas de Lamb em comparação às velocidades de grupo para chapa de alumínio de espessura 1,5 mm, figura 2.27(b).

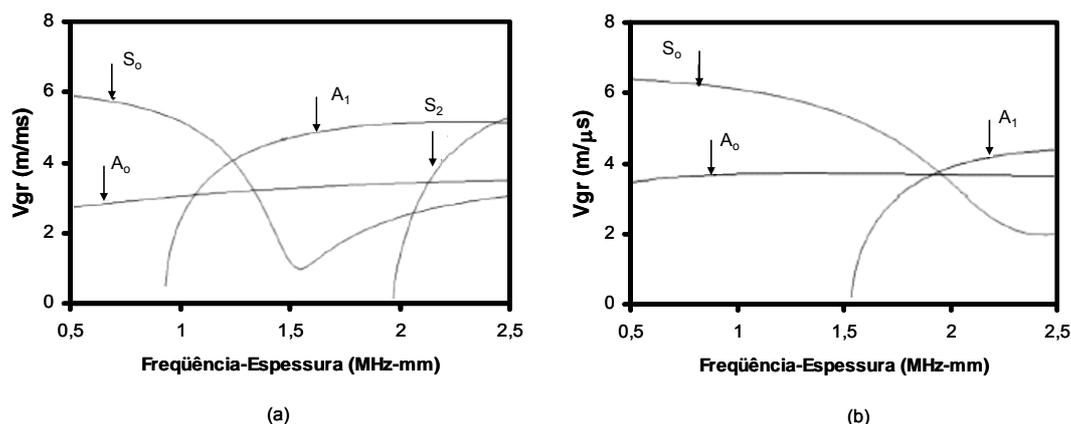


Figura 2.27 – Curva de dispersão por ensaio de contato, calculadas pelo software Disperse[®]: (a) para corpo de prova de GLARE[®] com fração volumétrica das fibras de vidro igual a 0.11; (b) para placa de alumínio com 1,5 mm de espessura [45].

CHIU *et al.* [7] utilizaram corpos de prova com dimensões 400 mm x 20 mm x 3,90 mm (corpo de prova A) e 400 mm x 20 mm x 3,83 mm (corpo de prova B). As delaminações foram simuladas por remoção de material no LFM. Foi possível excitar um único modo de propagação numa frequência preferencial através do uso de *tone burst* de onda senoidal de 10 ciclos janelada por função Hanning. Para assegurar que a energia acústica máxima estivesse sendo transmitida através do corpo de prova e assim, a maior área possível ou a mais longa distância estivesse sendo inspecionada, o componente de frequência de maior energia presente no corpo de prova, dadas as condições de contorno, foi selecionado como a frequência de excitação. Esta frequência foi determinada aplicando a FFT ao sinal da onda incidente, tendo o valor de 0,238 MHz (para o corpo de prova A) e 0,230 MHz (para o corpo de prova B).

A velocidade de grupo foi determinada medindo-se o tempo de propagação do pulso de onda entre o transmissor e o receptor. As medidas de velocidades de grupo normalizadas em relação à velocidade da onda no alumínio, para os corpo de provas correspondentes estão traçadas na figura 2.28. Por hipótese prévia, a velocidade de

grupo da onda de Lamb que propaga transversalmente a delaminação aumenta com o aumento da área delaminada. Nos resultados experimentais mostrados na figura 2.28, pode-se observar que a velocidade do modo de propagação S_0 aumenta de forma assintótica de 4580.32 m/s para o valor de 5326.78 m/s, para o corpo de prova A, por exemplo. Entretanto, esta velocidade não será alcançada porque há fibras de vidro unidirecionais e resina epóxi presente no corpo de prova de GLARE[®] delaminado.

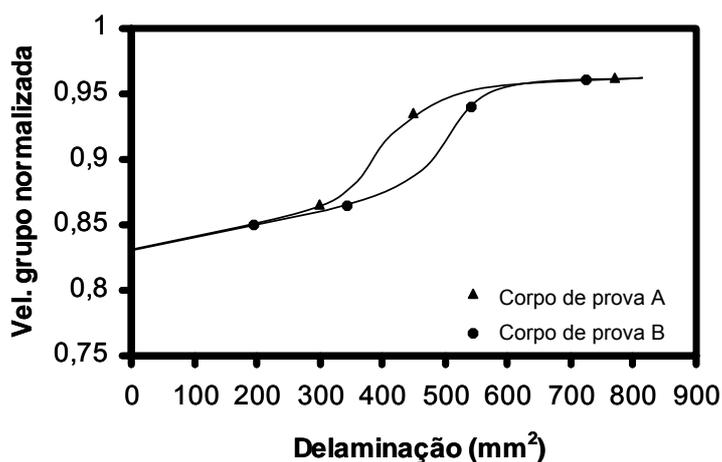


Figura 2.28 – Resultados experimentais mostrando o aumento na velocidade de grupo do modo de propagação S_0 com o aumento da área delaminada [7].

Como limitações ao método proposto, o valor para a velocidade foi afetado pela profundidade da delaminação. Isto foi demonstrado experimentalmente de acordo com o esquema da figura 2.29, onde dois casos foram considerados: no primeiro deles, a profundidade da delaminação é menor e no segundo caso, o par transmissor/receptor estando posicionado do outro lado do LFM, ou seja, mais afastado da delaminação. No primeiro caso a velocidade de grupo foi maior do que no segundo caso, onde a delaminação é mais profunda. Isto ocorre, segundo os autores, porque a camada de fibra de vidro que reforça a matriz de resina presente entre a delaminação e a faixa superior de alumínio promoveu uma velocidade de grupo na matriz menor do que quando as ondas de Lamb estavam propagando através do alumínio puro [7].

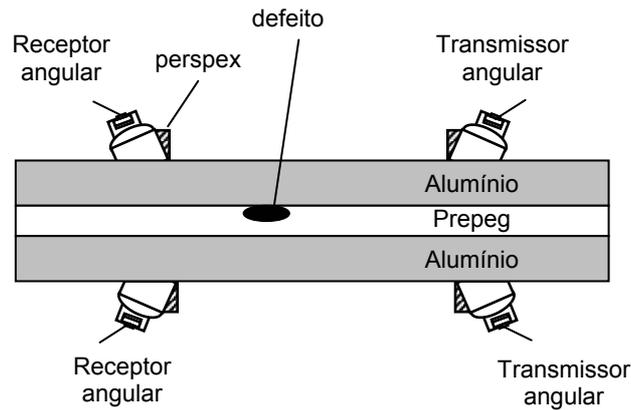


Figura 2.29 – Posicionamento dos transdutores em relação à profundidade da delaminação.

2.3.4 - GERAÇÃO DE ONDAS DE LAMB A PARTIR DO LASER

Em 1987, DEWHURST *et al* ^[46] demonstraram que o laser pulsado pode ser usado para gerar modos de propagação simétricos e assimétricos de Lamb. Os autores utilizaram chapas de alumínio de diferentes espessuras. A fonte de laser foi usada com pulso de 20 ns de duração e energia de 7 mJ com focalização em linha, para prover irradiação ultra-sônica direcionada dentro do regime termo-elástico não-destrutivo. Utilizaram um interferômetro como receptor de banda larga. Concentraram seus estudos em placas finas, de espessura h , variando de 27 a 425 μm . Para placas muito finas, com comprimentos de onda típicos $\lambda \gg 2h$, a velocidade dos modos de propagação simétricos tende para uma velocidade C_{chapa} , dada por:

$$C_{chapa} = \left[4 \left(\frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} \right) \frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}, \quad (2.7)$$

onde λ e μ são constantes de Lamé e ρ é a densidade. A velocidade de fase para o modo de propagação assimétrico pode ser escrita como:

$$C_{Fase}^2 = \frac{\omega t}{2\sqrt{3}} C_{chapa}, \quad (2.8)$$

onde ω é a frequência angular. A velocidade de grupo para o modo de propagação assimétrico pode ser escrita a partir da equação 2.7 como:

$$C_{Grupo}^2 = (4\pi f h / \sqrt{3}) C_{chapa}, \quad (2.9)$$

onde $f = \omega / 2\pi$.

A figura 2.30 mostra sinais de ondas obtidas em chapas com diferentes espessuras. Na figura 2.30(a) a onda foi gerada numa chapa de alumínio com 425 μm de espessura. Observa-se clara dispersão no modo de propagação assimétrico de maior amplitude, como também no modo de propagação simétrico, de menor amplitude. No caso da chapa de alumínio com 80 μm de espessura, a figura 2.30(b) mostra que o modo simétrico apresenta um pulso de curta duração, enquanto o modo assimétrico apresenta características dispersivas, com os componentes de frequência mais elevadas chegando antes dos componentes de frequências mais baixas.

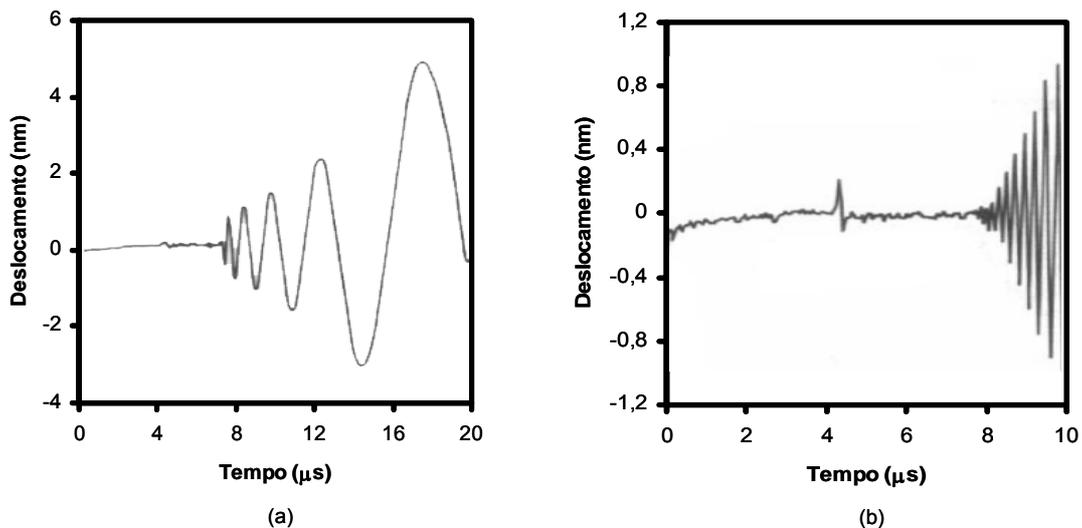


Figura 2.30 – Ondas de Lamb geradas por laser pulsado (regime termoelástico) e detectado por interferômetro a 24 mm da fonte de laser em chapas de alumínio de diferentes espessuras; (a) chapa de alumínio com 425 μm ; (b) chapa de alumínio com 80 μm ^[46].

Sendo a velocidade da onda, C_{chapa} , conhecida, a espessura h foi calculada a partir das medidas da velocidade de grupo em função da frequência para o modo de propagação A_0 utilizando a equação 2.9. O resultado foi bom para amostras muito finas, onde a aproximação $\lambda \gg 2h$ foi verificada, o que não ocorreu para chapas mais espessas.

A geração e detecção de ondas de Lamb por laser também foram investigadas por Wooh *et al.* [27] em chapas de alumínio, onde as curvas de dispersão para os modos das ondas propagadas foram obtidas por simulação e experimentalmente. Os pesquisadores utilizaram uma fonte de laser de elevada densidade de potência a fim de criar forças de reação (tração normal) na superfície do corpo de prova. Os deslocamentos fora do plano foram medidos por um interferômetro. As curvas de dispersão (em termos do número de onda em função da frequência) foram obtidas experimentalmente fazendo a FFT -2D dos sinais adquiridos em posições diferentes. Os resultados da simulação foram comparados com os experimentais e foi verificada a concordância entre eles exceto a existência de ruído na imagem experimental obtida via FFT-2D, figura 2.31 [27].

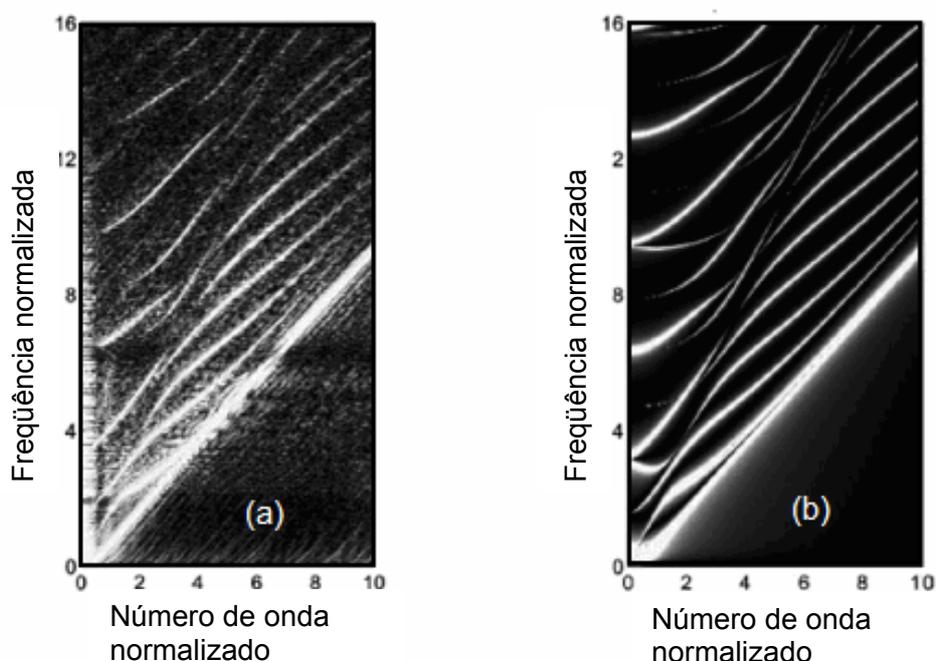


Figura 2.31 – Comparação de curvas de dispersão obtidas via FFT-2D para chapa de alumínio de espessura 3,2 mm: (a) experimental; (b) simulação [27].

PIERCE *et al.* [47] utilizaram a técnica óptica de não-contato a laser tanto na geração quanto na recepção das ondas de Lamb em chapas de alumínio, materiais compósitos de fibra de carbono, de fibra de vidro e materiais compósitos híbridos. Foi utilizada uma fonte de laser de alta densidade de potência para gerar o espectro das ondas de Lamb nos materiais, e um interferômetro para monitorar os deslocamentos fora do plano associados com os modos propagados. Na pesquisa foi investigada inicialmente a dispersão da onda de Lamb em uma chapa de alumínio com dimensões 445 mm x

280 mm x 1.5 mm, a fim de estabelecer uma associação correta do sistema com o processamento do sinal obtido via FFT-2D. O detector de fibra óptica acoplado ao interferômetro foi posicionado a 80 mm da borda da chapa. O foco do feixe emitido pela fonte de laser com um pulso de energia ~ 300 mJ e largura ~ 5 ns, com comprimento de onda de 1.064 μm , estava inicialmente a 76 mm do ponto de detecção. A seguir, o foco do feixe da fonte de laser realizou uma varredura num passo de 1 mm até atingir uma distância em linha de 127 mm do detector, como mostra a figura 2.32. Os sinais das ondas detectadas foram arranjados numa matriz de dados no tempo e posição e a aplicação eficiente da FFT-2D resultou, como visto anteriormente, numa curva de dispersão nas dimensões do número de onda e frequência.

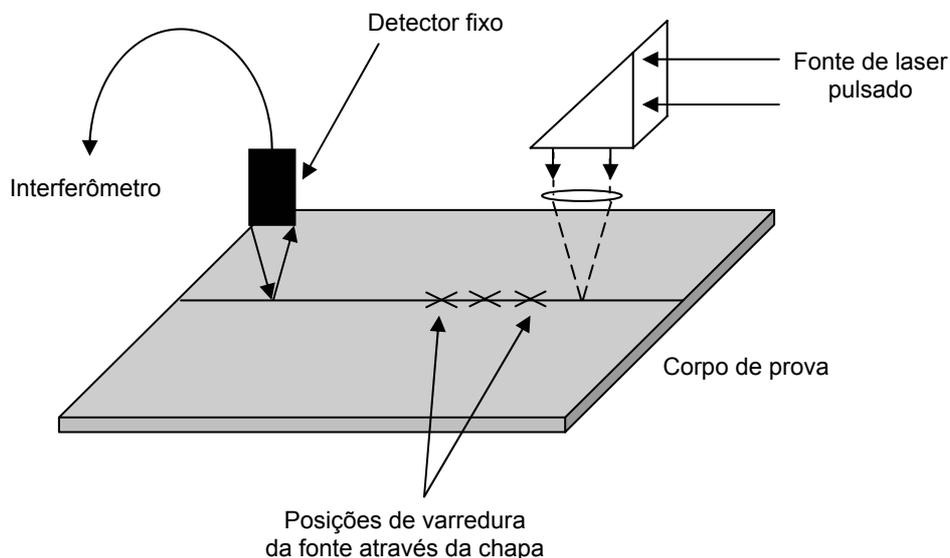


Figura 2.32 – Esquema experimental para geração e detecção de ondas de Lamb utilizando laser ^[47].

A figura 2.33 ilustra a curva de dispersão para o alumínio traçada com os modos de propagação obtidos experimentalmente sobre as curvas teóricas, mostrando a correlação entre os valores. Como pode ser visto, os modos de propagação A_0 , A_1 , A_3 , S_0 e S_2 , foram gerados e estão de acordo com valores teóricos correspondentes. Não foram visualizados os modos de propagação A_2 e S_1 . Segundo os autores isso foi devido à pobre eficiência alcançada nesta faixa de frequência-número de onda. O modo de propagação experimental S_3 parece estar à esquerda da curva do modo de propagação teórico correspondente.

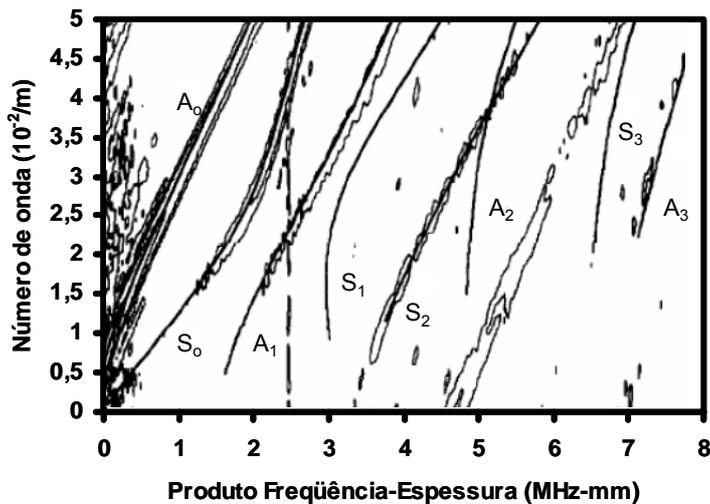


Figura 2.33 – Curva de dispersão teórica e experimental, número de onda em função da freqüência, para chapa de alumínio de 1,5 mm ^[47].

A curva de dispersão das velocidades de fase correspondentes é mostrada na figura 2.34. As linhas sólidas e tracejadas são os valores teóricos para os modos de propagação simétricos e assimétricos respectivamente. Os círculos mostrados são os valores experimentais obtidos, e uma boa correlação entre a teoria e prática foi verificada, exceto para o modo de propagação S₃.

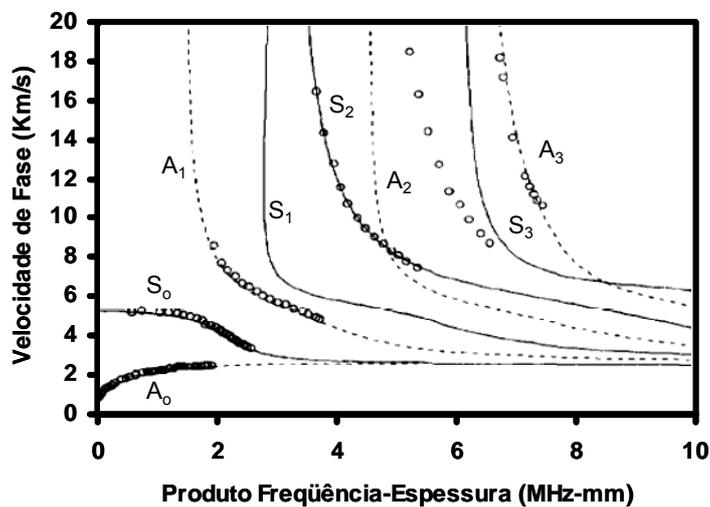


Figura 2.34 – Curva de dispersão – velocidade de fase em função da freqüência, teórica e experimental das ondas de Lamb para o alumínio ^[47].

A aplicação da técnica anteriormente descrita se estendeu para medições da propagação de multimodos de Lamb em compósitos reforçados por fibras de carbono e fibras de vidro. A figura 2.35 mostra a curva de dispersão dos números de onda em função das freqüências para o compósito de fibra de carbono com empilhamento

[(0/90) (+45/-45) (90/0) (-45/+45) (0/90) (0/90)]_s, e dimensões 355 x 380 x 3 mm, traçada com os modos de propagação obtidos experimentalmente sobre as curvas teóricas, mostrando a correlação entre os valores. As linhas sólidas correspondem aos valores teóricos. As envoltórias correspondem aos valores experimentais. Assim como para a chapa de alumínio, também foi verificada uma boa correlação entre os resultados para três modos distintos. O modo de propagação A_0 foi predominante, seguido do modo de propagação S_0 e do modo de propagação superior legendado por H_2 .

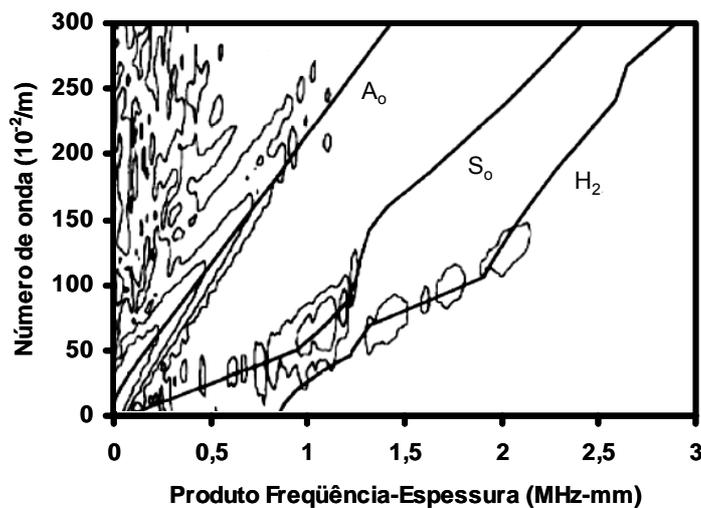


Figura 2.35 - Curvas de dispersão teóricas e experimentais, número de onda em função da frequência, para compósito de fibra de carbono ^[47].

A figura 2.36 ilustra a curva de dispersão das velocidades de fase em função da frequência para o compósito de fibra de carbono. Os círculos representam os valores experimentais e a linha sólida os valores teóricos. Para valores do produto frequência.espessura < 1MHz, a velocidade do modo de propagação S_0 foi ~ 6 km/s. Os autores ^[47] denominaram os modos de propagação mais elevados por H_1 e H_2 , não havendo distinção se seus movimentos eram simétricos e assimétricos. Isto porque o método de simulação utilizado pelos pesquisadores, não previa neste caso o caráter dos modos de propagação, dependendo estes da posição exata ao longo da curva da dispersão.

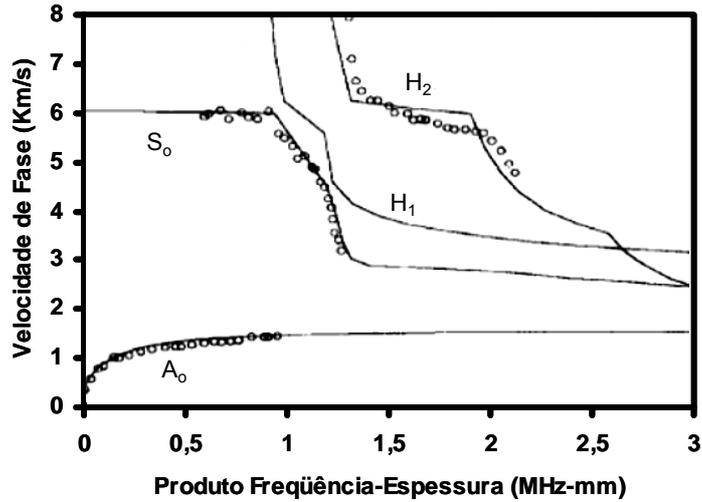


Figura 2.36 - Curva de dispersão – velocidade de fase em função da frequência, teórica e experimental das ondas de Lamb para compósito laminado de fibra de carbono ^[47].

2.3.4.1 – GERAÇÃO DE ONDAS DE LAMB COM TRANSDUTORES PIEZO-ELÉTRICOS E DETECTORES A LASER

CHANCELLIER *et al.* ^[48] realizaram estudo teórico e experimental sobre a interação das ondas de Lamb com a borda de uma placa de aço inoxidável de dimensões 300 mm x 150 mm x 2 mm. Os modos de propagação das ondas de Lamb A_1 e S_0 foram gerados usando transdutores piezo-elétricos e sapatas de perspex. A excitação do sinal aplicada ao transdutor-emissor foi de *tone-burst* com 20 ciclos. A figura 2.37 mostra o esquema experimental para a geração das ondas de Lamb ^[48].

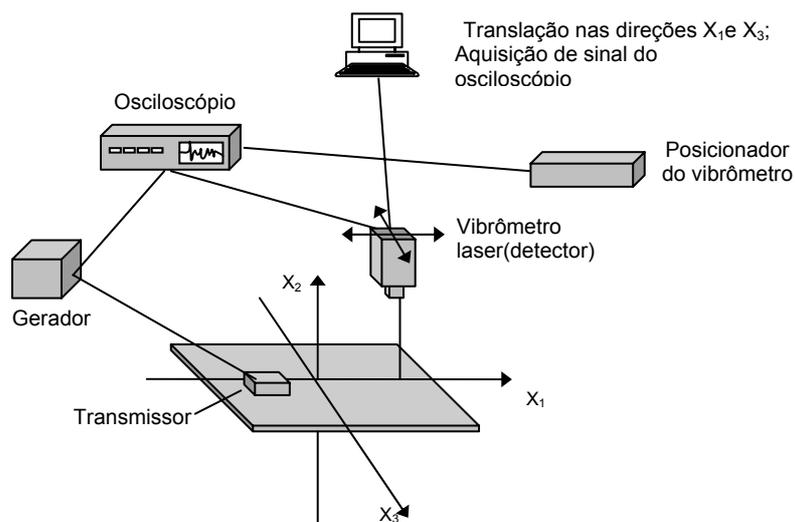


Figura 2.37 – Esquema experimental para a geração das ondas de Lamb utilizando transdutor-transmissor piezo-cerâmico com sapata angular e detecção por vibrômetro a laser ^[48].

Os deslocamentos normais à superfície da placa foram detectados e medidos por vibrômetro a laser ao longo do eixo do feixe ultra-sônico incidente. A evolução temporal dos deslocamentos na superfície da chapa pôde ser visualizada na imagem tempo-espacial $s(x_1, t)$ que corresponde ao modo de propagação incidente A_1 para um produto de frequência-espessura de 2.5 MHz.mm para chapa de aço inoxidável com um ângulo de incidência de 75°, a imagem tempo-espacial é ilustrada na figura 2.38 e, uma outra onda incidente de amplitude menor também pode ser observada. Esta segunda onda é devida a múltiplas reflexões no interior da sapata de perspex (onda parasita).

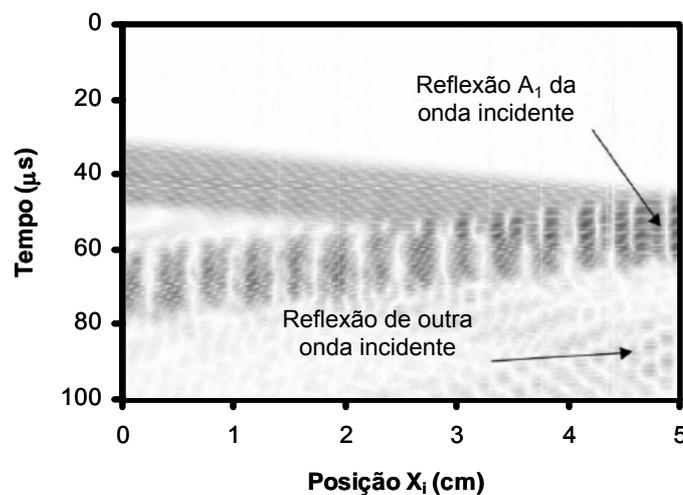


Figura 2.38 – Deslocamentos normais à placa: sinais, $s(x_1, t)$, obtidos em função do tempo e espaço com reflexão na borda da chapa ^[48].

Para identificar as ondas incidente e refletida parasitas, a FFT-2D foi realizada no sinal $s(x_1, t)$: $s(x_1, t)$, obtendo a transformada nas dimensões da frequência (FE) e do número de onda (K). As figuras 2.39(a) e 2.40(a) mostram as curvas de dispersão para os modos de propagação das ondas incidentes e refletidas obtidas via FFT-2D. Assim, por análise destas curvas, a onda parasita pôde ser reconhecida como o modo de propagação das ondas de Lamb S_0 . E, por meio da transformada inversa de Fourier foi identificada, como mostra as figuras 2.39(b) e 2.40(b) as evoluções espaço-temporal dos sinais para as ondas incidentes e ondas refletidas, respectivamente ^[48].

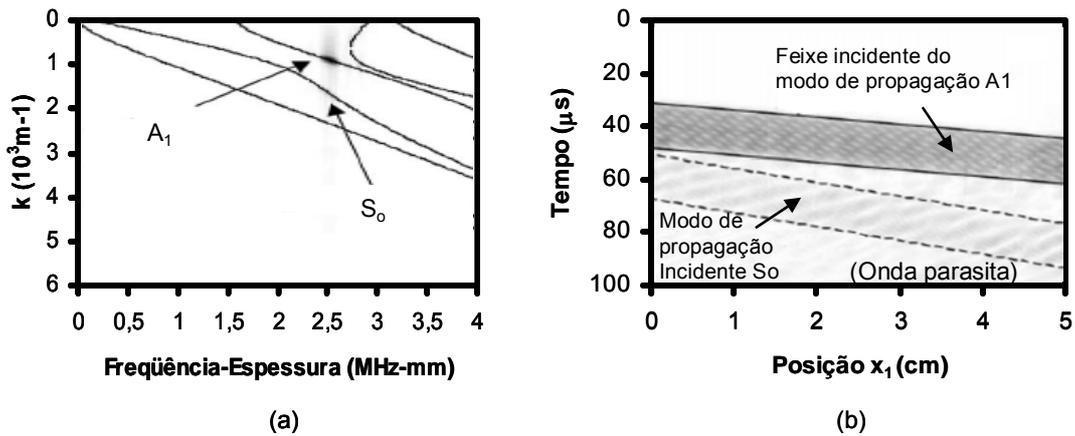


Figura 2.39 – Ondas incidentes: (a) no domínio freqüência e número de onda; (b) no domínio do tempo e espaço ^[48].

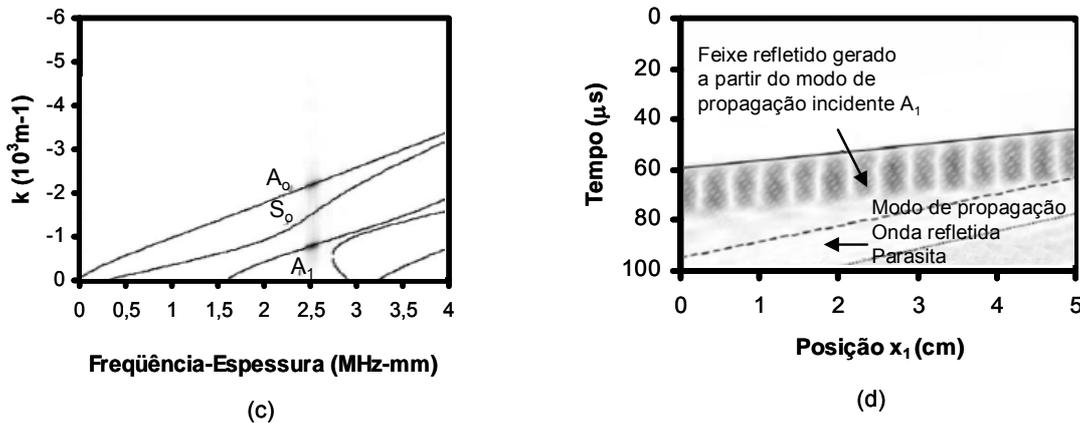


Figura 2.40 – Ondas refletidas: (a) no domínio freqüência e número de onda; (b) no domínio do tempo e espaço ^[48].

Os autores ^[48] puderam identificar os feixes incidentes e refletidos em função do valor da velocidade de cada modo propagado. Na figura 2.40(a), considerando um produto freqüência.espesura $FE=2.5$ MHz.mm, três modos de propagação das ondas de Lamb podem existir: A_1 , A_0 e S_0 . Por análise da figura 2.40(b), o feixe refletido é o sinal entre a onda mais rápida (modo de propagação A_1 , linha sólida) e a onda mais lenta (modo de propagação S_0 , linhas tracejadas). Então, os modos incidentes e refletidos indesejáveis podem ser eliminados por um janelamento espaço-temporal. Logo, as ondas incidentes e refletidas correspondentes ao modo de propagação A_1 podem ser isoladas e um novo sinal espaço-temporal $s'(x_1, t)$ é obtido, como mostra a figura 2.31 ^[48].

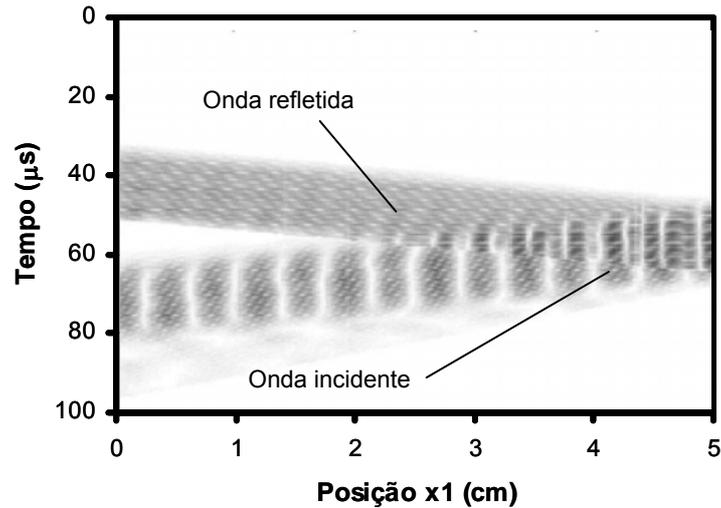


Figura 2.41 – Sinal janelamento espaço-temporal $s'(x_1, t)$ ^[48].

2.4 – ONDAS LEAKY LAMB

A propagação das ondas *leaky* Lamb é induzida quando um feixe ultra-sônico, num sistema com configuração transmissão-recepção incide sobre uma placa imersa num meio líquido. O fenômeno (como mostra a figura 2.42), está associado com a excitação ressonante das ondas guiadas de Lamb na placa. As ondas de Lamb perdem parte de sua energia para o líquido (meio circundante) para dar origem as ondas *leaky* Lamb as quais interferem com as ondas refletidas.

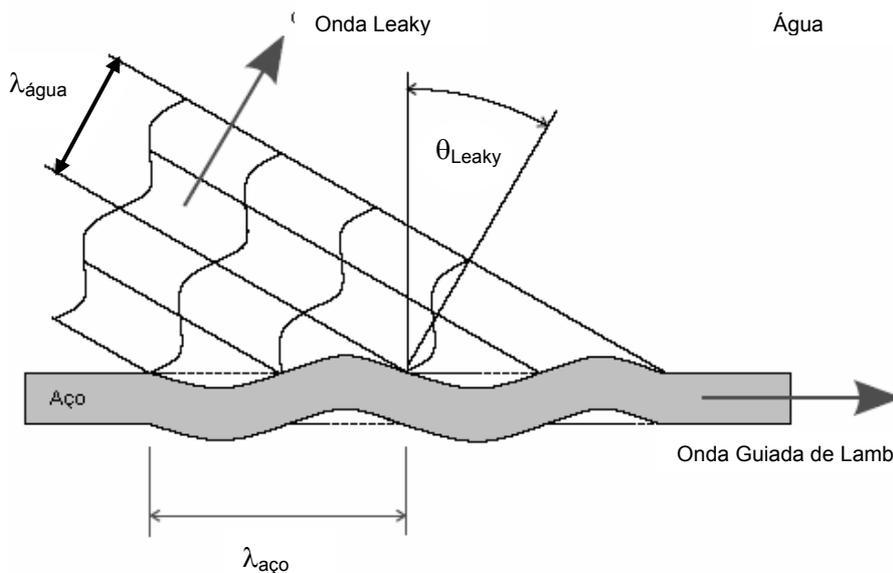


Figura 2.42 - Onda guiada de Lamb propagando através de uma placa de aço, criando uma onda *leaky* no meio fluido em um ângulo característico θ_{leaky} ^[23].

2.4.1 – APLICAÇÕES DAS ONDAS *LEAKY* LAMB EM MATERIAIS COMPÓSITOS

CHIMENTI *et al.* [31] utilizaram a técnica da propagação das ondas *leaky* Lamb para a avaliação não-destrutiva de compósitos laminados reforçados por fibras de carbono/epóxi, com empilhamento $[0^0]_{32}$, imersos em água em configuração transmissão-recepção, utilizando transdutores de 5 MHz e ângulo de incidência de 15° . Para impedir que pequenas variações espaciais na fração volumétrica de fibras ou na espessura da placa dificultassem a detecção de defeitos importantes, um processamento de sinal foi usado para analisar os sinais ultra-sônicos das reflexões na placa, além da utilização de frequência modulada por tone burst. No experimento, os sinais de recepção foram adquiridos em várias posições por varredura em linha espaçadas de 0,63 mm. Com esses dados foi gerado um C-scan das amplitudes dos sinais das ondas *leaky* Lamb. Os defeitos de diferentes dimensões e profundidades foram implantados e localizados em seis regiões no material a ser inspecionado. De acordo com a figura 2.43, considerando o transmissor posicionado na parte inferior da figura e o receptor na superior, a varredura foi realizada a partir da esquerda para a direita da placa imersa em água. Foram implantadas três delaminações (A) com 25 mm de diâmetro, seguidas por delaminações (B, C) com diâmetros sucessivamente menores ($B=50\%A$, $C=50\%B$). Variações de espessuras localizadas com forma longitudinal e transversal em relação ao feixe sônico foram obtidas com cortes de camadas de fibras de forma retangular durante o empilhamento. A implantação de defeitos foi finalizada com a colocação de porosidades localizadas.

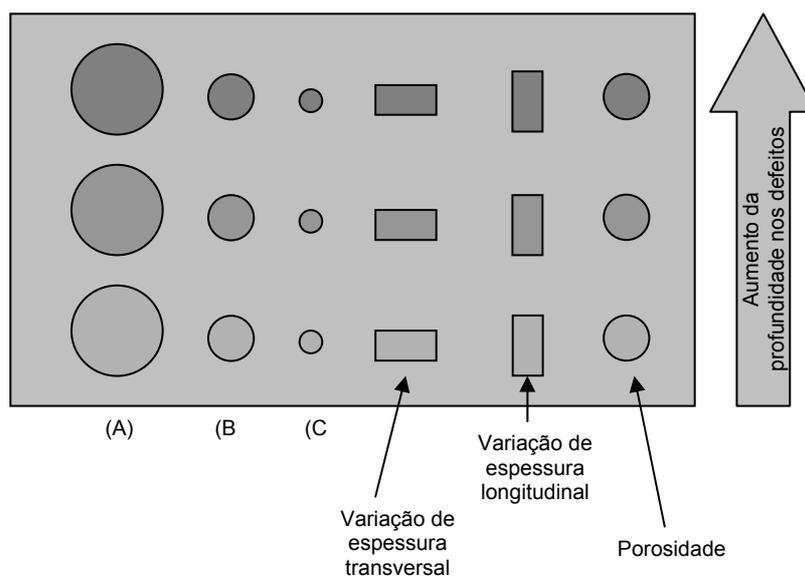


Figura 2.43 - Esquema de posicionamento dos defeitos implantados no corpo de prova do material compósito inspecionado por varredura ultra-sônica no trabalho de CHIMENTI *et al.* [31].

Observa-se, através da imagem do C-scan da figura 2.44, que quase todas as descontinuidades foram detectadas. Somente as variações de espessura transversais não apresentaram boa visualização. Os defeitos com variações nas dimensões também foram visualizados. Segundo os autores, esses resultados foram possíveis em função da utilização do método de excitação na forma de *tone-burst* com modulação em frequência. De outra forma, características adicionais tais como variações da espessura ou ainda, um empilhamento não uniforme por toda a extensão da placa, normais em materiais compósitos decorrentes do processo de fabricação, tenderiam a obscurecer os defeitos de interesse porque modificam ligeiramente as condições para a excitação das ondas *leaky* Lamb.

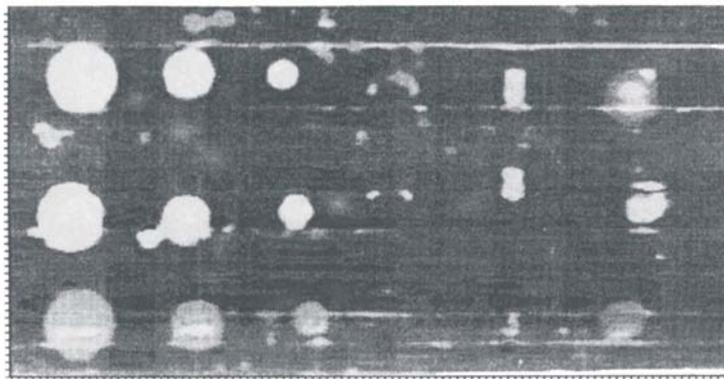


Figura 2.44 – C-scan com visualização de defeitos na placa de compósito laminado de fibra de carbono/ epóxi $[0^0]_{32}$ com defeitos visualizados. Defeitos em profundidades maiores aparecem em escala de cinza mais escuro ^[31].

Os pesquisadores também realizaram um C-scan convencional, figura 2.45, no material compósito contendo somente defeitos de difícil visualização, por incidência normal pulso-eco com transdutor de 10 MHz focalizado.

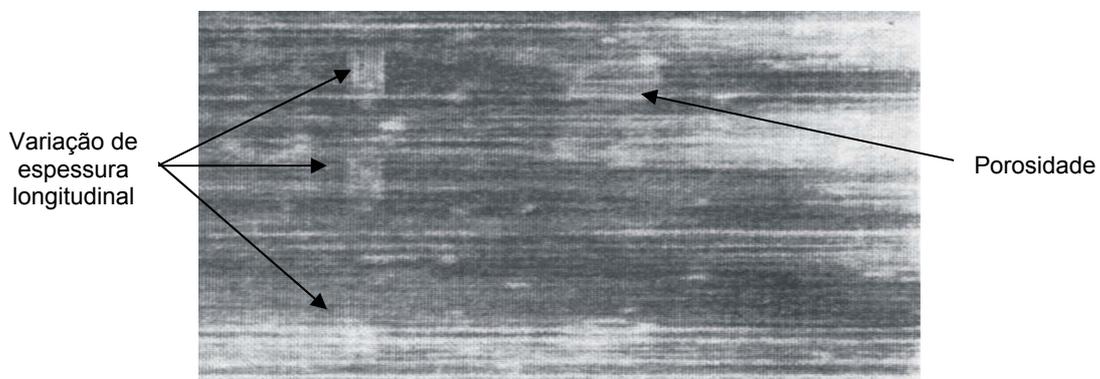


Figura 2.45 – Imagem C-scan convencional mostrando a porosidade e os cortes nas camadas do material compósito para simular a variação de espessura ^[31].

Na figura 2.45, verifica-se pouca visualização dos defeitos em relação ao C-scan da figura 2.44, o que mostra um elevado grau de sensibilidade para a técnica do tone burst com modulação em frequência, sem o uso de alta frequência e de transdutor focalizado.

2.4.2 - FOTOGRAFIA SCHLIEREN

A técnica de fotografia Schlieren ^[49,50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61] utiliza efeitos óptico-acústicos na visualização do feixe ultra-sônico num meio líquido transparente. Este método pode ser útil no estudo da propagação de ondas de Lamb em chapas, provendo informações que auxiliam na caracterização destes materiais bem como na detecção de defeitos. A figura 2.46 ilustra o diagrama experimental típico para a obtenção de fotografias Schlieren. Um feixe de luz monocromático é gerado por uma fonte de laser e focalizado através da lente L1 em um furo minúsculo. Após a passagem por L2, a luz é colimada para obter um perfeito feixe de laser paralelo, o qual atravessa um tanque transparente contendo água. Um feixe ultra-sônico incide obliquamente sobre a superfície de uma placa sólida (corpo de prova no interior do tanque). O feixe de laser, após interagir perpendicularmente com o ultra-som, sai do tanque sendo então focalizado por L3, e, em seguida filtrado para bloquear toda luz não-difratada. Portanto, somente luz difratada alcança a projeção da tela, e uma visualização do feixe ultra-sônico é obtida. A imagem é então capturada por câmera digital e armazenada.

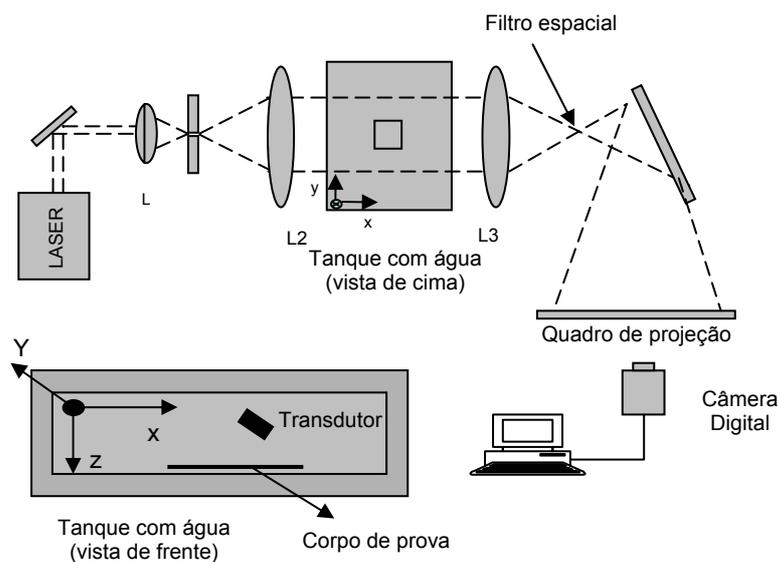


Figura 2.46 - Esquema experimental para obtenção de fotografias Schlieren.

Para análise dos feixes acústicos visualizados na fotografia Schlieren, a figura 2.47 ilustra um feixe ultra-sônico que propaga no líquido e incide na superfície do sólido com um ângulo próximo ao da geração de modos de propagação Lamb, promovendo uma série de fenômenos ^[51]:

- deslocamento lateral da posição geométrica do feixe refletido (reflexão não-especular);
- presença de uma zona de intensidade nula ou mínima dentro do feixe refletido (campo nulo);
- a geração de uma fraca onda *leaky* próxima ao feixe refletido.

O campo nulo, “efeito Schoch” ^[49,50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60] é resultante da interferência destrutiva entre o feixe oriundo da reflexão geométrica e o feixe gerado pela onda *leaky* Lamb. A presença desse campo nulo, foi objeto de estudos de vários pesquisadores nas últimas décadas ^[61, 62]. Este fenômeno de interferência teve o seu nome dado por ter sido investigado pelo pesquisador alemão A. Schoch em 1951.

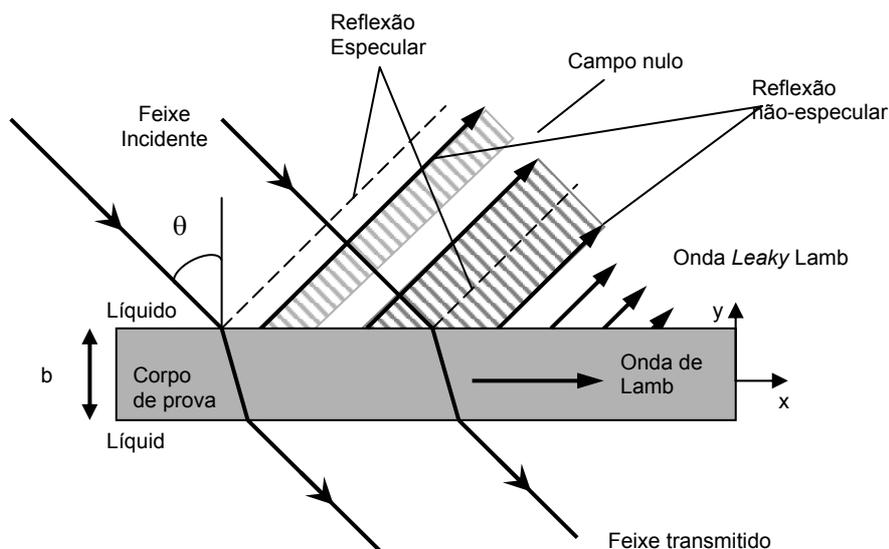


Figura 2.47 – Ilustração do efeito Schoch: Campo nulo devido à interferência destrutiva entre as reflexões geométrica e não-especular.

2.4.2.1 – APLICAÇÕES DA FOTOGRAFIA SCHLIEREN

DECLERCKQ *et al.* ^[53] mostraram que ondas de Lamb geram outras de mesma simetria quando alcançam as bordas da chapa por conversão de modo ou por retro-reflexão. Os pesquisadores usaram um sistema tradicional para obter fotografias Schlieren de um feixe ultra-sônico incidente de 3 MHz e 1 cm de diâmetro em uma chapa de alumínio com 1,45 mm de espessura.

Os resultados mostrados na figura 2.48 consistem de padrões típicos de raias para as ondas *leaky* Lamb. A origem física de cada uma das raias observadas foi explicada como uma interferência entre os campos *leakage* dos diferentes tipos de conversão de modo das ondas de Lamb. Segundo os autores ^[53], na figura 2.48(a), a combinação do modo de propagação assimétrico A_1 com o modo de propagação assimétrico refletido A_2 resulta em raias paralelas à direção de 8 e 172 graus. Na figura 2.48(b) a região central do feixe incidente mais próximo à borda produz um padrão de onda visível à frente da borda da chapa. Na figura 2.48(c) outros padrões são visíveis. O padrão com raias a -155° indica a existência de conversão de modo de propagação A_1 em modos de propagação assimétricos refletidos A_1 e A_0 . A presença de modos irradiados à frente na borda da chapa, de forma fraca na figura 2.48(b) e mais forte na figura 2.48(c), é devido a formação de múltiplos pólos acústicos.

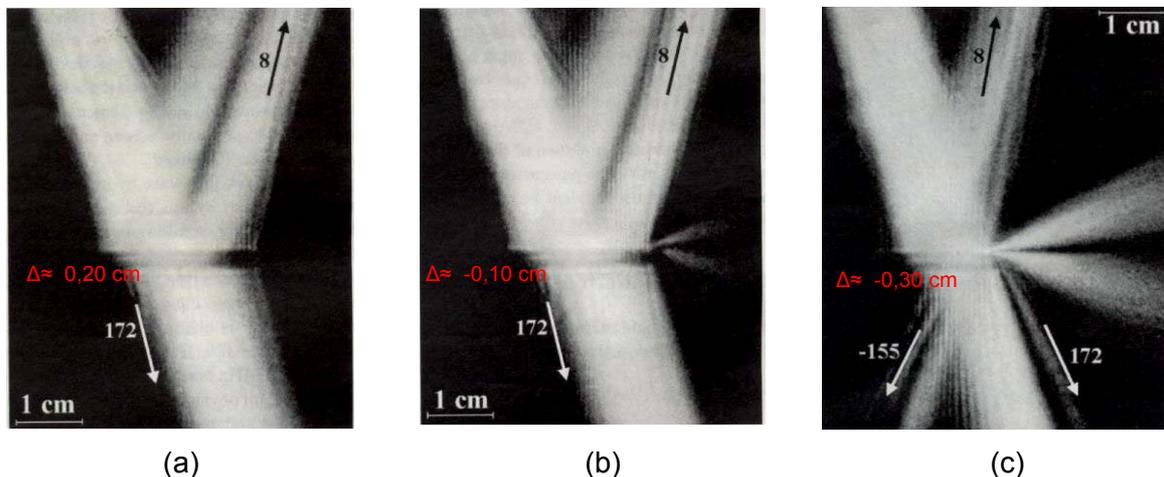


Figura 2.48 - Fotografias Schlieren: Visualização de um feixe ultra-sônico de 1 cm de diâmetro, frequência 3 MHz, com ângulo de incidência 19° incidindo sobre chapa de alumínio de 1,45 mm de espessura imersa em água – modo de propagação gerado A_1 . (a) feixe incidente a 0,20 cm da borda; (b) feixe incidente a -0,10 cm da borda; (c) feixe incidente a -0,30 cm da borda ^[53].

A metodologia da fotografia Schlieren foi utilizada para determinar a direção das fibras em material compósito laminado, usando um feixe sônico de alta frequência, 10 MHz, por DECLERCKQ *et al.* em outro trabalho ^[50]. Os pesquisadores mostraram que o perfil do feixe refletido é formado por um padrão de franjas, que ao contrário da técnica com baixa frequência (1-5 MHz), independe do ângulo de incidência. Segundo os autores, o padrão de franjas ocorre devido à dependência espacial do coeficiente de reflexão em relação à direção das fibras. Esta técnica mostra o resultado do não alinhamento das fibras próximas a superfície da chapa.

A figura 2.49 ilustra um feixe ultra-sônico de 2,5 cm de largura e 10 MHz incidente na superfície dos diferentes corpos de prova. Foi investigado o padrão de feixe refletido para placa de alumínio, para o compósito de fibra de carbono/epóxi unidirecional e para o compósito de fibra de vidro/epóxi unidirecional. A partir do feixe refletido foi extraída a área denotada pelo retângulo branco para o estudo.

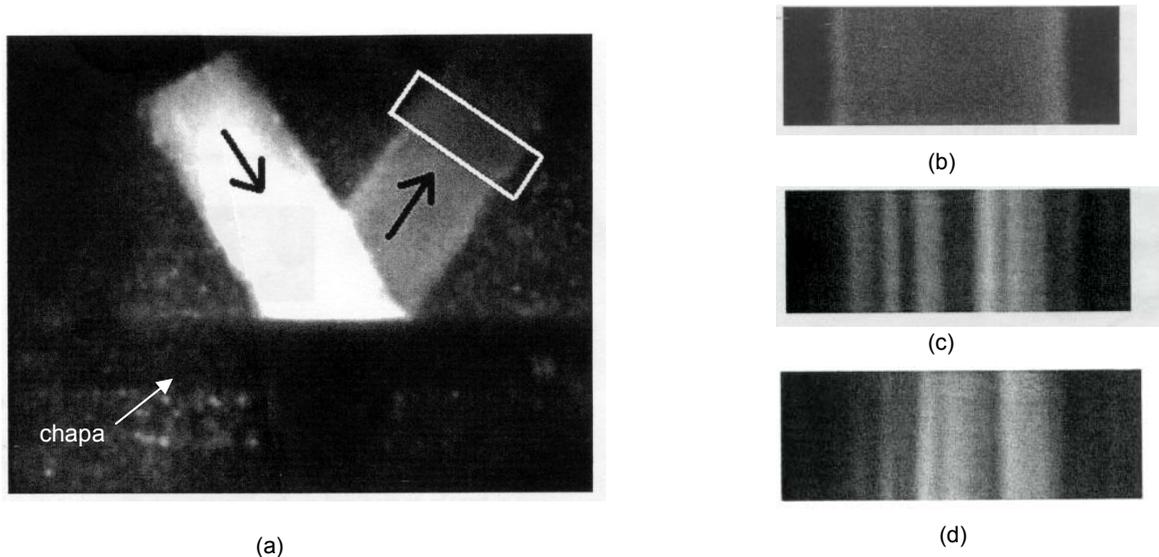


Figura 2.49– Fotografias Schlieren: feixe ultra-sônico de 2,5 cm de largura e 10 MHz incidente sobre a superfície do corpo de prova. (a) a partir do feixe refletido foi extraída área denotada pelo retângulo branco para o estudo; (b) padrão de feixe refletido sobre chapa de alumínio. Franjas não são visíveis; (c) padrão de feixe refletido para um compósito de fibra de carbono/epoxi unidirecional; (d) padrão de feixe refletido para um compósito de fibra de vidro/epóxi unidirecional ^[50].

Na figura 2.49(a), a amplitude do feixe refletido possui distribuição Gaussiana, embora, seja menor do que a amplitude do feixe incidente. Nesta pesquisa o feixe refletido obtido por incidência ultra-sônica na chapa de alumínio, figura 2.49(b) serve como referência para todos os outros corpos de prova. A figura 2.49(c) mostra o padrão do feixe refletido no compósito laminado de fibra de carbono/epóxi unidirecional. Este padrão difere do da figura 2.49(b), sendo obtido quando o laser é paralelo à direção das fibras. Padrão semelhante foi também verificado no compósito laminado de fibra de vidro/epóxi unidirecional, figura 2.49(d). Observa-se que as raias não são perfeitamente paralelas. Segundo os autores isto é devido a variações espaciais na densidade das fibras causadas pela imperfeição dos pré-impregnados ou devido ao processo de fabricação.

2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as técnicas mencionadas no capítulo de revisão bibliográfica, algumas foram utilizadas experimentalmente no presente trabalho de pesquisa, nas inspeções dos compósitos laminados fibra-metal. São elas:

- Ensaios por contato - técnicas de geração das ondas de Lamb nas configurações de transmissão-recepção e transmissão-reflexão, utilizando transdutores piezo-elétricos;
- Ensaios por imersão - técnica de geração das ondas de Lamb na configuração transmissão-recepção, sendo capturados os sinais das ondas *leaky* Lamb utilizando transdutores piezo- elétricos;
- Ensaios de não-contato - técnica de geração e recepção das ondas de Lamb utilizando laser;
- Técnica de fotografia Schlieren, explorada com ultra-som de baixa frequência para a detecção de defeitos em LFMs de fibra de vidro.

Do ponto de vista teórico, um programa computacional foi utilizado para a simulação das curvas de dispersão dos modos de propagação das ondas de Lamb nos LFMs.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo consiste na apresentação dos princípios básicos para uma melhor compreensão dos ensaios não-destrutivos de ultra-som utilizando ondas de Lamb na detecção de falhas em compósitos laminados fibra-metal. Para tal, serão abordados a propagação das ondas ultra-sônicas em meios elásticos, as características das ondas de Lamb, a geração destas ondas, em chapas, a partir da excitação com o LASER (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) bem como a obtenção das curvas de dispersão utilizando a transformada de Fourier bi-dimensional.

3.1– ONDAS ULTRA-SÔNICAS EM MEIOS ELÁSTICOS

Os meios elásticos, em relação as suas propriedades físicas, podem ser classificados em ^[63]:

- Homogêneos: quando as propriedades físicas são as mesmas em qualquer porção do meio;
- Heterogêneos: quando as propriedades físicas são dependentes da posição em que são observadas no meio.

As ondas ultra-sônicas são ondas mecânicas que necessitam de um meio elástico para se propagar, seja ele sólido, líquido ou gasoso. Quando num material atuam forças de tração e compressão abaixo de seu limite de elasticidade, as partículas do meio são deslocadas de suas posições de equilíbrio e forças elásticas internas de restauração se fazem presentes. São estas forças restauradoras elásticas entre as partículas, combinadas com a inércia das mesmas, que promovem a propagação de ondas no meio ^[19, 20, 21]. Em relação ao comportamento das propriedades físicas, em função da direção de propagação das ondas, os meios podem ser classificados principalmente em ^[64]:

- Isotrópicos: se as propriedades físicas são as mesmas para qualquer direção;
- Anisotrópicos: se as propriedades físicas são dependentes da direção de propagação.

A velocidade de propagação das ondas elásticas no material é função de suas propriedades e independe da amplitude da onda acústica. O som se propaga com velocidades diferentes para materiais diferentes, uma vez que a densidade do meio e suas constantes de elasticidade são diferentes para cada material.

A relação entre a velocidade de propagação do som num sólido com a sua densidade e constantes elásticas é dado pela seguinte equação ^[64]:

$$v = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}}, \quad (3.1)$$

onde v é a velocidade de som, C_{ij} é a constante elástica (ij são índices relacionados ao direcionamento cristalográfico do material), e ρ a densidade do material. Esta equação permite um número de fórmulas diferentes dependendo do tipo de onda (por exemplo, longitudinal ou cisalhante) e das constantes elásticas que são usadas.

Nos fluidos, o som propaga pela compressão e pela rarefação de moléculas do meio na direção de propagação. Entretanto, nos sólidos, as moléculas podem promover vibrações em várias direções, e com isto diferentes tipos de ondas acústicas são possíveis.

Com base no modo de deslocamento das partículas nos sólidos, as ondas acústicas são classificadas em ^[65]:

- Ondas volumétricas: longitudinais ou de compressão; transversais ou cisalhantes;
- Ondas guiadas: superficiais de Rayleigh; de Lamb (ou de “plates”).

Como a principal diferença entre as ondas volumétricas e ondas guiadas, as ondas volumétricas propagam no volume do material considerado de dimensões infinitas e, portanto, afastada dos limites (contornos), e as ondas guiadas se propagam ao longo dos limites (ondas de superfície) ou entre os mesmos (ondas de Lamb). As ondas volumétricas e as ondas guiadas comportam-se diferentemente, mas são governadas pelo mesmo tipo de equações diferenciais parciais da onda. A diferença na solução matemática dos dois tipos de ondas se deve às condições de contorno. No caso de ondas volumétricas, figura 3.1(a) não há necessidade de condições de contorno porque a onda propaga no meio considerado infinito. As ondas guiadas resultam da interação que ocorre entre dois materiais diferentes (materiais A e B), figura 3.1(b).

Esta interação produz reflexão, refração e a conversão de modos entre ondas longitudinais e transversais na interface, as quais podem ser previstas usando condições de contorno apropriadas [64, 66].

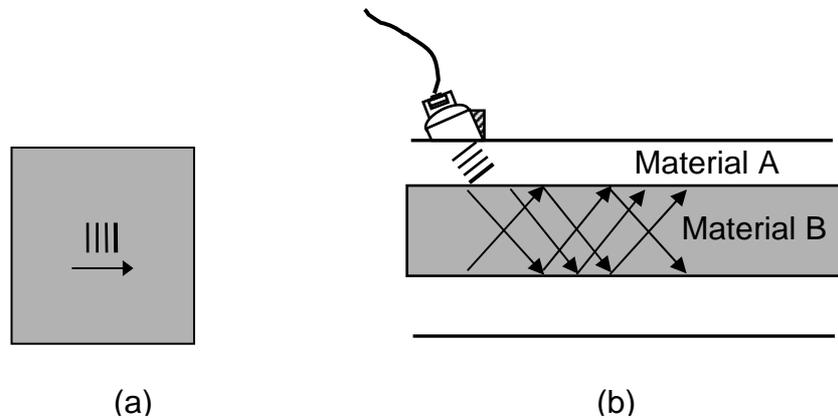


Figura 3.1 – Propagação da onda: (a) volumétrica; (b) guiada.

A dificuldade na aplicação prática das ondas guiadas deve-se à complexidade da solução da equação da onda considerando as condições de contorno impostas pelos limites. Estas ondas são caracterizadas por um número infinito de modos de propagação associados a uma solução parcial da equação diferencial da onda. Como consequência as ondas guiadas são altamente dependentes do comprimento de onda em relação às dimensões do meio de propagação (guia de onda), e a propagação destas ondas pode existir somente em combinações específicas da frequência, do número de onda e da atenuação [22].

3.2 – PROPRIEDADES DA ONDA ACÚSTICA

3.2.1 – VELOCIDADE DE FASE, (v_f)

Seja p uma perturbação da pressão acústica em um meio elástico, na forma de:

$$P_t = P + p, \tag{3.2}$$

onde, P_t é a pressão total, P é a pressão média no meio e p a flutuação referida.

A equação da onda acústica unidimensional ou plana propagando com a velocidade v na direção do eixo x , é expressa por [22]:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0. \quad (3.3)$$

Como solução trivial para a equação 3.3, considera-se uma onda harmônica do tipo:

$$p = p_0 \cos k(x + mt), \quad (3.4)$$

onde: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda, λ é o comprimento de onda, m é uma constante a ser determinada, t é a variável tempo, x é o deslocamento na direção x e p_0 é a amplitude da onda.

A expressão 3.4 pode ser utilizada como uma solução da equação 3.3 desde que

$$m = \pm v, \quad (3.5)$$

onde v é a velocidade de propagação da onda. Portanto, uma solução geral para a equação 3.3 é a solução de D'Alembert para ondas harmônicas expressa por:

$$p = p_0 \cos k(x + vt) + p_1 \cos k(x - vt), \quad (3.6)$$

onde cada um dos termos ou a sua adição pode ser uma solução.

Uma vez que $v = f\lambda$, pode-se escrever:

$$kv = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot f\lambda = 2\pi f = \omega. \quad (3.7)$$

Portanto, a expressão 3.6 pode ser escrita como,

$$p = p_0 \cos(kx + \omega t) + p_1 \cos(kx - \omega t) = p_0 \cos(\omega t + kx) + p_1 \cos(\omega t - kx). \quad (3.8)$$

Considerando em princípio, o primeiro termo da expressão 3.6 como uma solução, então,

$$p = p_0 \cos k(vt + x). \quad (3.9)$$

O significado da expressão 3.9 pode ser entendido avaliando p em função de x para diversos valores no tempo, a partir do instante $t = 0$ para um instante $t = \frac{T}{2}$, onde

$T = \frac{1}{f_0}$, é o período, como mostra a figura 3.2. Focalizando a atenção na crista de

uma das ondas, referida como ponto F, observa-se que com a progressão do tempo, este ponto move-se para a esquerda ou no sentido negativo da direção de propagação x , com isto, a onda é regressiva.

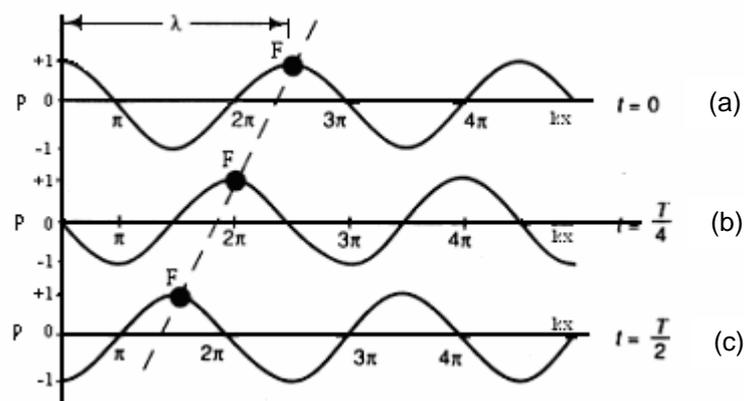


Figura 3.2– Representação gráfica de $p = p_0 \cos(\omega t + kx)$ em três instantes no tempo: $t = 0$, $t = \frac{T}{4}$ e $t = \frac{T}{2}$. Um ponto F, ponto de fase constante, move-se para a esquerda com a progressão do tempo [67].

Considerando, agora, o segundo termo da equação 2.6 como uma solução, tem-se:

$$p = p_1 \cos k(vt - x) = p_1 \cos(\omega t - kx). \quad (3.10)$$

Com relação à expressão 3.10, a figura 3.3 mostra que o valor constante de F para p move-se para a direita com o progresso do tempo. Portanto, essa equação representa a propagação da onda no sentido positivo da direção x , onda progressiva.

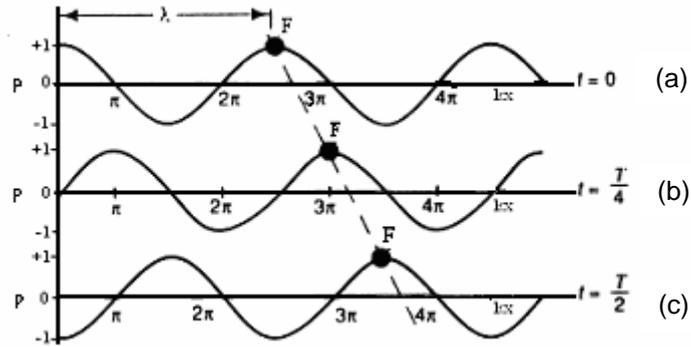


Figura 3.3 - Representação gráfica de $p = p_1 \cos(\omega t - kx)$ em três instantes no tempo: $t = 0$, $t = \frac{T}{4}$ e $t = \frac{T}{2}$. Um ponto F, ponto de fase constante, move-se para a direita com a progressão do tempo [67].

O ponto F, ponto de fase constante, é caracterizado pela condição:

$$v t \pm x = \omega t \pm kx = \text{constante.} \quad (3.11)$$

Derivando a expressão 3.1 em relação ao tempo, tem-se:

$$v \pm \frac{dx}{dt} = \omega \pm k \frac{dx}{dt} = 0, \quad (3.12)$$

portanto,

$$\frac{dx}{dt} = \pm v = \frac{\omega}{k} = v_f \quad (3.13)$$

Na expressão 3.13, $\frac{dx}{dt}$ é a taxa de variação da distância com o tempo ou a velocidade num ponto de fase constante. Esta velocidade é definida como velocidade de fase, v_f .

Assumido p' como a amplitude de p , a solução da equação da onda descrita pela equação 3.8, pode ser também expressa como:

$$p = p' e^{i(\omega t \pm kx)}. \quad (3.14)$$

Ao escrever p como uma função complexa, esta possui uma parte real correspondente a propagação no sentido positivo da direção x . Então, considerando a parte real (Re), tem-se,

$$p = p' \operatorname{Re}[e^{i(\omega t - kx)}] = p' \cos(\omega t - kx). \quad (3.15)$$

3.2.2 – VELOCIDADE DE GRUPO, v_g

Supondo agora que a onda acústica resulte da adição de duas outras de mesma amplitude e com freqüências expressas por $\omega_0 \pm \Delta\omega$. E ainda, que os valores correspondentes de k são $k_0 + \Delta k$ para a onda na freqüência $\omega_0 + \Delta\omega$, e $k_0 - \Delta k$ para a onda na freqüência $\omega_0 - \Delta\omega$. Substituindo ω na expressão 3.15, tem-se, para a freqüência $\omega_0 + \Delta\omega$:

$$p_I = p'_I \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t - (k_0 + \Delta k)x] \quad (3.16)$$

Analogamente, para a freqüência $\omega_0 - \Delta\omega$, tem-se

$$p_{II} = p'_{II} \cos[(\omega_0 - \Delta\omega)t - (k_0 - \Delta k)x]. \quad (3.17)$$

p total será então,

$$p = p_I + p_{II}. \quad (3.18)$$

Substituindo as expressões 3.16 e 3.17 na 3.18, obtém-se,

$$p = 2p' \cos(\omega_0 t - k_0 x) \cos(\Delta\omega t - \Delta k x). \quad (3.19)$$

O produto de dois co-senos, sendo um de freqüência maior, ω_0 , e outro de freqüência menor, $\Delta\omega$, gera uma onda de amplitude modulada por esta última.

Foi visto anteriormente que igualando o primeiro argumento da equação 3.6 e após derivando em relação ao tempo obtém-se a velocidade de fase de uma onda. Fazendo o mesmo com o argumento do segundo fator co-seno da equação 3.6, obtém-se $\Delta\omega t - \Delta kx = \text{constante}$, tem-se:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = v_g, \quad (3.20)$$

onde v_g representa a velocidade do envelope da onda e é denominada de velocidade de grupo. A diferença entre velocidade de fase e velocidade de grupo é ilustrada pela figura 3.4. A partir da equação 3.19, foram construídos gráficos de p em função da distância em metros para três instantes no tempo: $t = 0$, $t = \frac{T}{4}$ e $\frac{T}{2}$. O ponto F é um ponto de fase constante da onda e move-se com a velocidade de fase v_f . O ponto G é um ponto de fase constante do envelope da onda e move-se com a velocidade de grupo v_g . É visto que a meio período, $\frac{T}{2}$, o ponto G move-se para a distância d' , que é a metade da distância d , distância que o ponto F se move. Logo, para esse caso, a velocidade de grupo v_g tem a metade do valor da velocidade de fase v_f . Para uma onda com apenas um componente espectral, a velocidade de grupo não é aparente. No entanto se a onda contém dois ou mais componentes espectrais, como na onda modulada, a velocidade de grupo pode ser observada porque a amplitude da onda não é uniforme e as ondas aparecem individualmente para formar grupos que podem se fechar através de um envelope ^[67].

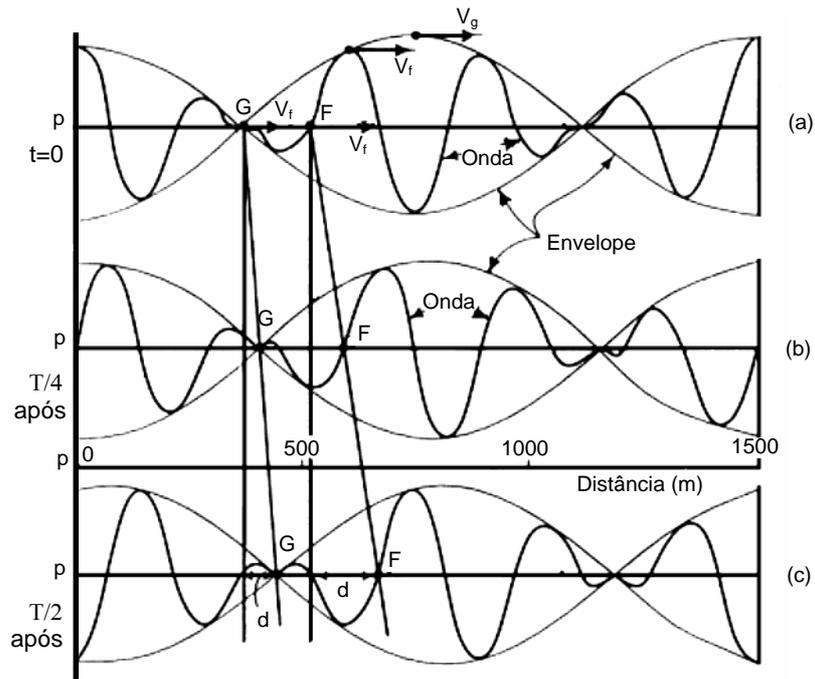


Figura 3.4 – O ponto F em fase constante na onda move-se na velocidade de fase v_f , enquanto o ponto G no envelope da onda move-se com a velocidade de grupo v_g . Na ilustração a velocidade de grupo é a metade da velocidade de fase [67].

Para uma onda com pequena largura de banda,

$$v_g = \lim_{\Delta k \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta k} = \frac{d\omega}{dk} . \quad (3.21)$$

Como $\omega = 2\pi f = 2\pi f \frac{\lambda}{\lambda} = kv_f$, a velocidade de grupo também pode ser representada

por:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kv_f)}{dk} = k \frac{dv_f}{dk} + v_f . \quad (3.22)$$

Então,

$$v_g = v_f + k \frac{dv_f}{dk} , \quad (3.23)$$

ou ainda,

$$v_g = v_f - \lambda \frac{dv_f}{d\lambda}. \quad (3.24)$$

As equações 3.23 e 3.24 são utilizadas para determinar a velocidade de grupo em função da velocidade de fase.

3.2.3 - DISPERSÃO

Quando a velocidade de fase v_f de uma onda plana é função de sua frequência ou comprimento de onda, então a propagação no meio é dita dispersiva [68]. A dispersão pode ser causada por:

- Presença de contornos nos corpos de prova - dispersão geométrica;
- Dependência das constantes materiais (densidade, módulos de elasticidade, constantes dielétricas) com a frequência - dispersão material;
- Espalhamento das ondas por heterogeneidades presentes no material - dispersão por espalhamento;
- A absorção ou dissipação da energia da onda na forma de calor ou outra forma de energia em um processo irreversível - dispersão dissipativa;
- Dependência da velocidade da onda na amplitude - dispersão não-linear.

Num meio não-dispersivo a velocidade de fase e a velocidade de grupo são iguais, o que não ocorre em meios dispersivos [67]. Os meios dispersivos podem ser:

- Dispersivo normal – neste meio, a variação da velocidade de fase com o comprimento de onda é positiva, logo, $\frac{dv_f}{d\lambda} > 0$. Para este meio $v_g < v_f$;
- Dispersivo anômalo – neste meio, a variação da velocidade de fase com o comprimento de onda é negativa, logo, $\frac{dv_f}{d\lambda} < 0$. Portanto, $v_g > v_f$.

A velocidade do grupo pode também ser usada para prever o quanto à dispersão ocorrerá para um dado pacote de onda. Uma onda pulsátil contém um espectro de frequência, cuja largura de banda depende do número dos ciclos no pacote da onda, bem como a forma do pacote. Cada componente da faixa de frequência propagará em uma velocidade de fase diferente. Se a diferença de velocidades na faixa de frequência for grande, então os componentes da faixa da frequência atrasam entre si e haverá dispersão. A dispersão causará a mudança do sinal da onda, mudando a forma do pacote de onda enquanto esta propaga. Entretanto, se as velocidades do grupo forem muito similares sobre a faixa de frequência gerada, o pacote manterá a mesma forma durante a sua propagação. Conseqüentemente, em situações práticas, prefere-se geralmente usar uma frequência central que corresponda a uma região onde a velocidade de fase seja praticamente constante, de modo que todos os componentes da faixa frequência predominante propaguem conjuntamente ^[23].

3.3 - PROPAGAÇÃO DA ONDA ACÚSTICA EM MEIO ELÁSTICO ISOTRÓPICO

Como mencionado anteriormente, as ondas volumétricas e as ondas guiadas são governadas pelo mesmo tipo de equações diferenciais parciais. Para um meio elástico considerado isotrópico, um caso particular do meio anisotrópico, várias constantes materiais são nulas. As equações a seguir são relacionadas ao meio isotrópico, pois as restrições matemáticas impostas são menos complexas.

Uma vez que a teoria da propagação da onda acústica em meio isotrópico é bem documentada na literatura ^[22, 66, 64, 69], neste capítulo, é, colocada de forma resumida. Todavia, se faz necessária introduzir notação e algumas características que serão necessárias posteriormente no entendimento da propagação da onda no meio.

Para um sólido elástico de volume arbitrário a equação do movimento de Euler pode ser obtida aplicando a segunda lei de Newton e a conservação da massa. Quando o material de densidade constante, ρ , é linearmente elástico, as forças gravitacionais aplicadas ao corpo são negligenciadas e a equação de Euler pode ser escrita como:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \right) = \nabla \cdot \vec{\sigma}, \quad (3.25)$$

onde u é o vetor deslocamento do campo e $\vec{\sigma}$ é o tensor tensão.

$\vec{\sigma}$ pode ser expresso em termos do tensor de deformação utilizando a lei de Hooke:

$$\vec{\sigma} = \vec{c} \cdot \vec{\varepsilon}, \quad (3.26)$$

onde \vec{c} é o tensor de rigidez elástica e $\vec{\varepsilon}$ é o tensor de deformação relativa.

Para um material isotrópico, homogêneo e linearmente elástico a teoria da elasticidade demonstra que é possível reduzir os 21 componentes do tensor \vec{c} a duas constantes materiais, Λ e μ , denominadas de constantes de Lamé. Se o tensor de deformação for expresso em termos do deslocamento, a lei de Hooke simplifica para:

$$\vec{\sigma} = \Lambda \nabla \cdot u + \mu (\nabla u + u \nabla^T), \quad (3.27)$$

onde I é a matriz identidade.

Combinando as equações 3.25 e 3.27 é obtida a equação diferencial para o movimento isotrópico em meio elástico,

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = \mu \nabla^2 u + (\Lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u, \quad (3.28)$$

onde ∇^2 é um operador tri-dimensional Laplaciano.

A equação 3.28 é uma expressão compacta. Considerando o volume de um cubo infinitesimal do material em equilíbrio num sistema de coordenadas cartesianas com eixos fixos nas direções x , y e z , a equação pode ser expandida em:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right) = (\Lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_x;$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \right) = (\Lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_y;$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \right) = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_z, \quad (3.29)$$

onde u_x , u_y e u_z são componentes do deslocamento do campo nas direções x , y e z .

Estas são as equações diferenciais do movimento que devem ser satisfeitas por todas as ondas elásticas que propagam no material e serão referendadas como às equações da onda. Todo o campo do deslocamento que satisfizer às equações da onda, implicitamente estará satisfazendo às condições do equilíbrio e de compatibilidade. Assim, as restrições restantes ao campo do deslocamento deverão advir das condições de contorno externas ao material. Deve-se notar que as equações da onda são lineares, portanto, a superposição de duas ou mais soluções válidas no campo do deslocamento será também uma solução válida.

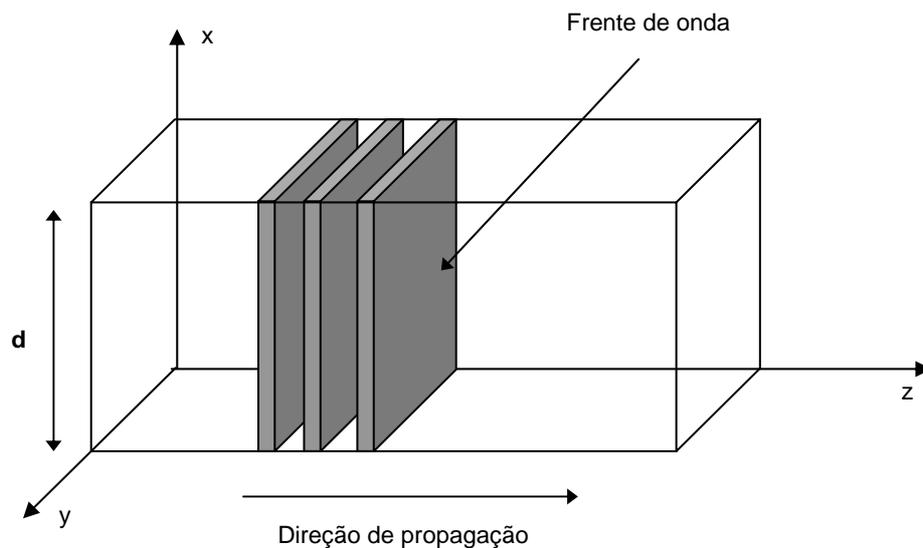


Figura 3.5 - Ilustração de uma estrutura em forma de placa com espessura d , mostrando a orientação dos eixos, a direção de propagação da onda plana e as frentes de onda.

As soluções das equações que serão consideradas referem-se à onda plana contínua que propaga no sentido positivo do eixo de coordenadas z . Em tal onda, cada frente de onda é um plano infinito paralelo ao plano do xy , e o campo do deslocamento será considerado independente da direção de y (ver figura 3.5). Portanto, uma dependência espacial harmônica, dada por $\exp(ikz)$, é incluída em todas as soluções propostas, onde k é o número de onda e i é definido como $\sqrt{-1}$. Duas formas de soluções são

possíveis, dependendo se o deslocamento da partícula for paralelo ou perpendicular à direção de propagação da onda.

Considerando o caso do deslocamento da partícula ser paralelo à direção de propagação da onda, o campo do deslocamento é dado por:

$$u_x = 0;$$

$$u_y = 0;$$

$$u_z = A_z \exp[i(\omega t - kz)] \quad (3.30)$$

onde A_z é uma constante arbitrada, ω é a frequência angular. Esta solução deve satisfazer as equações da onda. O deslocamento do campo pode ser não rotacional, com a propagação da onda no material sendo efetuada por compressões e rarefações localizadas. Substituindo a equação 3.30 na 3.29, pode-se obter uma relação entre a frequência angular e o número de onda:

$$\frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = v_l \quad (3.31)$$

Foi visto anteriormente que a razão entre a frequência angular e o número de onda, é a velocidade de fase da onda, v_f , definida como a velocidade da crista da onda propagada. Neste caso como o movimento da partícula é restrito à direção de propagação da onda, as ondas são descritas como ondas longitudinais, sendo v_l a velocidade da onda volumétrica longitudinal.

Uma segunda solução para as equações da onda pode ser utilizada quando os deslocamentos da partícula são perpendiculares à direção de propagação da onda. Neste caso, o deslocamento do campo é descrito por:

$$u_x = A_x \exp[i(\omega t - kz)];$$

$$u_y = 0 ;$$

$$u_z = 0, \quad (3.32)$$

onde, A_x é uma constante arbitrária. Ao contrário do campo de deslocamento para ondas longitudinais, este campo de deslocamento é puramente transversal e tem o divergente nulo. Neste caso, não há variação no volume de material conforme a onda propaga. Com a substituição da equação 3.32 na equação 3.29 obtêm-se a seguinte relação entre ω e k :

$$\frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = v_t \quad (3.33)$$

onde v_t é a velocidade de fase da onda propagada, que é, como já visto anteriormente, denominada de velocidade da onda transversal ou cisalhante, uma vez que o movimento da partícula é perpendicular à direção de propagação da onda. A direção do movimento da partícula é específica ao plano xy e denominada de direção de polarização da onda transversal.

Pode-se manipular a equação da onda, equação 3.28, utilizando funções potencial para decompor o campo de deslocamento em dois campos: um definido como sendo o gradiente do campo escalar, não-rotacional, associado às ondas longitudinais. E o outro não-divergente associado às ondas transversais. A decomposição de Helmholtz ^[69] mostra que todo o vetor pode ser descrito em termos de um potencial escalar, ϕ , e de um potencial vetorial, ψ . Assim o campo de deslocamento da partícula pode ser descrito como ^[22,69]:

$$u = \nabla \phi + \nabla \times \psi \quad (3.34)$$

e, ainda, a equação da onda pode ser redefinida em termos de funções potencial por:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} &= (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 \psi, \end{aligned} \quad (3.35)$$

ou, ainda,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = v_l^2 \nabla^2 \phi$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v_t^2 \nabla^2 \psi. \quad (3.36)$$

As equações 3.36 são conhecidas como Equações Diferenciais de Helmholtz ^[25].

3.4 - PROPAGAÇÃO DA ONDA EM ESTRUTURAS EM FORMA DE PLACAS

Um exemplo para o uso da equação 3.36, pode ser esquematizado através de uma placa num sistema de coordenadas cartesianas. A placa (ver figura 3.5) estende-se ao infinito na direção do eixo y, com a base na origem. A propagação da onda ocorre ao longo do eixo z, com os campos de deslocamento uniformes na direção y.

Para o caso de uma placa com dimensões finitas ao longo de x e y, são necessárias condições de contorno para a resolução do problema. Estas condições envolvem, em geral, considerações como tensão e/ou deslocamentos de campo nos limites da estrutura. No exemplo de uma placa livre, as superfícies nas coordenadas $x=0$ e $x=d$, onde d é a espessura da placa, são consideradas livres de tensão. Um método de solução para este sistema é o do potencial de deslocamento. Como a onda é plana e não depende da coordenada y, apenas o vetor potencial ao longo do eixo y não deve ter amplitude nula. Os potenciais ϕ e ψ são designados, respectivamente, potenciais das ondas longitudinais e transversais. Este método supõe que o deslocamento da partícula na direção y é zero ($u_y=0$), com rotação somente em torno do eixo y, ($\Psi_x = \Psi_z = 0$). Considerando então, $\psi = \psi_y$, tem-se que a equação de onda 3.36 se reduz a ^[22]:

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

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \mu \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) \quad (3.37)$$

Definindo o números da onda longitudinais e transversais, k_l e k_t , respectivamente, tem-se:

$$k_l = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\Lambda + 2\mu}} \therefore k_l = \omega v_l$$

$$k_t = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \therefore k_t = \omega v_t . \quad (3.38)$$

Os componentes de deslocamento de partícula W (eixo x) e U (eixo z) podem ser representados pelas equações ^[22]:

$$W = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$U = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} , \quad (3.39)$$

enquanto que, considerando a equação 3.29, os componentes de tensão σ_{xx} , σ_{zz} , σ_{xz} são descritos pelas equações abaixo:

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

$$\sigma_{zz} = \Lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right) \quad (3.40)$$

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

Para as soluções das equações 3.37 correspondendo a ondas harmônicas propagando na direção positiva do eixo z , tem-se ^[22]:

$$\phi = F(x) e^{i(kz - \omega t)} ;$$

$$\psi = G(x)e^{i(kz-wt)}. \quad (3.41)$$

Substituindo estes valores na equação 3.37 e 3.38,

$$\frac{d^2 F(x)}{dx^2} - (k^2 - k_i^2)F(x) = 0;$$

$$\frac{d^2 G(x)}{dx^2} - (k^2 - k_i^2)G(x) = 0 \quad (3.42)$$

As duas soluções linearmente independentes das equações acima são $\pm \sqrt{k^2 - k_i^2}x$ e $\pm \sqrt{k^2 - k_i^2}z$. Considerando $k^2 > k_i^2 > k_t^2$, as soluções com radicais positivos no expoente correspondem a um aumento de deslocamento com a profundidade, enquanto que a solução com radical negativo corresponde ao decaimento exponencial do deslocamento com a profundidade, para ondas superficiais. Pode-se então escrever ϕ e ψ da seguinte forma:

$$\phi = Ae^{-qx}e^{i(kz-\omega t)};$$

$$\psi = Be^{-sx}e^{i(kz-\omega t)}, \quad (3.43)$$

onde $q^2 = k^2 - k_i^2$; $s^2 = k^2 - k_t^2$; A e B constantes arbitrárias.

Como as tensões σ_{xx} e σ_{xz} devem ser nulas na interface (plano $x = 0$), e substituindo as expressões para ϕ e ψ nestas condições, obtêm-se a relação unindo A , B e o número de onda k . Como resultado, têm-se as seguintes equações:

$$\phi = -Ae^{i(kz-\omega t)-qx};$$

$$\phi = -iA \frac{2kq}{k^2 + s^2} e^{i(kz-\omega t)-sx}. \quad (3.44)$$

A equação característica na qual k é determinado é descrita por ^[22]:

$$4k^2qs - (k^2 + s^2)^2 = 0. \quad (3.45)$$

Reduzindo-se à forma,

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8(3 - 2\xi^2)\eta^2 - 16(1 - \xi^2) = 0, \quad (3.46)$$

com $\eta = \frac{k_t}{k} = \frac{v}{v_t}$; $\xi = \frac{k_l}{k_t} = \frac{v_t}{v_l}$; onde v_l e v_t são as velocidades de fase das ondas

longitudinais e transversais. A equação 3.46, chamada de equação de Rayleigh, tem seis raízes, que dependem somente do coeficiente de Poisson do meio elástico^[22].

3.5 – ONDAS ULTRA-SÔNICAS DE LAMB

As ondas de Lamb estão associadas aos modos de propagação das estruturas, sendo também conhecidas como ondas de placas, e referem-se às perturbações elásticas que se propagam num material sólido (chapas, placa, etc.) com as interfaces ou contornos livres. A espessura do material deve ser da ordem de grandeza dos comprimentos de onda presentes. Nestas ondas, a movimentação da partícula ocorre tanto na direção de propagação (direção z) quanto perpendicularmente ao comprimento do material (direção x), como mostra a figura 3.6.

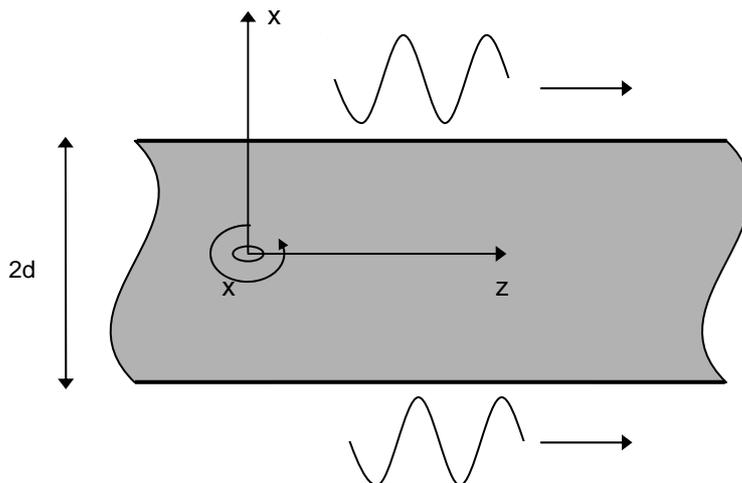


Figura 3.6 - Esquema mostrando a direção de propagação das ondas de Lamb^[22].

Nas ondas de Lamb, um grande número de modos de vibração da partícula é possível com quantidades específicas de energia (modos específicos), que depende fortemente de certos fatores, tais como: sistema de carregamento, ângulo de incidência do feixe sônico, frequência central do transdutor, largura da banda de frequência e outros parâmetros descritos em [6, 22, 70, 71]. A figura 3.7 ilustra os modos de propagação mais comuns: os modos simétricos e os modos anti-simétricos. O movimento complexo das partículas é similar às órbitas elípticas para a superfície.

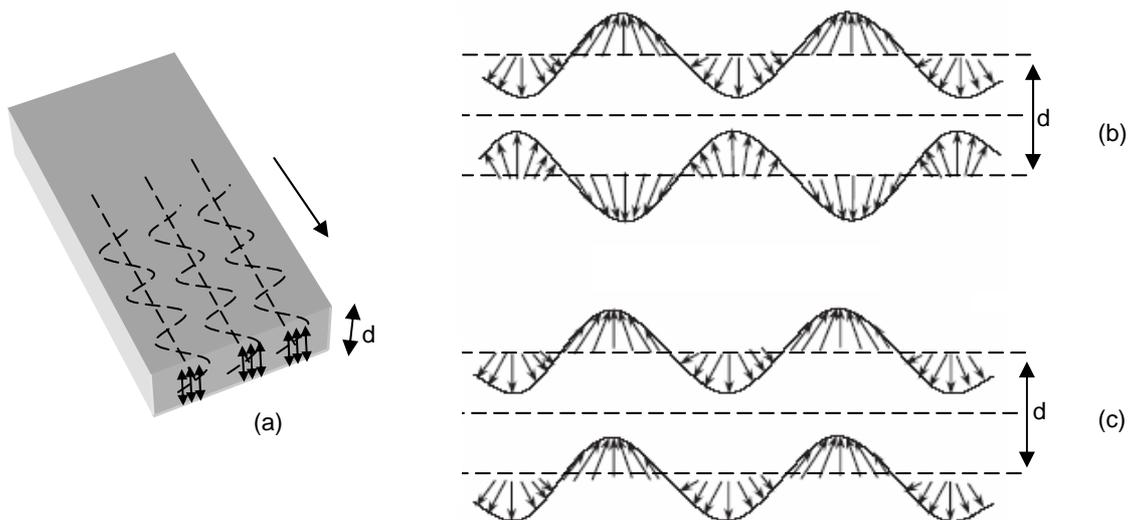


Figura 3.7 – (a) Ondas de Lamb propagando em uma placa de espessura d ; (b) modos simétricos; (c) modos assimétricos.

Para o entendimento dos deslocamentos que ocorrem em cada modo de propagação de Lamb, considera-se um modelo, figura 3.6, para a onda propagando em uma placa de espessura $2d$, na direção positiva do eixo z e o campo de deslocamento das partículas descrito pela equação 3.34. Como no caso das ondas de Rayleigh, somente o vetor potencial na direção do eixo y tem amplitude não nula. Os potenciais ϕ e ψ , que descrevem ondas longitudinais e transversais, respectivamente, devem satisfazer as equações 3.37. A partir destes potenciais, os componentes de deslocamento nas direções x e z (W e U) bem como as componentes do estado de tensões são fornecidas pelas equações 3.39 e 3.40.

Os potenciais ϕ e ψ são representados pelas equações em [22] da seguinte forma:

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

$$\psi = D_s \sinh(sx)e^{ikx} + C_a \cosh(sx)e^{ikz}, \quad (3.47)$$

onde onde A_s , B_a , C_a e D_s são constantes arbitrárias, k é o número de onda, $q^2 = k^2 - k_t^2$ e $s^2 = k^2 - k_t^2$. Estas expressões satisfazem as equações 3.37 e 3.38, além de que as tensões nos planos $x=\pm d$ devem ter valores nulos. Substituindo a equação 3.47 em 3.40, e rearranjando, chega-se a duas equações características:

$$(k^2 + s^2)^2 \cosh(qd)\sinh(sd) - 4k^2qs\sinh(qd)\cosh(sd) = 0, \quad (3.48)$$

e,

$$(k^2 + s^2)^2 \sinh(qd)\cosh(sd) - 4k^2qs\cosh(qd)\sinh(sd) = 0. \quad (3.49)$$

Obtendo as relações entre $(D_s$ e $A_s)$ e $(C_a$ e $B_a)$ e inserindo estes termos nas equações 3.47, tem-se as seguintes relações para os potenciais:

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

$$\psi = \frac{2ik_s q_s \sinh(q_s d)}{(k_s^2 + s_s^2) \sinh(s_s d)} A_s \sinh(s_s x)e^{ik_s z} + \frac{2ik_a q_a \cosh(q_a d)}{(k_a^2 + s_a^2) \cosh(s_a d)} B_a \cosh(s_a x)e^{ik_a z} \quad (3.50)$$

onde $q_{s,a}^2 = k_{s,a}^2 - k_t^2$ e $s_{s,a}^2 = k_{s,a}^2 - k_t^2$. Os deslocamentos das partículas são expressos em ^[22] pelas seguintes relações:

$$W = W_s + W_a \text{ e,}$$

$$U = U_s + U_a, \quad (3.51)$$

onde,

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

$$W_s = -Aq_s \left(\frac{\sinh(q_s x)}{\sinh(q_s d)} - \frac{2k_s^2 \sinh(s_s x)}{k_s^2 + s_s^2 \sinh(s_s d)} \right) e^{i(k_s z - \omega t)}, \quad (3.52)$$

e,

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

$$W_a = -Bq_a \left(\frac{\cosh(q_a x)}{\cosh(q_a d)} - \frac{2k_a^2}{k_a^2 + s_a^2} \frac{\cosh(s_a x)}{\cosh(s_a d)} \right) e^{i(k_a z - \omega t)}, \quad (3.53)$$

onde A e B são constantes arbitrárias.

Estas expressões descrevem dois grupos de modos de propagação das ondas de Lamb. As expressões 3.52, indicadas pelo índice “s” descrevem os modos de propagação das ondas simétricas (sinais iguais para deslocamento U e sinais opostos para deslocamento W nas metades superior e inferior da espessura - figura 3.18(b)), enquanto que as expressões 3.53, de índice “a” descrevem ondas assimétricas (sinais opostos para deslocamento U e sinais iguais para deslocamento W nas metades superior e inferior da espessura - figura 3.18(c)) [22].

3.5.1 - CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS DE LAMB

3.5.1.1 – NÚMEROS DE ONDA E FREQUÊNCIA CRÍTICA

A quantidade de raízes reais das equações 3.48 e 3.49 fornecem os números de ondas simétricas e assimétricas, respectivamente. Quando $\omega d \rightarrow 0$, há somente uma raiz para cada uma das equações 3.48 e 3.49, a primeira correspondendo ao modo de propagação simétrico de ordem zero S_0 e, a segunda, ao modo de propagação assimétrico da mesma ordem A_0 . Aumentando ωd , outras raízes de ordem mais elevada são possíveis. As relações entre espessura e comprimento de onda onde aparecem novas raízes são designadas “críticas”, a seguir [22].

$$2d = \frac{\lambda_l}{2}, \frac{3\lambda_l}{2}, \frac{5\lambda_l}{2}, \dots \quad 2d = \lambda_t, 2\lambda_t, 3\lambda_t, \dots \quad \text{Modos simétricos} \quad (3.54)$$

$$2d = \frac{\lambda_t}{2}, \frac{3\lambda_t}{2}, \frac{5\lambda_t}{2}, \dots \quad 2d = \lambda_l, 2\lambda_l, 3\lambda_l, \dots \quad \text{Modos assimétricos} \quad (3.55)$$

Os números de modos simétricos (N_s) e assimétricos (N_a) possíveis em uma placa de espessura $2d$ e frequência ω são, respectivamente ^[22]:

$$N_s = 1 + \left[\frac{2d}{\lambda_t} \right] + \left[\frac{2d}{\lambda_l} + \frac{1}{2} \right] \quad (3.56)$$

$$N_a = 1 + \left[\frac{2d}{\lambda_l} \right] + \left[\frac{2d}{\lambda_t} + \frac{1}{2} \right] \quad (3.57)$$

Será considerado como resultado da divisão contida em cada colchete a parte inteira mais próxima do resultado da operação. Existem pelo menos dois modos (A_0 e S_0) quaisquer que sejam as frequências ^[22].

3.5.1.2 -VELOCIDADES DE FASE E DE GRUPO DAS ONDAS DE LAMB

A velocidade de fase v_f se torna de fundamental importância no estudo de ondas de Lamb, pois define os modos de propagação em função da frequência em cada meio material, além da determinação do número de onda e da distribuição de tensões e deslocamentos em qualquer ponto. A velocidade de fase é obtida pela solução numérica das equações características 3.48 e 3.49, e podem ser reescritas adimensionalmente ^[22]:

$$\frac{\tan(\sqrt{1-\zeta^2}\bar{d})}{\tan(\sqrt{\xi^2-\zeta^2}\bar{d})} = -\frac{4\zeta^2\sqrt{1-\zeta^2}\sqrt{\xi^2-\zeta^2}}{(2\zeta^2-1)^2} \quad (\text{modos simétricos});$$

$$\frac{\tan(\sqrt{1-\zeta^2}\bar{d})}{\tan(\sqrt{\xi^2-\zeta^2}\bar{d})} = -\frac{(2\zeta^2-1)^2}{4\zeta^2\sqrt{1-\zeta^2}\sqrt{\xi^2-\zeta^2}} \quad (\text{modos assimétricos}), \quad (3.58)$$

$$\text{onde } \bar{d} = k^t d; \quad \zeta^2 = \frac{v_t^2}{v^2}; \quad \xi^2 = \frac{v_l^2}{v^2}.$$

Ou, de outra forma como citado em [6]:

$$\frac{\tan(qd)}{\tan(pd)} = \left[\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \right]^{\pm m} \quad (3.59)$$

onde d é a espessura da placa, o expoente m tem o valor 1 para modos simétricos e -1 para assimétricos, $k = \omega/v_f$ é o número de onda, $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, v_f é a velocidade de fase da onda de Lamb e p e q são dados por:

$$q^2 = k^2 - k_t^2;$$

$$p^2 = k^2 - k_l^2, \quad (3.60)$$

onde $k_l = \omega/v_l$ é o número de onda longitudinal e $k_t = \omega/v_t$ é o número de onda transversal e v_l e v_t as velocidades de fase das ondas longitudinais e transversais descritas anteriormente pelas equações 3.31 e 3.33.

A velocidade de grupo pode ser calculada através da velocidade de fase pela equação 3.22.

3.5.1.3 – INSPEÇÕES UTILIZANDO ONDAS DE LAMB

Modos de propagação de Lamb em certas frequências podem ser selecionados de acordo com a sua sensibilidade a defeitos de interesse em um determinado material. A transformação de ondas volumétricas, longitudinais e transversais que incidem na placa, em ondas de Lamb, ocorre devido à reflexão e a conversão de modo do feixe ultra-sônico nas superfícies do material. Entretanto, a propagação das ondas de Lamb em materiais compósitos laminados pode ser dificultada devido a anisotropia deste material, mecanismos complexos de atenuação, e à natureza heterogênea destes materiais através da espessura do laminado [4, 22, 23, 44, 71, 72, 73].

A forma fundamental de descrever a propagação de ondas de Lamb em um material é através das suas curvas de dispersão, onde são traçadas as velocidades de fase

(figura 3.8) e de grupo contra a frequência da onda (mostrada geralmente como um produto com a espessura). E, mostram os modos de propagação possíveis no material em função da frequência. Estas curvas são originadas de soluções que satisfazem às condições de contorno da equação da onda para um determinado sistema e são descritas, como visto anteriormente, em termos das constantes de Lamé. As soluções podem ser encontradas numericamente através do conjunto de dados das constantes relacionadas às propriedades dos materiais.

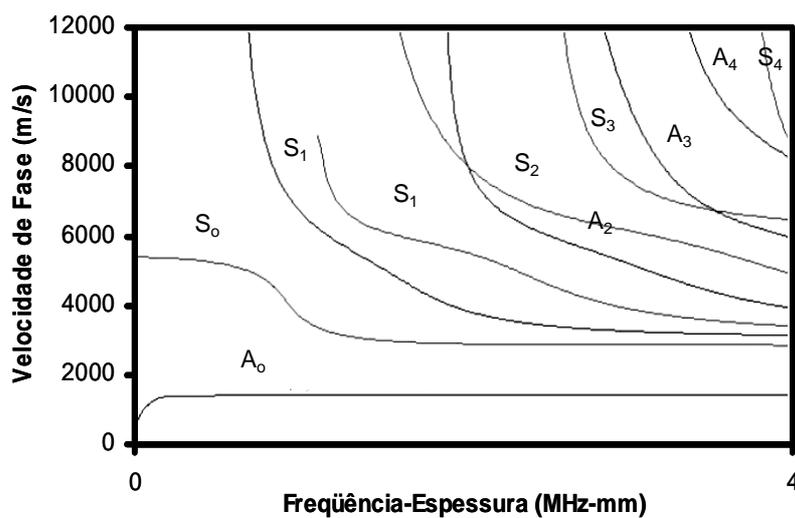


Figura 3.8 – Curva de dispersão para uma lâmina de Alumínio com 0.5 mm de espessura imersa em água. Os modos de propagação assimétricos estão legendados por A. Os modos de propagação simétricos estão legendados por S ^[45].

O princípio da inspeção utilizando as ondas de Lamb baseia-se na propagação dos modos S_0 e A_0 na faixa do produto da frequência-espessura das frequências de corte dos modos de propagação superiores ($A_1, S_1, A_2, S_2, \dots, A_n, S_n$). Para o caso da figura 3.8, é observado que para uma faixa onde o produto frequência x espessura é menor que 2 MHz.mm, só há duas possibilidades de modos de propagação de Lamb, S_0 e A_0 , os quais são frequentemente referidos como modos fundamentais de propagação longitudinal (extensional) e flexural, respectivamente. Inspeções nesta faixa do produto frequência.espessura têm potencial atrativo, pois um número pequeno de modos de propagação resulta em sinais relativamente simples. Além disso, o modo S_0 é quase não dispersivo nesta faixa com a velocidade de fase 5750 m/s, o que indica que ele pode propagar a uma longa distância sem significativa mudança na forma da onda propagada. Isto é particularmente atrativo para uso em ensaios a longas distâncias ^[39,44].

3.6 - GERAÇÃO DE ULTRA-SOM EM PLACAS A PARTIR DO LASER

A diferença básica entre uma fonte de luz qualquer e o laser é que esta última é coerente, o que significa dizer que as ondas eletromagnéticas no laser são monocromáticas, i.e., com frequência bem definida e fase também bem definida. Estas características resultam em uma série de aspectos importantes na maioria das aplicações do laser, dentre as quais capacidade de focalização e possibilidade de medição de fase da onda ^[74].

A emissão do laser baseia-se no princípio da emissão estimulada de ondas eletromagnéticas no decaimento de nível de energia dos elétrons, onde a emissão normalmente é natural e aleatória. O estímulo permite que a emissão seja controlada e produza um feixe de luz em fase e monocromático, ou seja, um feixe de laser. O comprimento de onda de laser pode variar do ultra-violeta distante (<200nm) até o infra-vermelho distante (>200 μm). As fontes de lasers podem operar no modo contínuo ou pulsado. Nas aplicações de ultra-som, podem-se utilizar vários tipos de fonte, porém de forma geral, são utilizadas para a geração as fontes pulsadas (tipo Nd:YAG-QS) e para recepção fontes contínuas de baixa potência ^[74].

O elevado poder de energia do laser focalizado sobre uma pequena área pode produzir dois fenômenos ilustrados pela figura 3.9:

- expansão termo-elástica (não-destrutivo);
- abrasão (destrutivo).

O primeiro fenômeno, figura 3.9(a), onde a densidade de potência do feixe incidente está abaixo de 10^7 W/cm^2 ^[75], gera ultra-som devido a uma expansão local limitada. A onda é gerada por uma rápida expansão e inércia térmica do material. No caso do segundo fenômeno, figura 3.9(b), se a densidade de potência do feixe incidente exceder 10^7 W/cm^2 ela gera ultra-som por momento de expansão onde o nível de potência muito mais elevado é suficiente para causar vaporização do material na superfície e a formação subsequente de plasma abaixo da superfície. Como um resultado a transferência de momento, forças de reação são criadas na direção normal à superfície do material. Conseqüentemente o sinal acústico induzido é grandemente impulsionado. Esse processo causa danos superficiais leves, mas são geralmente considerados danos não internos ^[75].

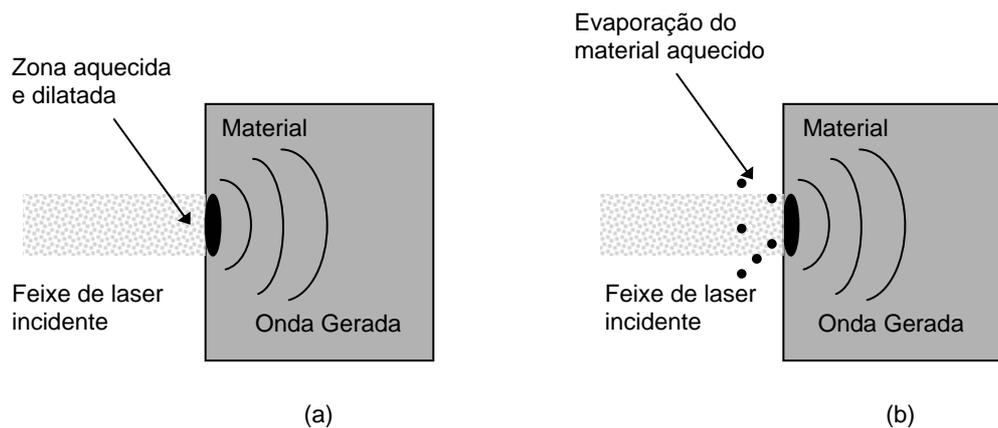


Figura 3.9 – Principais formas de geração de ultra-som por laser: (a) Regime termo-elástico; (b) Regime abrasivo ^[74].

As ondas contínuas geradas por laser têm como principal efeito a irradiação de ondas elásticas com produção de aquecimento constante sem as variações rápidas de temperatura que provocam tensões nos materiais. As ondas ultra-sônicas em banda-estreita de frequência podem ser geradas por laser modulado, desde que haja sistema local sensível de amplificação usado para aumentar a relação sinal/ruído. As características principais do laser são comprimento de onda, a energia do pulso, duração do pulso, perfil do feixe e taxa de repetição do pulso ^[76].

A detecção do ultra-som a partir do laser pode ser realizada de diversas formas. Os detectores geralmente usados medem variação da intensidade óptica por um fotodetector. Nas técnicas interferométricas a onda elástica modula a fase da luz. O interferômetro é usado para demodular a intensidade da flutuação do sinal monitorado por um foto-detector. Os interferômetros a laser podem ser projetados para medir movimentos fora do plano e/ou no plano. Alguns interferômetros são sensíveis aos deslocamentos superficiais, enquanto outros são sensíveis à velocidade de superfície. A desvantagem principal associada ao uso de interferômetros a laser na detecção da onda de Lamb é o custo elevado e a dificuldade de alinhamento apropriado.

Na deflexão do feixe óptico a variação da intensidade é medida diretamente. A onda elástica detectada modula a superfície e varia a quantidade de luz que alcança um fotodetector. Os sistemas ópticos de deflexão do feixe de luz são consideravelmente menos caros e mais fáceis de se operarem, mas menos sensíveis. Os vibrômetros a laser medem os movimentos da superfície fora do plano, utiliza o fenômeno do deslocamento Doppler a fim de obter a velocidade da vibração na superfície. São

projetados e usados extensamente para medidas de vibração em muitas aplicações da engenharia. A faixa de frequência dos vibrômetros a laser comerciais usados na análise de vibração é significativamente mais baixa do que a dos interferômetros usada em aplicações clássica da física. Esta é provavelmente a razão principal porque os vibrômetros a laser comerciais não são muito utilizados em técnicas ultra-sônicas [75].

Para a geração da onda de Lamb, a fonte termo-elástica geralmente vai prover um componente no plano de maior movimento que o da fonte de plasma, favorecendo assim a geração de modos de propagação simétricos. Esta situação é inversa para a geração de movimentos fora do plano onde a força normal dominante produzida pela fonte de plasma proverá efetivamente modos de propagação assimétricos [75, 76].

3.7 – TRANSFORMADA DE FOURIER BI-DIMENSIONAL

Como é de conhecimento geral, a Transformada de Fourier unidimensional é uma ferramenta matemática para identificar ou distinguir diferentes frequências senoidais (e suas respectivas amplitudes) que se combinam para a formação de uma onda arbitrária. A transformada de Fourier bi-dimensional para um sinal de onda descrito por uma função $s(t, x)$, propagando no tempo t e na direção x , transforma o espaço (t, x) no espaço (ω, k) do número de onda k e frequência angular ω , é definida por:

$$T[s(t, x)] = T(\omega, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t, x) e^{-i(\omega t + kx)} dt dx, \quad (3.61)$$

e a sua transformada inversa é:

$$T^{-1}[T(\omega, k)] = s(t, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T(\omega, k) e^{i(\omega t + kx)} d\omega dk. \quad (3.62)$$

Para o caso de sinais ultra-sônicos, a maior vantagem da aplicação da Transformada Rápida de Fourier bi-dimensional, FFT-2D, no processamento dos sinais capturados por varredura de um corpo de prova pela técnica que utiliza laser na geração e detecção das ondas de Lamb, é a separação e visualização das ondas incidentes e refletidas na dimensão (ω, k) que contém as curvas de dispersão como mostra a figura 3.10.

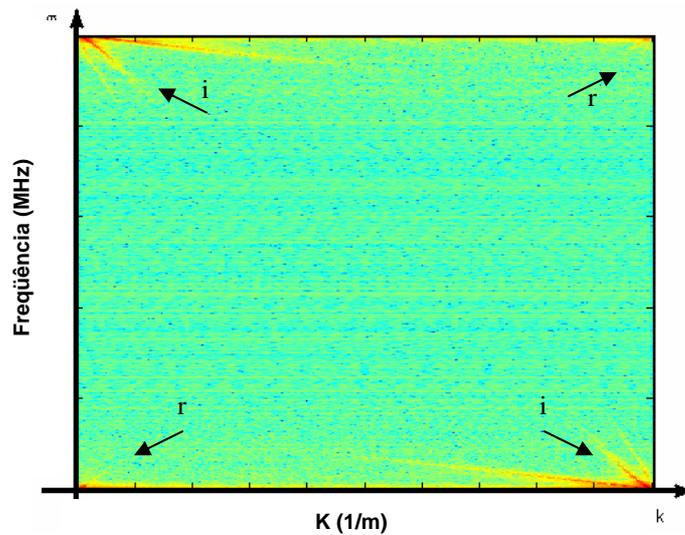


Figura 3.10 – Exemplo de aplicação da FFT-2D nos sinais capturados por varredura de um corpo de prova pela técnica que utiliza o laser na geração dos modos propagação das ondas de Lamb. As ondas incidentes (i) e refletidas (r) são visualizadas separadamente.

Observa-se na figura 3.10 que as imagens das ondas incidentes e refletidas apresentam outras espelhadas. Isto é decorrente das propriedades da Transformada Rápida de Fourier e pelo fato do espaço ser bi-dimensional.

A separação das ondas incidentes das refletidas deve-se ao fato destas ondas propagam em uma mesma direção no espaço, mas em sentidos opostos. Portanto, em termos de onda $s(t,x)$ e considerando que a propagação ocorre na direção X, podemos descrever a onda que propaga no sentido positivo como:

$$s(t,x) = e^{i(\omega t - kx)}, \quad (3.63)$$

e, a onda que propaga no sentido negativo da direção X como:

$$s(t,x) = e^{i(\omega t + kx)}. \quad (3.64)$$

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é composto de duas seções: uma que descreve a confecção dos corpos de prova com e sem defeitos, envolvendo os materiais e as técnicas de produção; e a outra apresenta as técnicas de inspeção utilizadas nos LFMs, bem como a simulação das curvas de dispersão necessárias à seleção de modos de propagação específicos das ondas de Lamb nos ensaios ultra-sônicos.

4.1 - CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados na pesquisa foram chapas de alumínio e LFMs. Em relação à fibra presente nos pré-impregnados, foram confeccionados dois tipos de LFMs:

- Laminados de alumínio e epóxi reforçado por fibras de vidro;
- Laminados de alumínio e epóxi reforçado por fibra de carbono.

Considerando agora a direção das fibras em relação à direção de laminação do alumínio, os corpos de prova (CP) de LFMs foram produzidos segundo duas configurações diferentes:

- Laminados com fibras paralelas a direção de laminação do alumínio – CP1 e CP3, ilustrados pela figura 4.1;

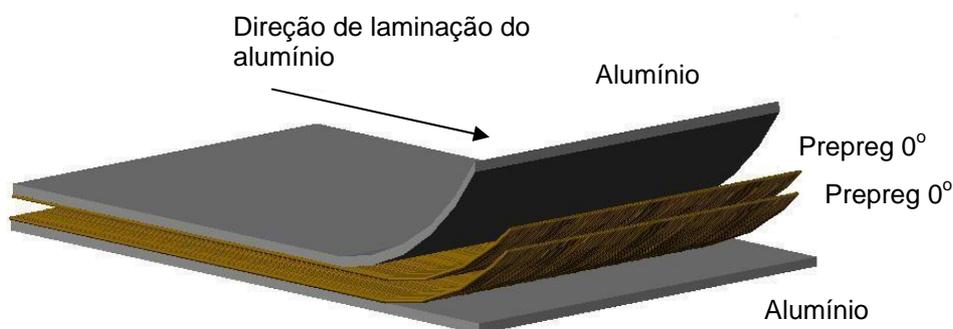


Figura 4.1 – CP1 e CP3 contendo duas camadas de prepreg com fibras paralelas à direção de laminação do alumínio.

- Laminado com fibras perpendiculares à direção de laminação do alumínio – CP4, ilustrado pela figura 4.2.

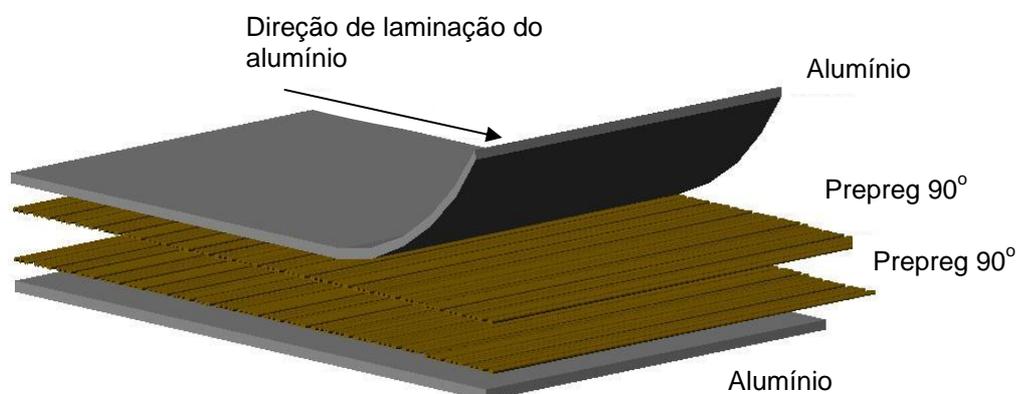


Figura 4.2 – CP4 contendo duas camadas de prepreg com fibras perpendiculares à direção de laminação do alumínio.

Foram utilizados na pesquisa 9 corpos de prova de LFM 2/1 com as principais características presentes na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Principais características dos corpos de prova de LFM.

LFM 2/1	TIPO DE DEFEITO	CONFIGURAÇÃO DO PREPREG	PREPREG UTILIZADO	DIMENSÕES
CP1_SD	Sem defeito	0°/0°	Fibra de vidro	100 mm x 100 mm x 1,34 mm
CP1_F	Fratura de fibra			
CP1_D	Delaminação			
CP3_SD	Sem defeito	0°/0°	Fibra de carbono	300 mm x 300 mm x 1,34 mm
CP3_F	Fratura de fibra			
CP3_D	Delaminação			
CP4_SD	Sem defeito	90°/90°		
CP4_F	Fratura de fibra			
CP4_D	Delaminação			

4.1.1 - LAMINADOS DE ALUMÍNIO E EPÓXI REFORÇADO POR FIBRAS DE VIDRO

Na confecção do corpo de prova CP1, produzidos nas instalações da Zamec Usinagem Ltda., Rio de Janeiro, foram utilizados os seguintes materiais:

- Chapas de alumínio com dimensões de 100 mm x 100 mm x 0,5 mm, e composição apresentada pela tabela 4.2;
- Lâminas de prepreg de fibra de vidro S₂/epóxi uni-direcional (UD) Hexply® 6376, com dimensões de 100 mm x 100 mm x 0,17 mm fabricadas pela Hexcel Corporation. Os dados das propriedades do prepreg^[23] são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Composição química da chapa de Alumínio comercial ^[77].

elemento	Al	Cu	Fe/Si	Mg	Mn	Ti	Zn	Cr	Outros
%peso	99,00	0,05	<1,00	<1,00	0,05	0,00	0,10	0,00	0,00-0,15

Tabela 4.3 – Propriedades do prepreg com fibra de vidro unidirecional S₂ / epóxi ^[3].

	Dimensão	PREPREGUD S ₂ (V _f =60%)
Módulo de Young, E ₁	[GPa]	54
Módulo de Young, E ₃	[GPa]	9,4
Coefficiente de Poisson, ν ₁₂	----	0,0575
Coefficiente de Poisson, ν ₂₃	----	0,33
Módulo de Cisalhamento, G ₁₃	[GPa]	5,55
Densidade, ρ	[g/cm ³]	1,98

As chapas de alumínio, com dimensões especificadas na figura 4.3 foram jateadas com óxido de alumínio de 80 mesh para aumentar a adesão entre o alumínio e o prepreg. Em seguida, foram limpas com acetona em aparelho de ultra-som por 10 minutos. Após foram armazenadas em dessecador com sílica gel até o empilhamento. Durante todo o processo de confecção foram utilizadas luvas de látex para impedir que a oleosidade das mãos passasse para as lâminas dificultando uma boa aderência entre as lâminas. Para o caso dos corpos de prova com defeito, estes foram fabricados e posicionados de acordo com a figura 4.3.

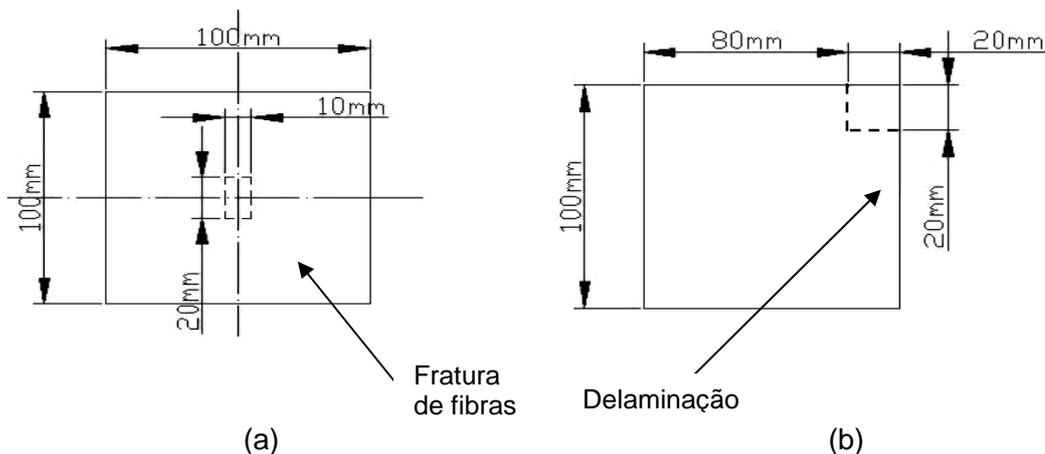


Figura 4.3 – Dimensões e posicionamento dos defeitos nos corpos de prova LFM de fibra de vidro: (a) fratura de fibra; (b) delaminação.

A fratura de fibras foi simulada pelo corte e remoção do prepregna área indicada pela figura 4.3 (a) antes do empilhamento. A delaminação foi simulada pela adição de fita teflon na área indicada pela figura 4.3 (b). Após a cura o teflon foi retirado.

Foi utilizado um sistema para o empilhamento e prensagem, necessário a confecção dos corpos de prova, figura 4.4. Os parâmetros do ciclo de cura do prepreg de fibra de vidro fornecidos pelo fabricante ^[45] são: aquecimento numa taxa de 2-3 °C/min até atingir a temperatura de 175 °C mantendo este valor por 2 horas a uma pressão de 700 kN/m² para promover a cura total.

Numa primeira etapa, o empilhamento foi realizado tendo como referencia a direção de laminação da chapa de alumínio (ver figuras 4.1 e 4.2). Após o empilhamento, a prensagem mecânica no sistema ilustrado pela figura 4.4 foi realizada, utilizando um torquímetro manual acoplado ao eixo central da prensa mecânica para gerar o torque necessário à obtenção de uma pressão equivalente a 700 kN/m². A fim de se evitar a formação de bolhas no interior do LFM, o sistema foi mantido sob vácuo de -550 mm de Hg por 30 min para a retirada de produtos voláteis liberados pelo início das reações de cura do prepreg (início da cura em t=23 °C). Em seguida, o sistema foi colocado no interior do forno (modelo N1100, Jung®, Santa Catarina), com controle de rampa de temperatura para realizar o ciclo de cura.

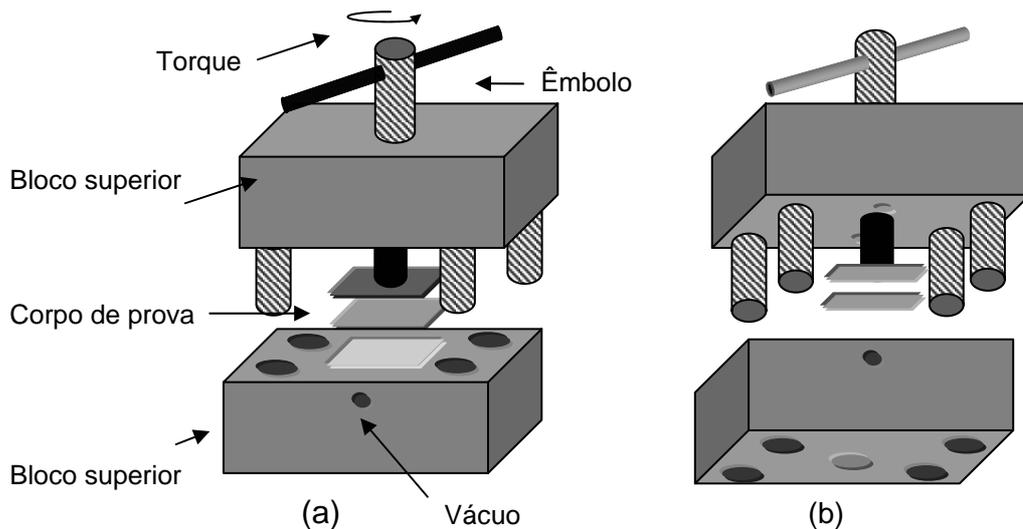


Figura 4.4 – Sistema de empilhamento e prensagem mecânica dos corpos de prova CP1: (a) vista superior; (b) vista inferior.

4.1.2 - LAMINADOS DE ALUMÍNIO E EPÓXI REFORÇADO POR FIBRAS DE CARBONO

Na confecção dos corpos de prova CP3 e CP4, produzidos nos laboratórios do Departamento de Mecânica dos Materiais e Construções da Universidade Livre de Bruxelas (VUB), Bélgica, foram utilizados os seguintes materiais:

- Chapas de alumínio com dimensões de 300 mm x 300 mm x 0,5 mm, e composição apresentada pela tabela 4.2;
- Lâminas de prepregde fibra de carbono/epóxi uni-direcional (UD) Fibredux 920CX-TS-5-42, com dimensões de 300 mm x 300 mm x 0,17 mm fabricadas pela Ciba-Geigy Corporation. Os dados das propriedades do prepreg^[78] são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Propriedades do prepreg (UD) com fibra de carbono/ epóxi ^[78].

	Dimensão	PREPREG UD ($V_f=60\%$)
Módulo de Young, E_1	[GPa]	112
Módulo de Young, E_3	[GPa]	8,06
Coefficiente de Poisson, ν_{13}	----	0,03
Coefficiente de Poisson, ν_{23}	----	0,39
Módulo de Cisalhamento, G_{13}	[GPa]	3,95
Densidade, ρ	[g/cm³]	1,58

As chapas de alumínio, com dimensões especificadas na figura 4.5 receberam um tratamento superficial com lixas de 100 e 150 mesh para aumentar a adesão entre o alumínio e o prepreg. Em seguida, foram limpas com acetona e ciclo-hexano. Logo após foram armazenadas em dessecador com sílica gel até o empilhamento. Durante todo o processo de confecção foram utilizadas luvas de látex para impedir que a oleosidade das mãos passasse para as lâminas dificultando uma boa aderência entre as lâminas. Para o caso dos corpos de prova com defeito, estes foram fabricados e posicionados de acordo com a figura 4.5.

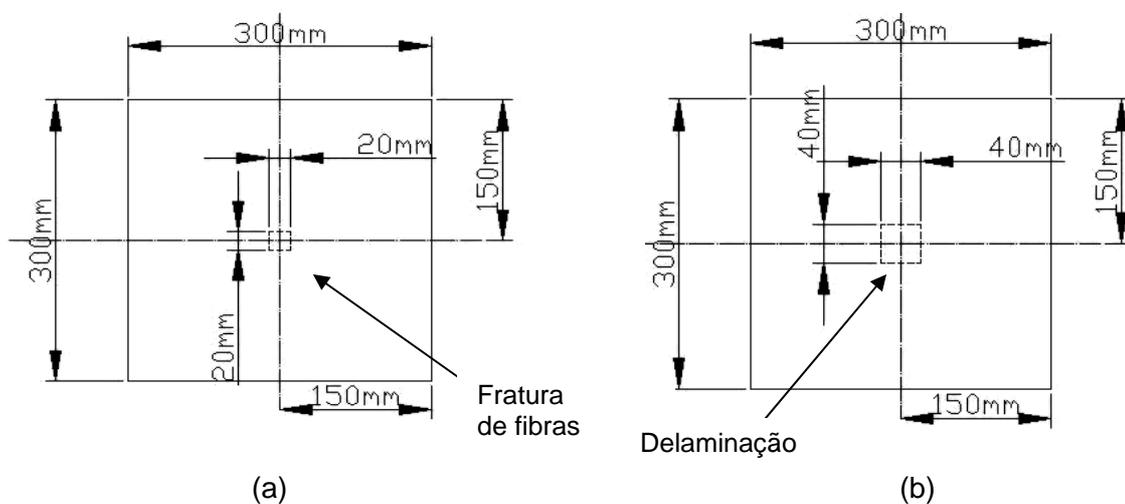


Figura 4.5 - Dimensões e posicionamento dos defeitos nos corpos de prova LFM de fibra de carbono: (a) fratura de fibra; (b) delaminação.

Assim como no corpo de prova CP1, a fratura de fibras foi simulada pelo corte e remoção do prepreg na área indicada pela figura 4.5 (a) antes do empilhamento. A delaminação foi simulada pela adição de *spray* de teflon na área indicada pela figura 4.5 (b). Após empilhamento, os corpos de prova foram curados em autoclave (marca Scholz®, Alemanha), segundo o ciclo de cura ilustrado pelo gráfico da figura 4.6.

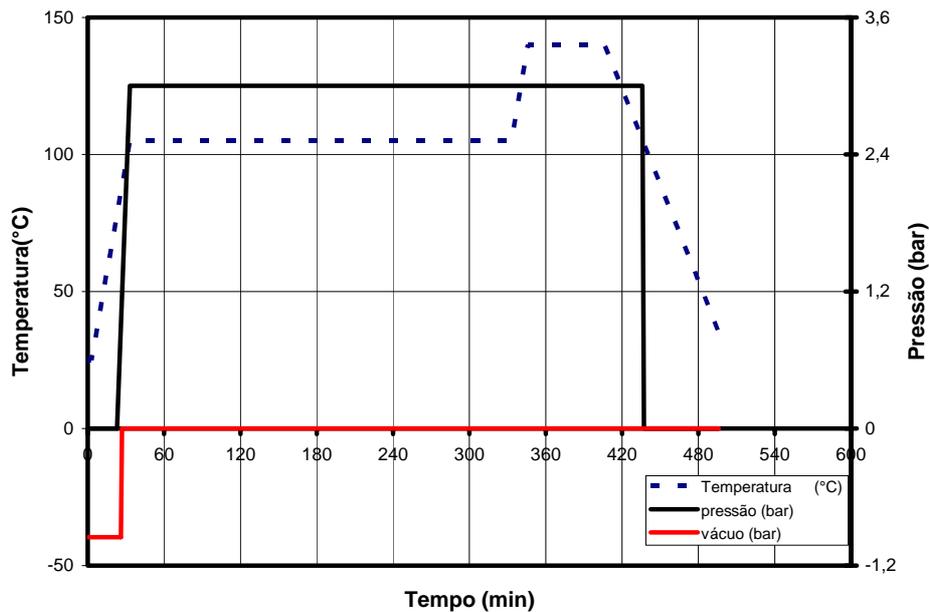


Figura 4.6 – Ciclo de cura para prepreg de fibra de carbono Fibredux® 920CX-TS-5-42. São mostrados os valores dos parâmetros temperatura, pressão e vácuo em função do tempo para a cura total do prepreg^[79].

4.1.3 – CHAPAS DE ALUMÍNIO

Chapas de Alumínio de mesma composição das utilizadas nos corpos de prova de LFM e mesmas dimensões dos corpos de prova CP3 e CP4 foram utilizadas nos ensaios de ultra-som por imersão empregando transdutores piezo-elétricos, para análise e comparação entre os resultados simulados e obtidos experimentalmente. A figura 4.7 ilustra a chapa de alumínio com defeito utilizadas na pesquisa.

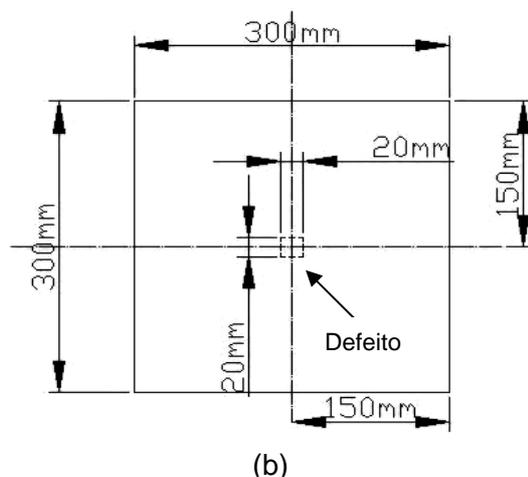


Figura 4.7 – Chapas de alumínio com espessura de 0,5 mm e furo em forma de quadrado simulando o defeito.

4.2 – TÉCNICAS APLICADAS NA PESQUISA

A fim de investigar a presença dos defeitos implantados nos corpos de prova foram empregadas como principais técnicas as ultra-sônicas por imersão e por contato com sapata de perspex nos diferentes LFMs. A idéia da utilização de técnicas secundárias tais como a fotografia Schlieren e *probe laser scanning line* não teve como objetivo a comparação entre as técnicas. O diagrama da figura 4.8 ilustra as técnicas utilizadas na pesquisa:

- Simulação das curvas de dispersão dos modos de propagação de Lamb referentes aos corpos de prova inspecionados por ensaios ultra-sônicos por contato e por imersão;
- Técnica ultra-sônica de contato com acoplamento por sapata de perspex, nos corpos de prova de LFMs de fibra de carbono;
- Técnica ultra-sônica por imersão, nos corpos de prova de LFMs de fibra de carbono e em chapas de alumínio;
- Técnica de Fotografia Schlieren, utilizada na investigação dos defeitos presentes nos corpos de prova de LFMs de fibra de vidro;
- Técnica *probe laser scanning line*, nos corpos de prova LFMs de fibra de carbono.
- Varredura ultra-sônica C-scan, realizada em todos os corpos de prova de LFMs.

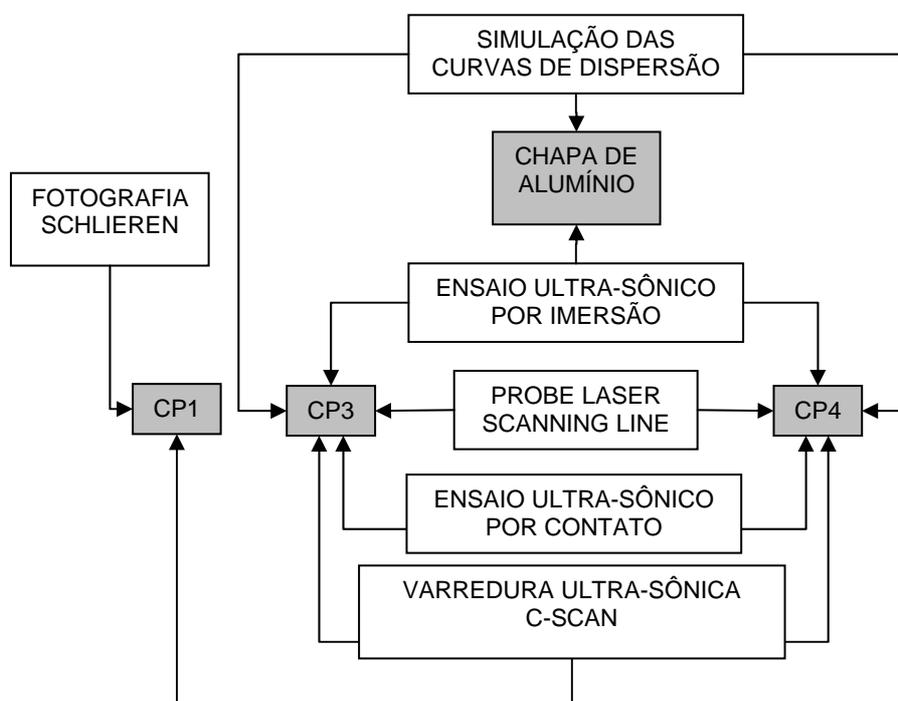


Figura 4.8 – Diagrama esquemático das técnicas empregadas nos corpos de prova.

Na varredura ultra-sônica C-scan, as ondas elásticas propagadas foram ondas longitudinais pulsáteis através da espessura dos corpos de prova imersão. Essa técnica é considerada técnica complementar, e devido a isto, os resultados, a descrição da metodologia adotada e as imagens C-scan obtidas para cada corpo de prova estarão inseridas no apêndice A. As imagens obtidas serão utilizadas apenas numa análise comparativa com os resultados obtidos utilizando as ondas de Lamb.

A técnica de Fotografia Schlieren e as inspeções por varredura C-scan foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Construção e Produção Mecânica da Universidade de Gent/Bélgica. A técnica *probe laser scanning line* foi realizada no laboratório de Acústica e Termo-Física do Departamento de Astronomia e Física da Universidade de Leuven/Bélgica. As simulações e ensaios ultra-sônicos por contato e por imersão foram realizados nos laboratórios do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos) e do Programa de Engenharia Biomédica (Laboratório de Ultra-Som) da COPPE/UFRJ.

4.2.1 – SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE DISPERSÃO PARA OS MODOS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE LAMB

Para o traçado das curvas de dispersão foi utilizado o programa computacional Disperse® [45] projetado para o cálculo das curvas de dispersão para estruturas multicamadas, desenvolvido pelo grupo de pesquisa de ensaios não-destrutivos do Departamento de Engenharia Mecânica do Imperial College (Londres). Parâmetros tais como velocidade de fase, velocidade de grupo, ângulo de incidência do feixe sônico, número de onda, para uma dada frequência de interesse, puderam ser obtidos teoricamente.

4.2.1.1 – ENTRADA DE DADOS RELATIVOS ÀS PROPRIEDADES DIMENSÕES FÍSICAS DOS MATERIAIS DOS CORPOS DE PROVA NO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Em função da velocidade do som ser dependente das propriedades do meio em que a onda propaga, além da espessura da camada, foram necessários os dados dos valores de densidade, propriedades elásticas dos materiais que compõe o LFM como também a direção de propagação da onda.

(A) Chapa de alumínio

Para o caso de material isotrópico, como as propriedades físicas são as mesmas em todas as direções, além da espessura da chapa e da densidade, foram necessários os valores das velocidades longitudinal e transversal mostrados pela figura 4.9.

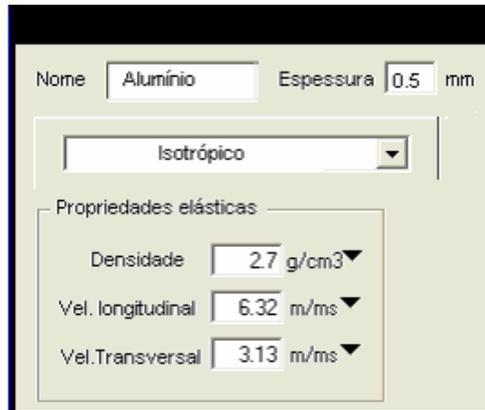


Figura 4.9 - Janela do programa de simulação mostrando a entrada de dados para a chapa de alumínio (adaptada da janela original, em inglês) ^[45].

(B) Lâmina de prepreg de fibras de carbono /epóxi unidirecional

Para o caso de material anisotrópico, uma vez que as constantes elásticas estão relacionadas ao direcionamento cristalográfico, foi necessária a adoção de um sistema de orientação dos eixos cartesianos. Para tal, foram feitas quatro considerações:

I - A propagação da onda ocorre na direção Z (direção de laminação do alumínio) como mostra a figura 4.10.

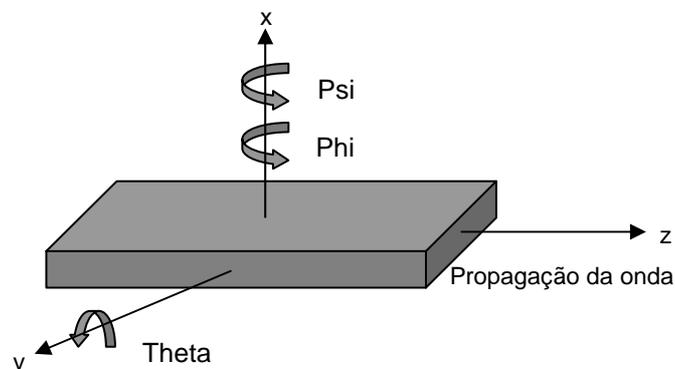


Figura 4.10 - Sistema de orientação adotado para a propagação da onda de Lamb.

II - A placa de prepreg unidirecional é transversalmente isotrópica em relação ao eixo X (caso particular de anisotropia), com ângulos de rotação espacial $\psi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$ e $\phi=0^\circ$, como ilustra a figura 4.11(a). Neste caso existe apenas uma direção de anisotropia, as outras duas são isotrópicas e equivalentes entre si^[64]. A direção das fibras é perpendicular à direção de propagação da onda

III - Para o caso do corpo de prova CP3, a propagação do som ocorre paralelamente às fibras, quando se rebate a placa de prepreg fazendo a rotação do ângulo θ em 90° , como mostra a figura 4.11(b).

IV - Para o caso do corpo de prova CP4, a propagação do som ocorre perpendicularmente as fibras quando se aplica novo rebatimento a placa de prepreg fazendo a rotação do ângulo ϕ em 90° , como mostra a figura 4.11(c).

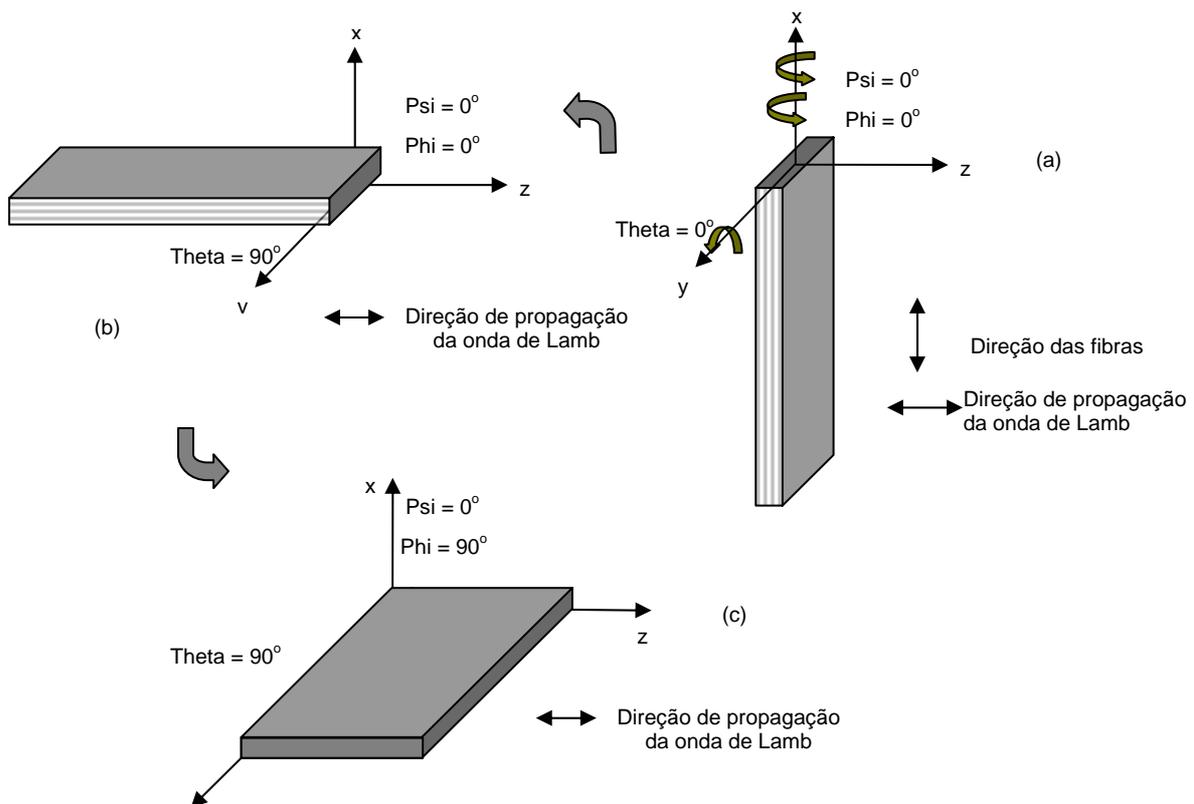


Figura 4.11 – (a) Eixos de coordenadas cartesianas para placa de prepreg transversalmente isotrópica em relação ao eixo x. (b) Rebatimento espacial da placa de prepreg nos corpos de prova CP3 em relação a direção de propagação das ondas de Lamb. (c) Rebatimento espacial da placa de prepreg nos corpos de prova CP4.

ser utilizada nos experimentos práticos de forma a garantir apenas a propagação de modos fundamentais das ondas de Lamb A_0 e S_0 . Em seqüência, uma análise da curva de dispersão do ângulo de incidência do feixe sônico em função da faixa de freqüência, indicou o ângulo para a geração do modo de propagação específico da onda de Lamb a ser utilizado nas inspeções para um determinado corpo de prova e configuração de ensaio.

Conforme poderá ser verificado posteriormente, nas figuras 4.15, 4.17, 4.19, 4.21 e 4.23, em função da utilização de transdutores de 1 MHz e de gerador de pulso com filtros de freqüência nos ensaios experimentais descritos na seção 4.2.4, foi considerada como faixa de freqüência de interesse a região compreendida entre 0,55 MHz e 1 MHz.

4.2.1.2.1 – ENSAIOS DE IMERSÃO

(A) Chapa de alumínio:

A curva de dispersão gerada pelo Disperse[®] para a chapa de alumínio com 0,5 mm de espessura ilustrada pela figura 4.14, pode-se observar que apenas os modos de propagação fundamentais das ondas de Lamb, S_0 e A_0 , existem para valores de freqüência menores que 3MHz.

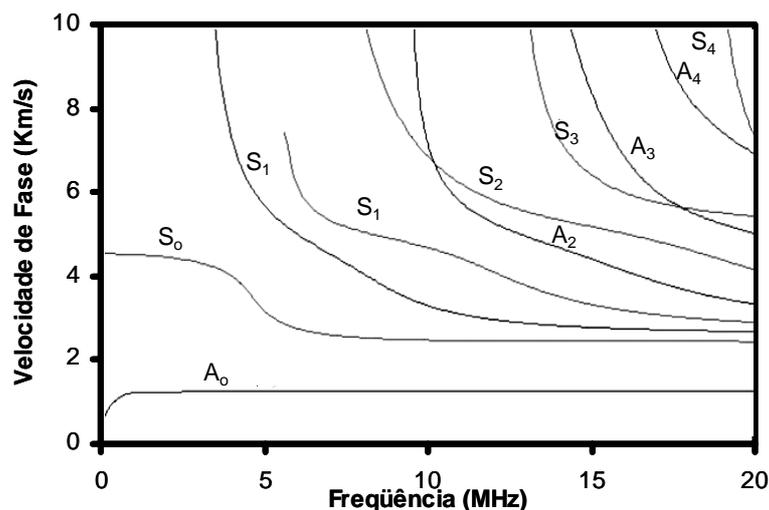


Figura 4.14 - Curva de dispersão simulada para o alumínio com espessura de 0,5 mm em ensaio de imersão: Velocidade de fase x freqüência, considerando os modos de propagação A_0, \dots, A_3 e S_0, \dots, S_4 ^[45].

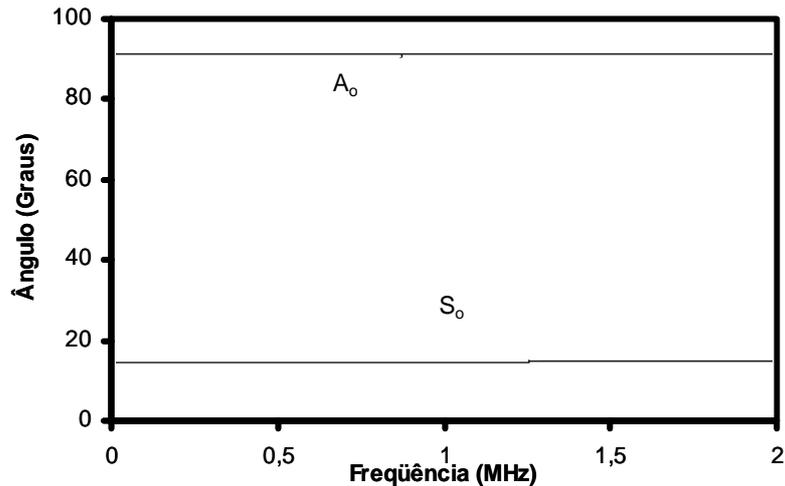


Figura 4.15 – Curva de dispersão simulada para o alumínio com espessura de 0,5 mm em ensaio de imersão: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 [45].

Na simulação, a curva de dispersão para os ângulos de incidência do feixe ultra-sônico em função da frequência, figura 4.15, para o modo de propagação A_0 , indica um ângulo de valor constante igual a 90° . O Disperse[®] considera esse valor para todos os corpos de prova cujos modos de propagação possuem velocidades de fase menor que a velocidade de fase do mesmo modo do material que compõe o meio em contato com o corpo de prova no local de incidência da onda. Isso decorre da Lei de Snell, quando a velocidade da onda no meio onde se propaga a onda incidente é maior do que aquela do meio onde a onda é transmitida. Neste caso, o $\text{sen } \theta_i > 1$, sendo θ_i o ângulo de incidência. Por isso, foi selecionado para os ensaios ultra-sônicos de imersão e contato o modo de propagação de Lamb S_0 , para o qual o meio é não-dispersivo na faixa de frequência de interesse, como mostra a figura 4.15.

(B) Corpo de prova CP3

Para materiais multi-camadas, o Disperse[®], com exceção dos modos de propagação fundamentais S_0 e A_0 , não distingui se os modos de propagação possuem movimentos simétricos ou assimétricos então, assim como em [47], os modos de propagação superiores foram legendados por H.

A simulação para este corpo de prova apresenta, de forma imprecisa, os modos de propagação das ondas de Lamb S_0 , H_1 e H_2 conjuntamente, como mostra a curva de

dispersão ilustrada na figura 4.16. A figura 4.17 mostra a curva de dispersão para o ângulo de incidência do feixe sônico em função da frequência.

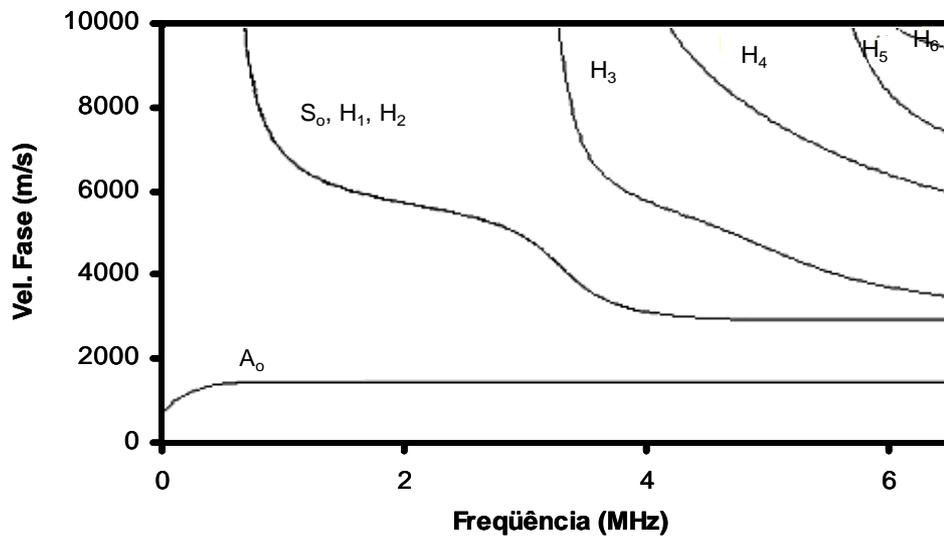


Figura 4.16 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação $A_0, S_0, H_1, \dots, H_6$ [45]

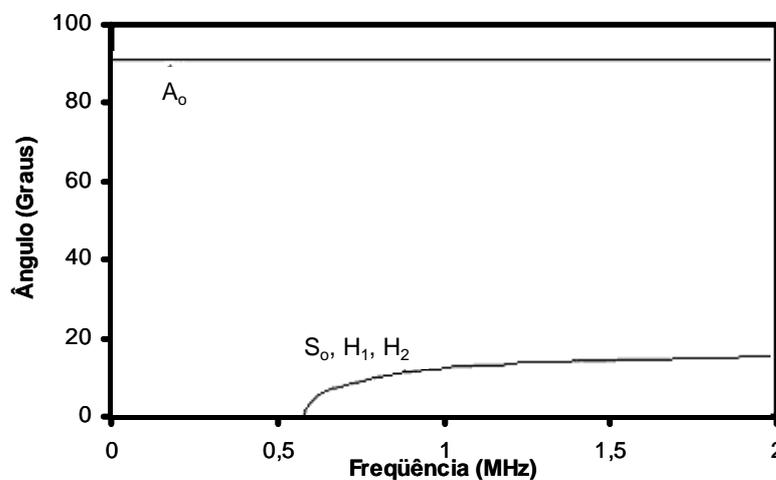


Figura 4.17 – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0, S_0, H_1 e H_2 [45]

(C) Corpo de prova CP4

A figura 4.18 ilustra a curva de dispersão para o corpo de prova CP4 em imersão. Neste caso, para excitar somente dos modos de propagação fundamentais das ondas de Lamb, seria necessário fazer as inspeções numa faixa de frequência abaixo de 0,5

MHz. Acima deste valor, provavelmente o modo de propagação H_1 também será excitado. Com um controle fino do ângulo de incidência, conforme mostra a curva de dispersão ilustrada pela figura 4.19 é possível excitar somente o modo de propagação S_0 .

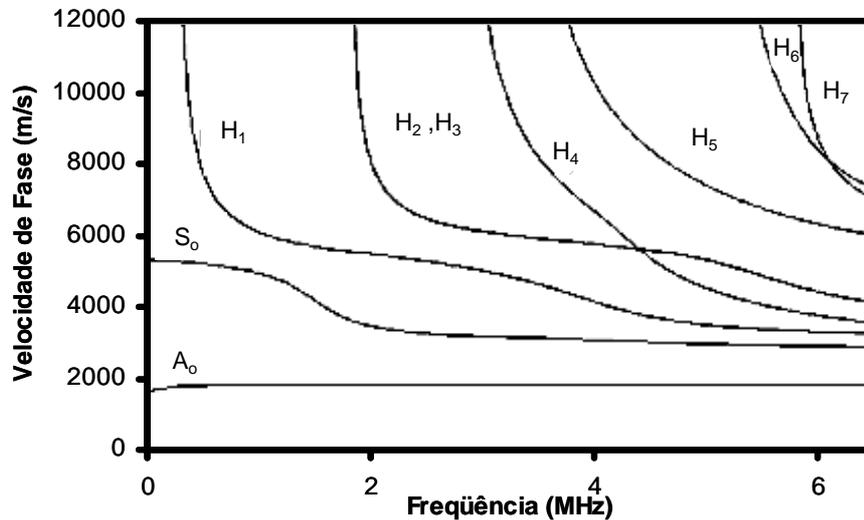


Figura 4.18 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação $A_0, S_0, H_1, \dots, H_7$ [45].

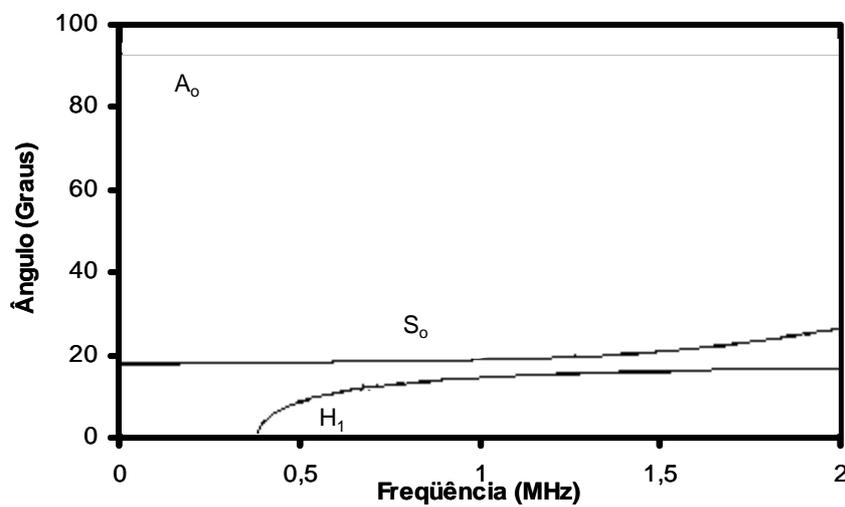


Figura 4.19 – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em imersão: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0, S_0 e H_1 [45].

A tabela 4.5 mostra os valores para os ângulos de incidência teóricos, na faixa de frequência de 0,55 a 1,0 MHz, para cada corpo de prova em imersão. Na tentativa de

gerar o modo de propagação S_0 numa faixa não-dispersiva, foram selecionados os seguintes ângulos para a inspeção:

- Chapa de alumínio – 16^0 ;
- CP3 – $10,5^0$;
- CP4 – $17,5^0$.

Tabela 4.5 – Ângulos de incidência para geração do modo de propagação S_0 na faixa de frequência entre 0,55 e 1,0 MHz por ensaio de imersão de chapa de alumínio com 0,5 mm de espessura, LFM/CP3 e LFM/CP4 com 1,34 mm de espessura.

Frequência (MHz)	S_0 - Ângulos de incidência (0) (ensaios por imersão)		
	Chapa de Alumínio	CP3	CP4
0,55	16,0	-----	17,5
0,60	16,0	0,5	17,5
0,65	16,0	6,0	17,5
0,70	16,0	8,0	17,5
0,75	16,0	9,0	17,5
0,80	16,0	10,0	17,5
0,85	16,0	10,5	17,5
0,90	16,0	11,5	17,5
0,95	16,0	12,0	18,0
1,00	16,0	12,5	18,0

4.2.1.2.2– ENSAIOS POR CONTATO COM SAPATA DE PERSPEX

(A) Corpo de prova CP3

A curva de dispersão ilustrada pela figura 4.20 mostra que os modos de propagação fundamentais das ondas de Lamb, S_0 e A_0 , propagam para valores de frequência menores que 1MHz separadamente dos modos de propagação superiores

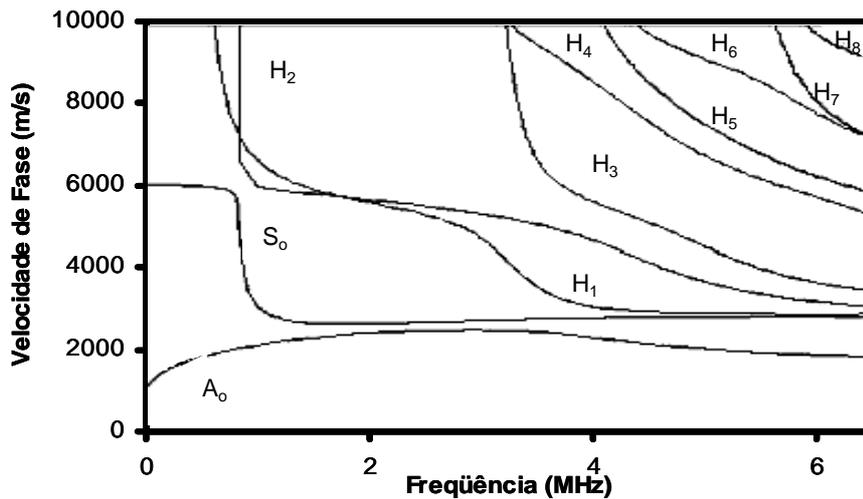


Figura 4.20 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato com sapata de perspex: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação A_0 , S_0 , H_1, \dots, H_8 ^[45].

A figura 4.21 ilustra a curva de dispersão para os ângulos de incidência para a faixa de frequência de 0 a 2 MHz. Observa-se que para uma frequência acima de 1,4 MHz, o modo de propagação S_0 apresenta o mesmo comportamento que o modo de propagação A_0 .

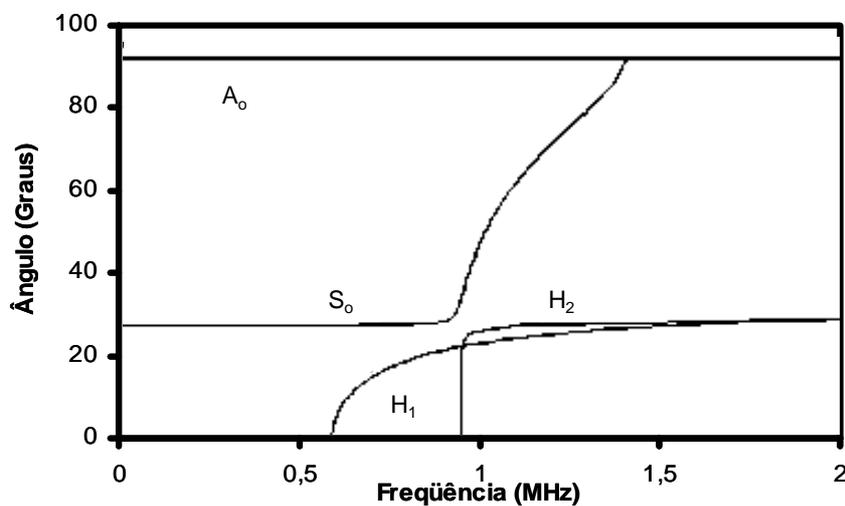


Figura 4.21 – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm por contato com sapata de perspex: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 , H_1 e H_2 ^[45].

(B) Corpo de prova CP4

H₂

A curva de dispersão ilustrada pela figura 4.22 mostra que os modos de propagação fundamentais das ondas de Lamb, S₀ e A₀, propagam separados dos modos de propagação superiores para valores de frequência menores que 1MHz.

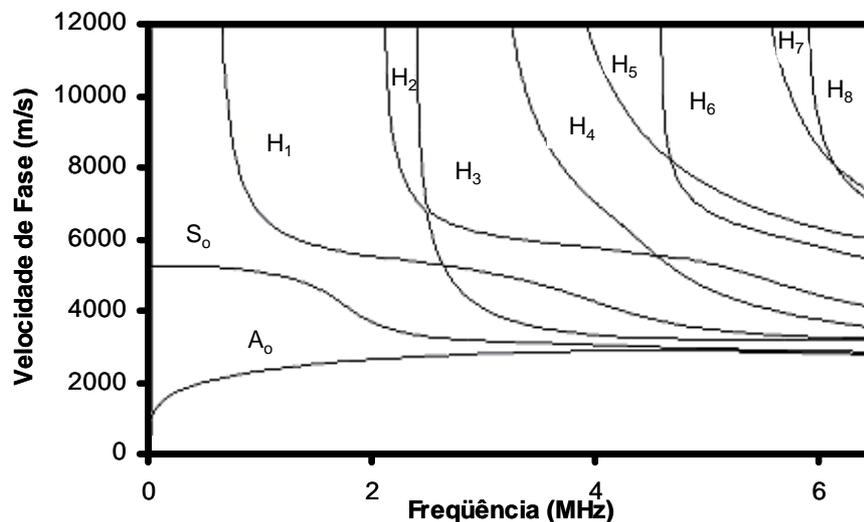


Figura 4.22 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato com sapata de perspex: Velocidade de fase x frequência, considerando os modos de propagação A₀, S₀, H₁,...,H₈ [45].

Na figura 4.23 a curva de dispersão para os ângulos de incidência na faixa de frequência de 0 a 2 MHz. Na uma frequência acima de 0,8 MHz, observa-se que o modo de propagação H₁ é visualizado, mas com ângulo de incidência para a sua geração bem abaixo do ângulo de geração do modo de propagação S₀.

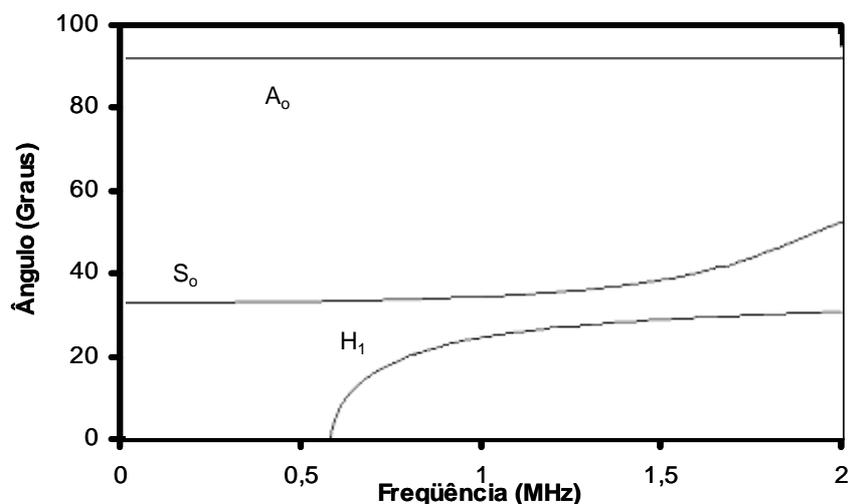


Figura 4.23 – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm por contato com sapata de perspex: ângulo de incidência do feixe ultra-sônico na faixa de frequência de 0 a 2,0 MHz, com a presença dos modos de propagação A₀, S₀ e H₁ [45].

A tabela 4.6 mostra os valores para os ângulos de incidência teóricos, na faixa de frequência de 0,55 a 1,0 MHz, para cada corpo de prova em imersão. Na tentativa de gerar o modo de propagação S_0 numa faixa não-dispersiva, foram selecionados os seguintes ângulos para a inspeção:

- CP3 – 27,5°;
- CP4 – 34°.

Tabela 4.6 – Ângulos de incidência para geração do modo de propagação S_0 na faixa de frequência entre 0,55 e 1,0 MHz por ensaio de contato com sapata de perspex em LFM/CP3 e LFM/CP4 com 1,34 mm de espessura.

Frequência (MHz)	S_0 - Ângulos de incidência (°) (ensaios por contato com sapata de perspex)	
	CP3	CP4
0,55	27,0	33,0
0,60	27,0	33,0
0,65	27,0	33,0
0,70	27,0	33,0
0,75	27,0	33,0
0,80	27,5	33,0
0,85	27,5	33,5
0,90	28,0	33,5
0,95	31,0	34,0
1,00	46,0	34,0

4.2.2 - INSPEÇÃO ULTRA-SÔNICA UTILIZANDO TRANSDUTORES DE CONTATO E DE IMERSÃO

Foram inspecionados os corpos de prova CP3_SD, CP3_F, CP3_D, CP4_SD, CP4_F, CP4_D e chapa de alumínio (este última apenas por imersão). Na seleção dos transdutores, foram levadas em consideração as curvas de dispersão das ondas de Lamb simuladas pelo *software* Disperse[®] [45], considerando os sistemas em imersão e por contato. Através da análise das curvas de dispersão simuladas, foi selecionada a frequência e o ângulo de incidência dos transdutores utilizados para a geração do modo de propagação S_0 em cada corpo de prova.

Para a geração e recepção do ultra-som foi usada uma placa geradora de pulso TB1000, Matec, EUA) inserida num *slot* de um micro-computador tipo PC. Esta placa

permite a excitação na forma de *tone-burst* com ajuste da frequência e do número de ciclos do pulso. A placa possui ainda um pré-amplificador na resposta até 20 MHz e ganho ajustável de 0 a 70 dB com incrementos de 0.5 dB. Os sinais foram capturados através de um osciloscópio digital (TDS420A, Tektronix, Beverton, EUA) numa taxa de frequência de amostragem de 5 a 10 MHz e salvos em disquetes sendo posteriormente armazenados em um computador.

4.2.2.1 – INSPEÇÃO POR IMERSÃO

A inspeção foi feita na configuração transmissão-recepção utilizando transdutores de imersão de 1 MHz (H1N, Krautkramer, Alemanha) com frequência central de 1,06 MHz e largura de banda 0,52 MHz (ver figura 4.24). O esquema experimental é mostrado na figura 4.25. A varredura da chapa foi realizada da seguinte forma: em relação à direção Y ocorreu num passo de 2 mm percorrendo um total de 160 mm para a chapa de alumínio e 80 mm para os LFMs, distância suficiente para varrer uma área com e sem defeito. Em cada passo, foram colhidos sinais em duas posições do transdutor-receptor em relação à direção X, num intervalo Δx de 5 mm. A figura 4.26 ilustra o esquema de varredura.

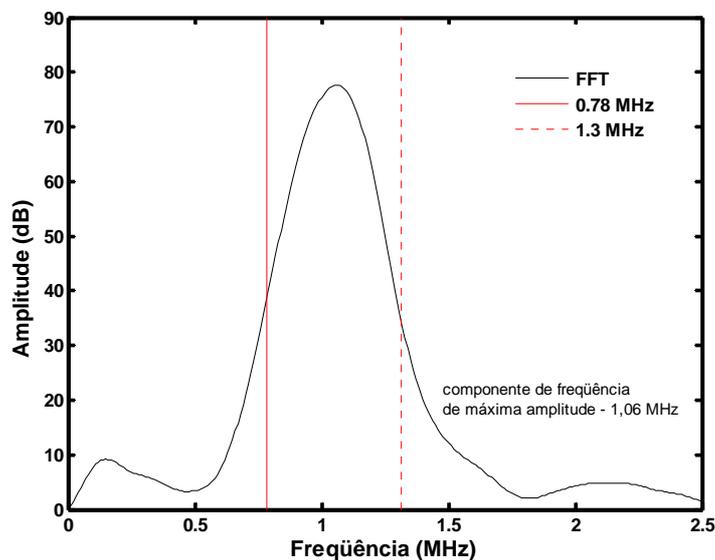


Figura 4.24 – Espectro de frequências obtido via FFT do sinal capturado, utilizando transdutores de imersão de 1 MHz por incidência normal em configuração transmissão-recepção.

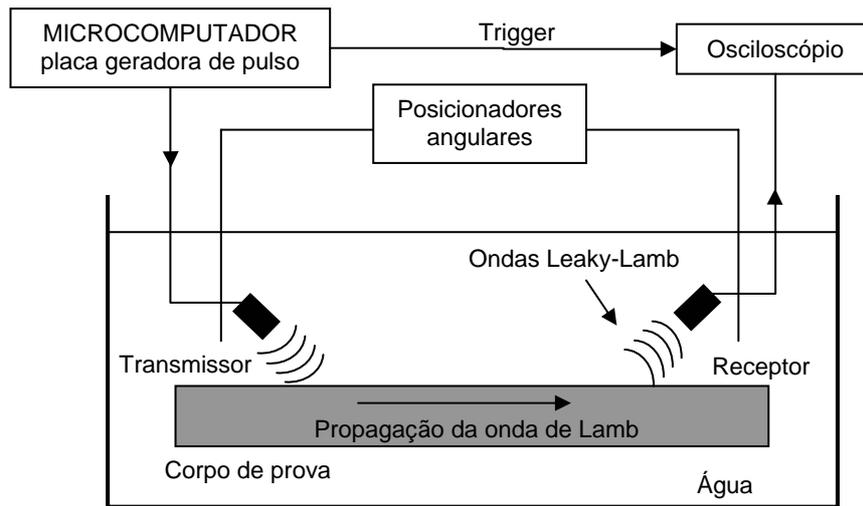


Figura 4.25 – Esquema experimental utilizado nos ensaios ultra-sônicos por imersão.

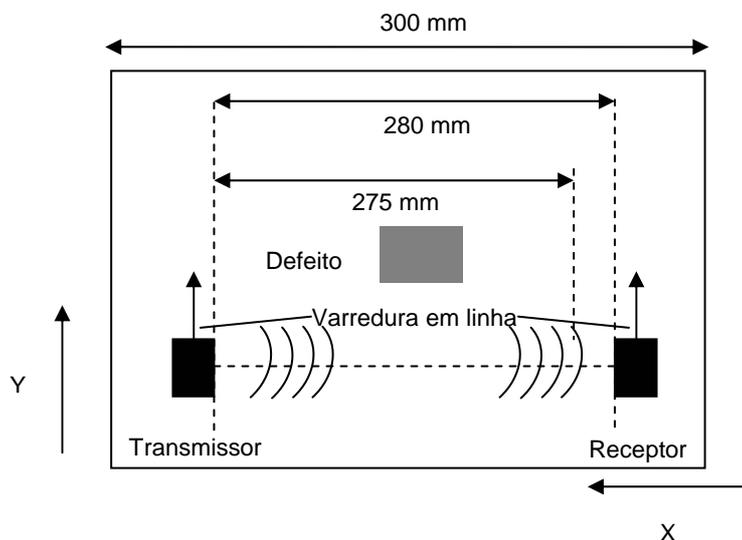


Figura 4.26 – Esquema de varredura pelos transdutores no corpo de prova na configuração transmissão-recepção no corpo de prova em forma de chapa.

4.2.2.2 – INSPEÇÃO POR CONTATO COM SAPATA DE PERSPEX

Para obter um feixe ultra-sônico incidindo obliquamente nos corpos de prova em forma de chapa, foram confeccionadas sapatas em perspex com o ângulo de incidência de acordo com os indicados pelas curvas de dispersão simuladas para a geração do modo de propagação S_0 em cada CP. Foi utilizados transdutores de contato de 1 MHz (C539, Panametrics, EUA) com frequência central de 1,07 MHz e largura de banda 0,17 MHz, conforme mostrado pela figura 4.27.

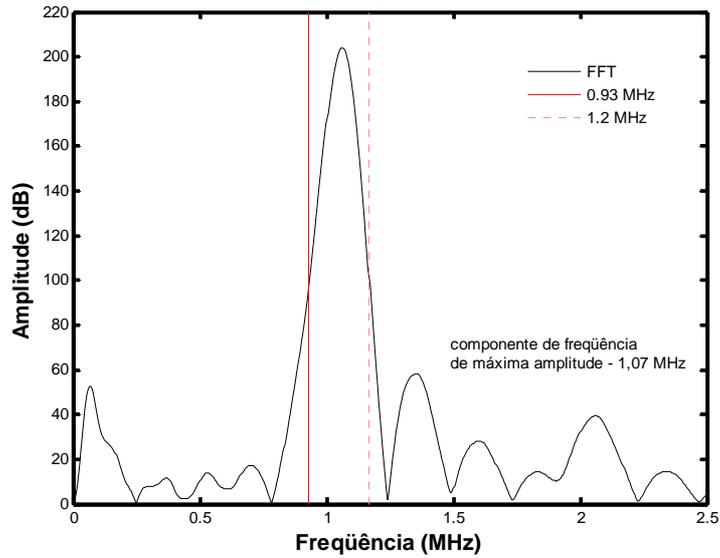


Figura 4.27 – Espectro de freqüências obtido via FFT do sinal capturado utilizando transdutores de contato de 1 MHz em sapata de perspex por incidência normal em configuração transmissão-recepção.

4.2.2.2.1 - CONFIGURAÇÃO TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO

A inspeção foi realizada como mostra o diagrama experimental da figura 4.26. Nesta configuração, a varredura realizada numa configuração similar aquela ilustrada na figura 4.25.

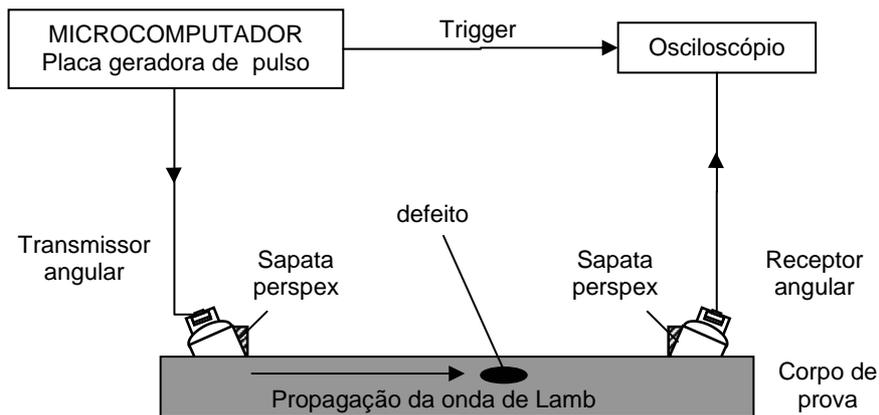


Figura 4.28 – Esquema experimental utilizado no ensaio por contato na configuração transmissão-recepção.

4.2.2.2.2 - CONFIGURAÇÃO TRANSMISSÃO-REFLEXÃO

A figura 4.27 ilustra o diagrama experimental para a inspeção por contato na configuração transmissão-reflexão. O transdutor-receptor foi posicionado em linha a frente do transdutor-transmissor.

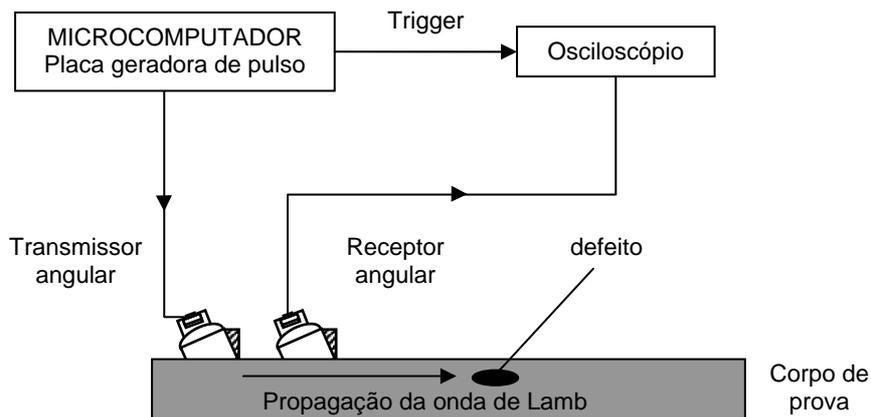


Figura 4.29 – Esquema experimental para o ensaio por contato na configuração transmissão-reflexão.

Foram capturados sinais com os transdutores posicionados ao longo da direção Y, como mostra o esquema da figura 4.28, em regiões em frente e fora defeito a fim de detectar o dano pela presença do eco de reflexão do modo de propagação S_0 .

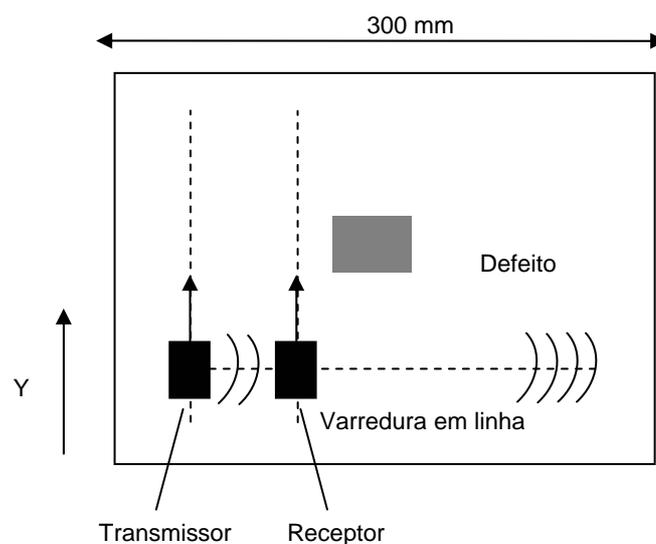


Figura 4.30 - Esquema de varredura pelos transdutores no corpo de prova na configuração transmissão-reflexão.

4.2.2.3 – PROCESSAMENTO DOS SINAIS OBTIDOS NAS INSPEÇÕES ULTRA-SÔNICAS EM CONFIGURAÇÃO TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO

Os sinais capturados pelo osciloscópio e armazenados em computador correspondentes a cada posição de varredura na direção Y e para os respectivos deslocamentos X_1 para e X_2 ($\Delta x=5mm$) do receptor, foram processados com rotinas desenvolvidas no Matlab® a fim de determinar a frequência central do sinal recebido e as velocidades de fase e de grupo experimentais. As etapas do processamento de sinal foram as seguintes:

- Inicialmente procedeu-se ao janelamento Hanning no sinal original recebido para seleccionar apenas parte do sinal correspondente ao pulso transmitido diretamente do transdutor-transmissor;
- Obtenção do espectro de frequência do sinal recebido e determinação do componente da frequência central via FFT;
- Obtenção da fase para cada componente espectral e cálculo da velocidade de fase, $V_{fase}(f)$, através da equação:

$$V_{fase}(f) = \frac{2\pi f \Delta x}{\phi_2(f) - \phi_1(f)}, \quad (4.1)$$

onde f é a frequência, $\phi_1(f)$ e $\phi_2(f)$ são as fases do espectro do sinal recebido nas posições de varredura x_1 e x_2 do transdutor-receptor, respectivamente;

- Obtenção da envoltória do sinal através da transformada de Hilbert e para a determinação do atraso entre as duas envoltórias. Cálculo da velocidade de grupo, V_g , através da equação:

$$V_g = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (4.2)$$

- Para determinar o atraso Δt , foi encontrado inicialmente, um limiar correspondente a uma queda de 6 dB da envoltória do sinal com o transdutor na posição x_1 . A seguir, foram determinados os instantes de cruzamento do limiar pela parte

ascendente da envoltória do sinal correspondente a posição x_1 e x_2 . O atraso entre as duas envoltórias foi calculado pela diferença entre os instantes de cruzamento das envoltórias pelo valor do limiar.

- Também, somente na posição X1 do transdutor-receptor, foi determinado o atraso do pulso transmitido em função da varredura, considerando o tempo de máxima amplitude na envoltória do sinal.

4.2.3 – GERAÇÃO DE MODOS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE LAMB A PARTIR DO LASER – *PROBE LASER SCANNING LINE*

A figura 4.36 mostra o esquema experimental utilizado para inspecionar os corpos de prova CP3_SD, CP3_F, CP3_D, CP4_SD, CP4_F e CP4_D através da técnica *probe scanning line*. Nesta técnica, as ondas de Lamb são geradas por uma fonte de laser fixa e os deslocamentos perpendiculares à superfície são detectados por varredura em linha, utilizando vibrômetro a laser.

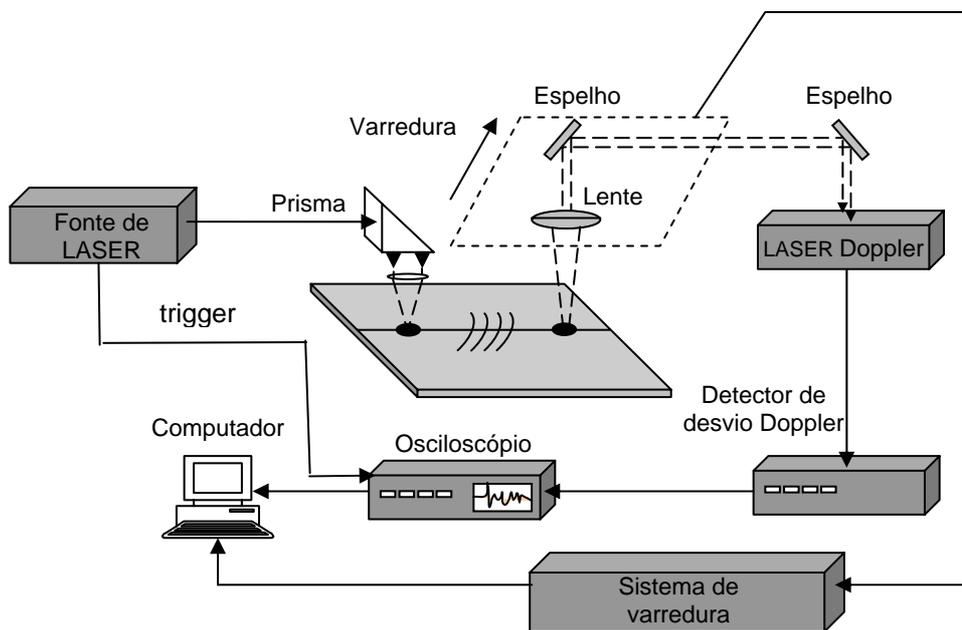


Figura 4.31 – Esquema experimental da técnica “*probe scanning line*”.

Nesta técnica foi utilizada como fonte de laser pulsado o equipamento Nd:Yag Laser marca Spectra-Physics. O feixe de laser é gerado com diâmetro de 2-3 mm, e o pulso possui largura de 10 ns. Após o feixe passar por dispositivos ópticos tais como prisma

de 45° e lente cilíndrica, o mesmo foi posicionado incidindo a 8 cm da borda da placa. A densidade de potência foi elevada gradualmente até que ocorresse o fenômeno abrasivo. A detecção de vibração da placa de LFM foi realizada utilizando-se um laser He-Ne e um vibrômetro Sensor V353, ambos da Polytec. O sistema apresenta uma sensibilidade de 100 mV Å⁻¹. Esse sistema de detecção de vibração realizou uma varredura automática, em linha com a fonte, com passo de 0,1 mm, num total de ~ 25 mm em direção a fonte. O sinal temporal foi capturado osciloscópio digital numa frequência de amostragem de 25 MS/s e transmitido a um computador e armazenado. Nos corpos de prova com defeito, a fonte e o detector foram posicionados em linha à frente do defeito, sendo o detector posicionado entre o defeito e a fonte, como mostra a figura 4.37.

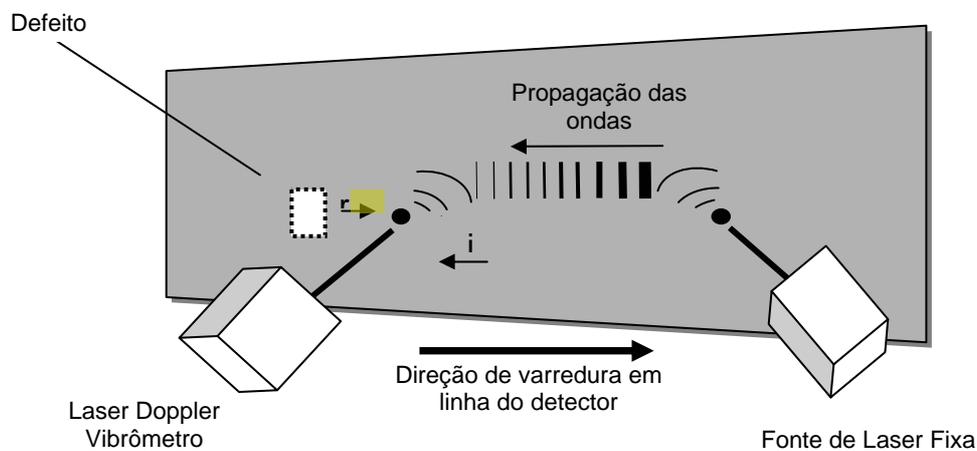


Figura 4.32 – Posicionamento da fonte de laser e detector na técnica “probe scanning line”. O detector mede os deslocamentos superficiais ao corpo de prova das ondas incidentes (i) e refletidas (r).

4.2.2.1 – PROCESSAMENTO DOS SINAIS OBTIDOS

Cada sinal capturado pelo osciloscópio com 8192 pontos, foram armazenados num arquivo de texto. Um programa em Matlab® foi usado para ler o arquivo de texto com os dados e para:

- Alocar os sinais numa matriz de dados no tempo e no espaço. Dessa forma foi possível traçar o B-scan da varredura de cada corpo de prova;
- Separar as ondas incidentes das refletidas, através da FFT-2D da matriz dos sinais;

- Determinar a velocidade de fase das ondas incidentes e refletidas dos modos de propagação das ondas de Lamb.

4.2.4 – FOTOGRAFIAS SCHLIEREN

Baseado numa montagem experimental semelhante ao esquema da figura 2.46, a técnica de Fotografia Schlieren foi utilizada para inspecionar os corpos de prova CP1_SD, CP1_F, CP1_D, onde efeitos óptico-acústicos são usados para visualização do feixe ultra-sônico e desta forma avaliar o que ocorre quando o feixe sônico de 3 MHz e com diâmetro de 1 cm incide num ângulo de Lamb sobre regiões com e sem defeito dos corpos de prova imersos num tanque de vidro contendo água. Um feixe de luz monocromática, gerado por uma fonte de laser He-Ne de 10 mW, atravessa o tanque transparente com água interagindo perpendicularmente com o feixe sônico e com o corpo de prova.

Dispositivos ópticos tais como espelhos e lentes cilíndricas auxiliam a transmissão do feixe de laser antes e após a sua passagem através do tanque transparente contendo água até que a imagem seja projetada numa parede, como mostra a figura 4.38. Um filtro *black spot* foi utilizado para filtrar o feixe de luz permitindo que somente luz difratada seja transmitida. As inspeções foram realizadas considerando a direção do feixe ultra-sônico em relação ao direcionamento das fibras nos LFM's. A varredura foi realizada em linha de tal forma que o feixe ultra-sônico incidiu sobre área com e sem defeito.

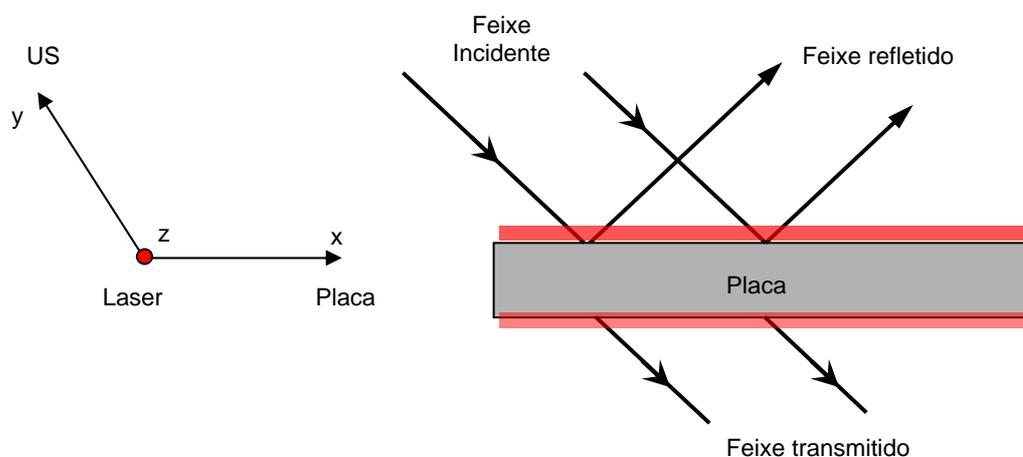


Figura 4.33– Feixe de laser perpendicular à direção z.

As figuras 4.39 e 4.40 mostram a direção dos feixes ultra-sônico e de laser com o posicionamento dos parafusos para marcação dos defeitos nos corpos de prova CP1_F e CP1_D, respectivamente, imersos no tanque: (a) feixe ultra-sônico perpendicular à direção das fibras; (b) feixe ultra-sônico paralelo à direção das fibras.

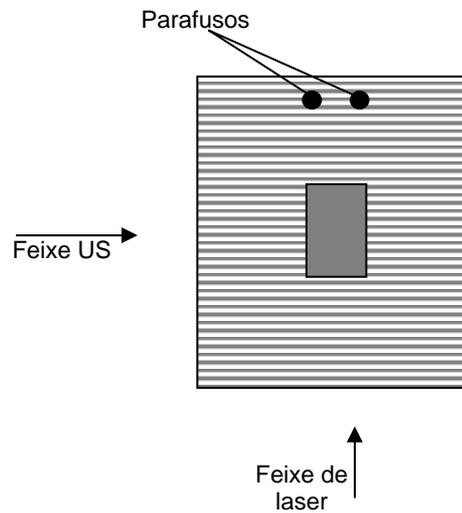


Figura 4.34 – Direção dos feixes ultra-sônico e de laser com o posicionamento dos parafusos para marcação dos defeitos nos corpos de prova CP1_F: (b) feixe ultra-sônico paralelo à direção das fibras.

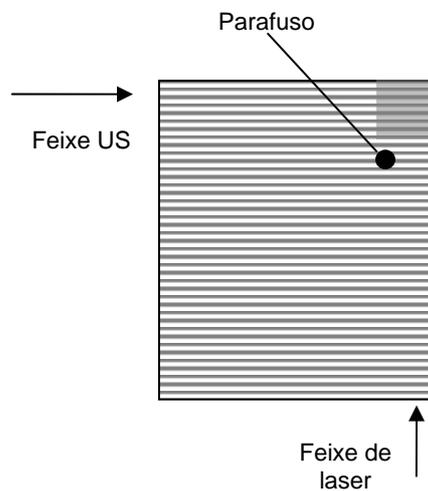


Figura 4.34 – Direção dos feixes ultra-sônico e de laser com o posicionamento dos parafusos para marcação dos defeitos nos corpos de prova CP1_D: feixe ultra-sônico paralelo à direção das fibras.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e sua discussão serão apresentados a fim de se avaliar a metodologia aplicada nos corpos de prova de LFM tendo como objetivo principal à detecção dos defeitos implantados.

Na primeira parte (seção 5.1) são apresentadas as curvas de dispersão das ondas de Lamb em termos de número de onda e das velocidades de fase e grupo obtidas por simulação, utilizando o programa computacional Disperse[®]. Foram considerados a faixa de frequência de 0,55 a 1,0 MHz e o ângulo de incidência do feixe ultra-sônico indicados no capítulo 4 itens 4.2.1.2.1 e 4.2.1.2.2, necessária à seleção dos modos de propagação fundamentais das ondas de Lamb para os corpos de prova de fibra de carbono e chapa de alumínio.

Na segunda parte (seção 5.2), os resultados experimentais das inspeções ultra-sônicas por contato e por imersão em termos das velocidades de fase e grupo são apresentados e comparados com os simulados para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 . São analisados também a amplitude do sinal obtido em todos os casos e os A-scans para a visualização do eco de reflexão de defeito para o caso do ensaio por contato na configuração transmissão-reflexão.

Os resultados experimentais referentes ao uso de laser na geração de ondas de Lamb nos corpos de prova de fibra de carbono são apresentados na seção 5.3 e comparados com os obtidos por simulação em termos de velocidade de fase e número de onda para o modo de propagação da onda de Lamb A_0 .

Na última parte (seção 5.4), são apresentados os resultados para detecção de defeitos em LFM de fibra de vidro utilizando a técnica de fotografia Schlieren.

5.1 – SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE DISPERSÃO DOS MODOS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE LAMB

Nos gráficos das curvas de dispersão simuladas, em termos das velocidades de fase e grupo, bem como do ângulo de incidência do feixe sônico, a faixa de frequência considerada foi de 0 a 2 MHz em função de:

- Os modos de propagação fundamentais das ondas de Lamb A_0 e S_0 propagarem, geralmente, nesta faixa de frequência sem a presença dos modos de propagação superiores de Lamb;
- Dentro do possível, a região menos dispersiva em cada corpo de prova, se encontra nessa faixa de frequência;

Em realidade, a faixa de frequência considerada nas tabelas que relacionam os valores de ângulo de incidência e das velocidades de fase e de grupo, é de 0,55 a 1 MHz, pois o melhor ângulo de incidência, para gerar o modo de propagação S_0 nos ensaios por imersão e por contato está situado nesta faixa, considerando que foram utilizados transdutores de 1MHz.

5.1.1 – ENSAIOS POR IMERSÃO

(A) Chapa de alumínio:

A curva de dispersão simulada em termos de velocidade de fase em função da frequência para a chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura considerando ensaio por imersão é mostrada na figura 5.1. Nesta faixa de frequência há a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 . Observa-se que em toda a faixa de frequência, o meio é não-dispersivo para o modo de propagação S_0 . Para o modo de propagação A_0 , o meio apresenta dispersão acentuada abaixo de 0,5 MHz, tendo uma velocidade de fase que aumenta de forma assintótica para um valor constante o qual corresponde à velocidade da onda superficial de Rayleigh^[4]. A figura 5.2 ilustra a curva de dispersão simulada em termos de velocidade de grupo

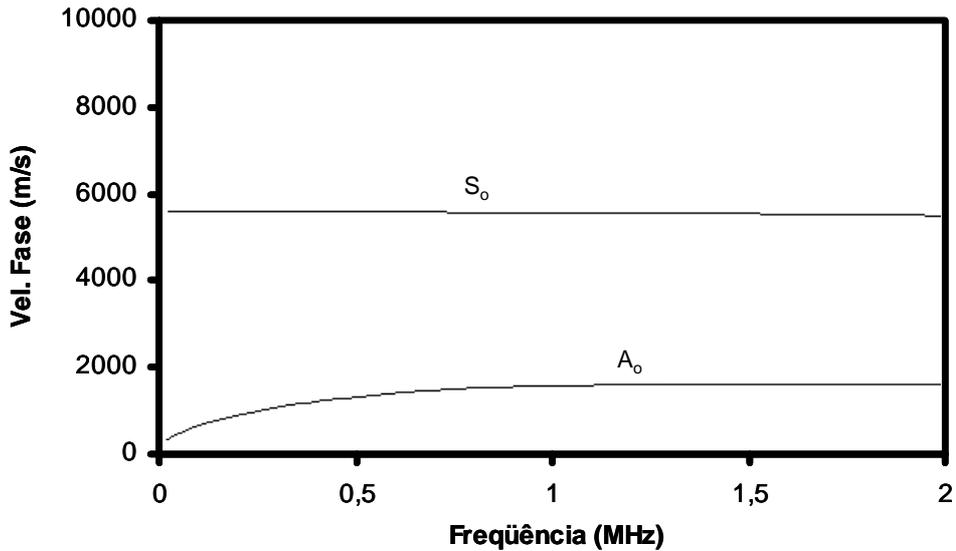


Figura 5.1 – Curva de dispersão simulada para o alumínio com espessura de 0,5 mm em ensaio de imersão: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 [45].

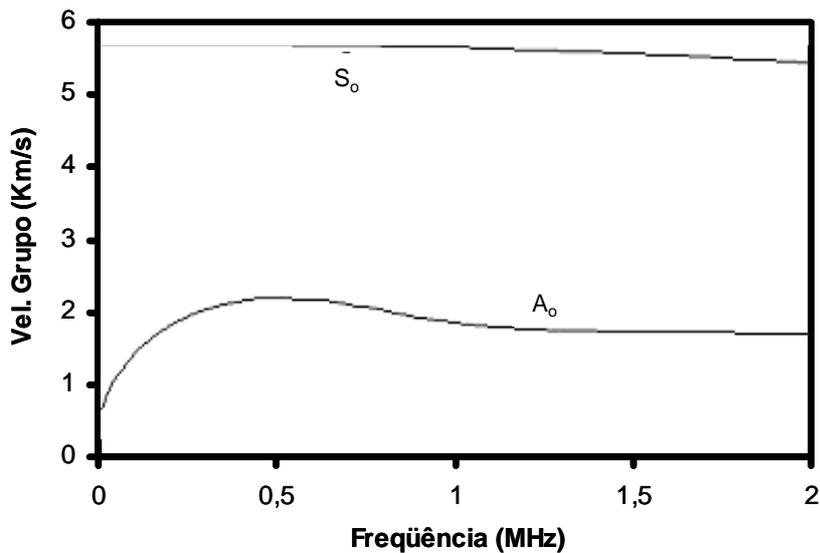


Figura 5.2 – Curva de dispersão simulada para o alumínio com espessura de 0,5 mm em ensaio de imersão: Velocidades de grupo na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 [45].

(B) Corpo de prova CP3

Na figura 5.3, observa-se a curva de dispersão simulada para o LMF/CP3, em termos de velocidade de fase em função da frequência, considerando ensaio por imersão. Estão presentes dois modos de propagação: A_0 e S_0 . O modo de propagação da onda de Lamb S_0 possui frequência de corte de $\sim 0,75$ MHz e que o meio é dispersivo para

este material na faixa de frequência considerada. Já o modo de propagação da onda de Lamb A_0 para este CP apresenta um mesmo comportamento que a chapa de alumínio. A curva de dispersão simulada em termos de velocidade de grupo é ilustrada na figura 5.4.

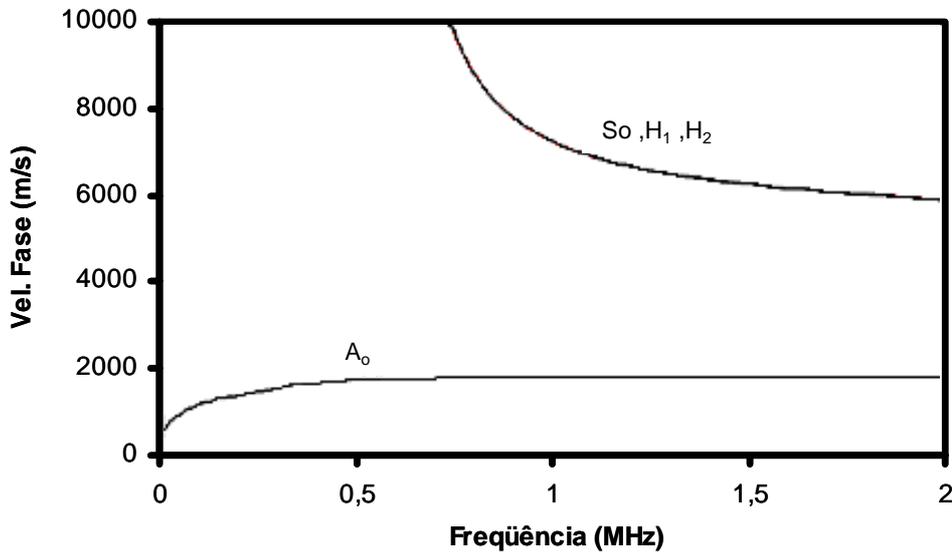


Figura 5.3 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 [45].

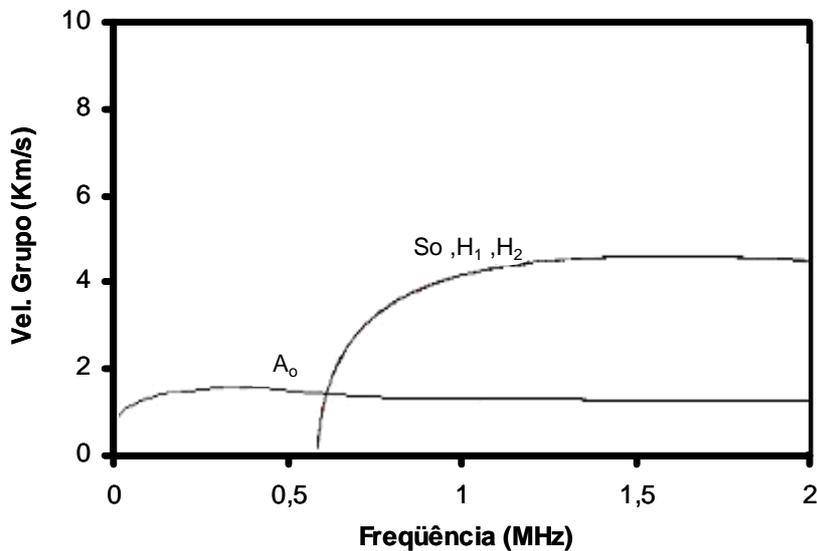


Figura 5.4 – Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidades de grupo na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 [45].

(C) Corpo de prova CP4

As velocidades de fase em função da frequência, simuladas para o corpo de prova CP4 em ensaio por imersão são mostradas na curva de dispersão da figura 5.5. Na faixa de frequência considerada, estão presentes os modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 . Para o modo de propagação S_0 , em frequências abaixo de 1 MHz, o meio é não dispersivo. A figura 5.6 mostra a curva de dispersão para a velocidade de grupo.

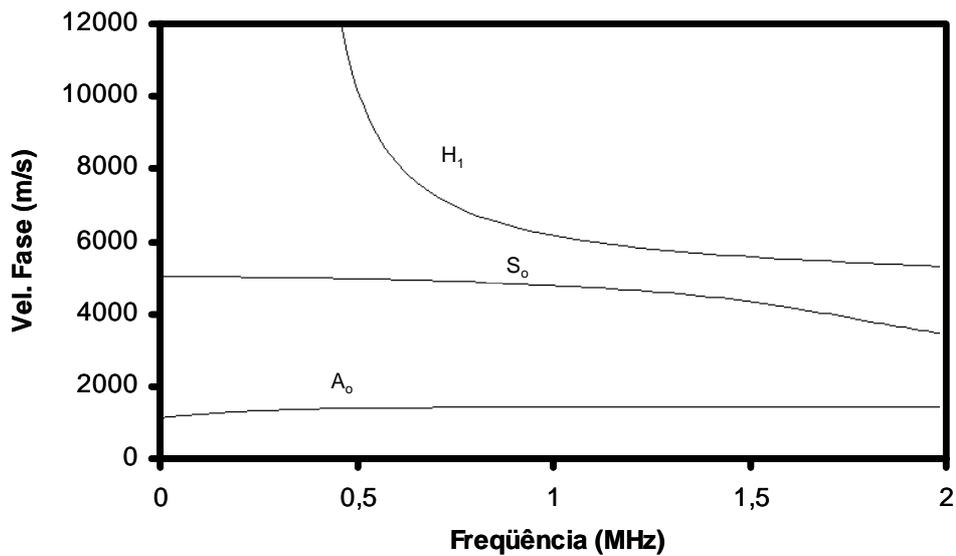


Figura 5.5 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 ^[45].

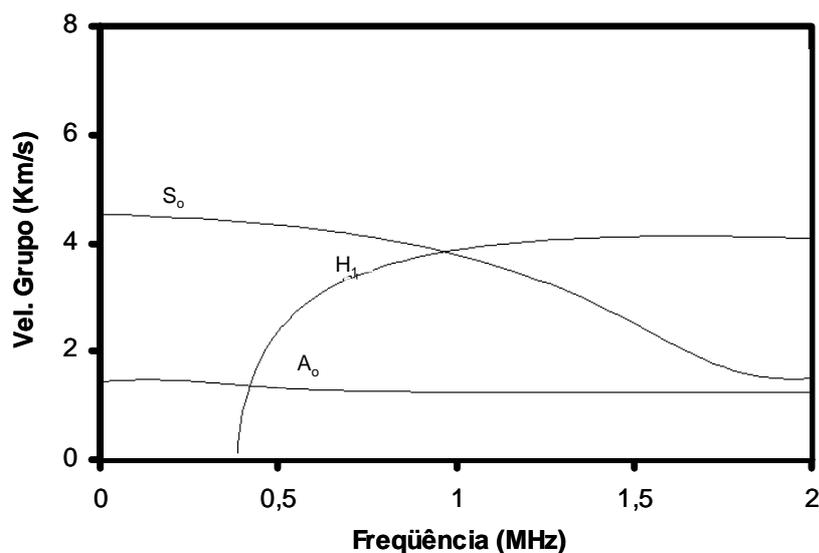


Figura 5.6 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio de imersão: Velocidades de grupo na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 e S_0 ^[45].

Na tabela 5.1, estão relacionados os valores dos ângulos de incidência em função da frequência, necessários a geração do modo de propagação S_0 em ensaio de imersão, bem como as velocidades de fase e de grupo, para a chapa de alumínio e os corpos de prova CP3 e CP4.

Tabela 5.1 – Ângulo de incidência do feixe ultra-sônico para geração do modo de propagação S_0 , velocidades de fase e grupo na faixa de frequência de 0 a 1 MHz, em ensaio POR imersão na chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura e CP3 e CP4 com 1,34 mm de espessura.

Freq. (MHz)	S_0 - Chapa de alumínio			S_0 - CP3			S_0 - CP4		
	Ângulo (°)	V_g (m/s)	V_f (m/s)	Ângulo (°)	V_g (m/s)	V_f (m/s)	Ângulo (°)	V_g (m/s)	V_f (m/s)
0,55	16,0	5422	5433	-----	-----	-----	17,5	4930	5016
0,60	16,0	5418	5431	0,5	920	9817	17,5	4890	5009
0,65	16,0	5414	5430	6,0	2192	9567	17,5	4843	4995
0,70	16,0	5409	5428	8,0	2882	9060	17,5	4788	4987
0,75	16,0	5404	5426	9,0	3325	8840	17,5	4744	4972
0,80	16,0	5398	5424	10,0	3735	8380	17,5	4702	4953
0,85	16,0	5384	5423	10,5	3890	7821	17,5	4669	4943
0,90	16,0	5382	5422	11,5	4000	7523	17,5	4613	4927
0,95	16,0	5380	5420	11,2	4267	7183	18,0	4544	4907
1,00	16,0	5377	5418	12,5	4385	6966	18,0	4397	4880

5.1.2 – ENSAIOS POR CONTATO

(A) Corpo de prova CP3

A curva de dispersão simulada em termos de velocidade de fase em função da frequência para o LFM CP3, em ensaio de contato por sapata de perspex, é mostrada na figura 5.7. Observam-se quatro modos propagados: A_0 , S_0 , H_1 e H_2 . Para frequências abaixo de 1 MHz, o modo de propagação S_0 , propaga em meio não-dispersivo, com velocidade aproximada de 6000 m/s. Na figura 5.8, a curva de dispersão mostra as velocidades de grupo e observa-se que em torno da frequência de 1 MHz, há uma região bem dispersiva para todos os modos de propagação no meio.

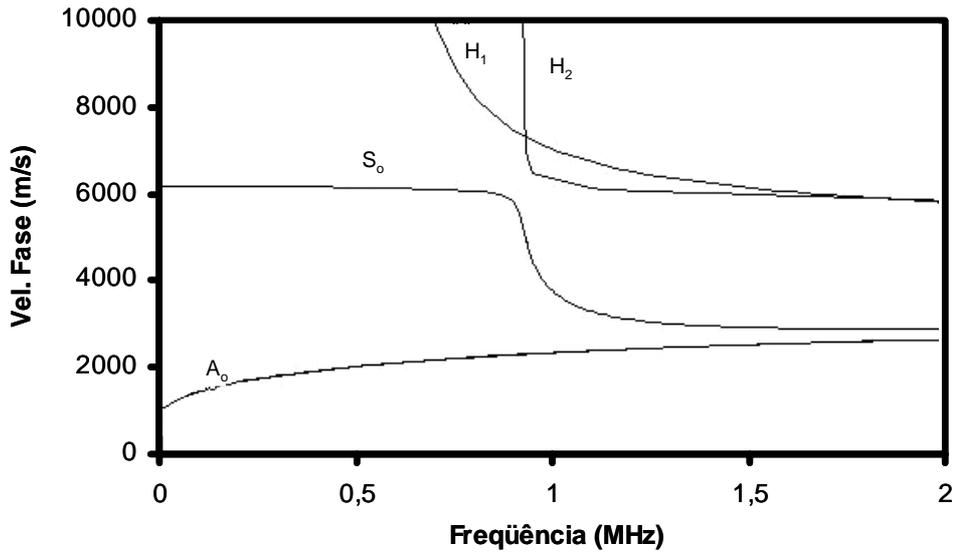


Figura 5.7 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato em sapata de perspex: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 e H_2 [45].

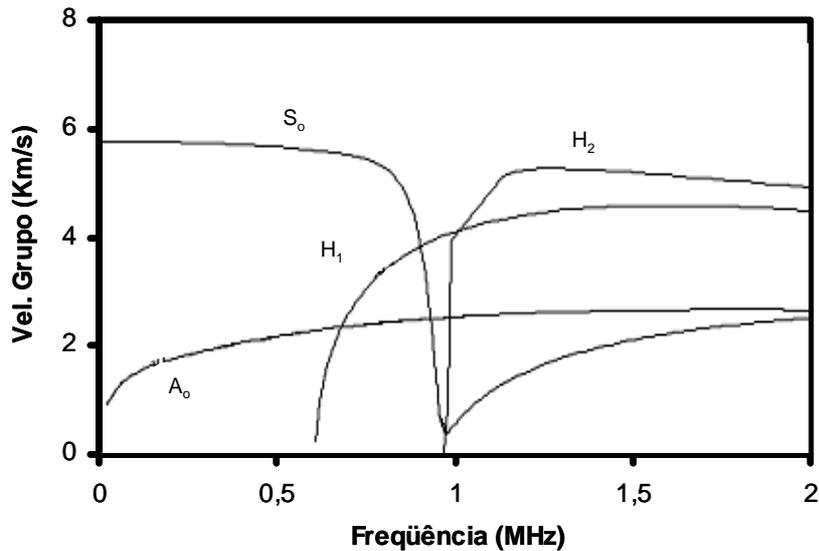


Figura 5.8 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato em sapata de perspex: Velocidades de grupo na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 , H_1 e H_2 [45].

(B) Corpo de prova CP4

Na figura 5.9, a curva de dispersão para as velocidades de fase dos modos propagados no corpo de prova CP4, em ensaio por contato com sapata de perspex é

ilustrada. Observam-se, na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, os modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 . Sendo que, o modo de propagação H_1 possui frequência de corte em 0,6 MHz. A figura 5.10 mostra as velocidades de grupo em função da frequência, para os modos de propagação no corpo de prova referido.

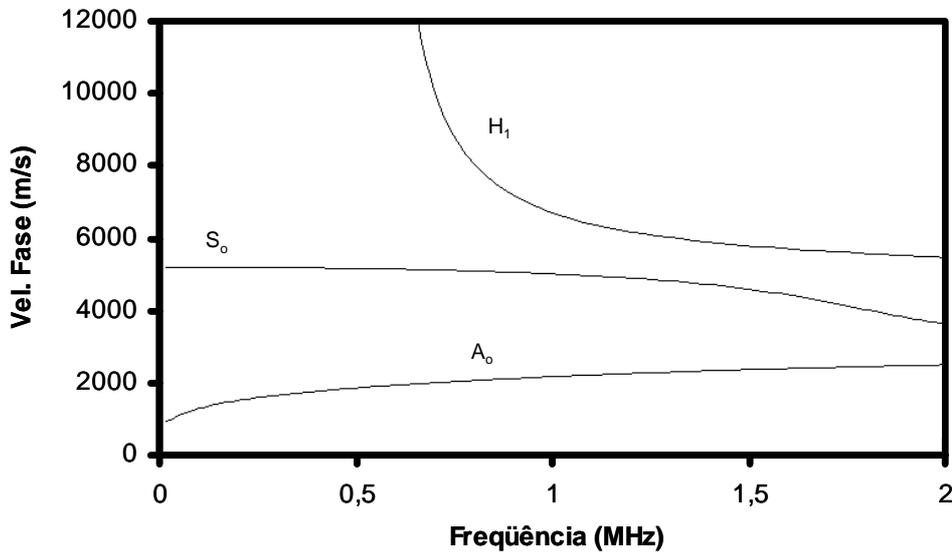


Figura 5.9 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato em sapata de perspex: Velocidades de fase na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 [45].

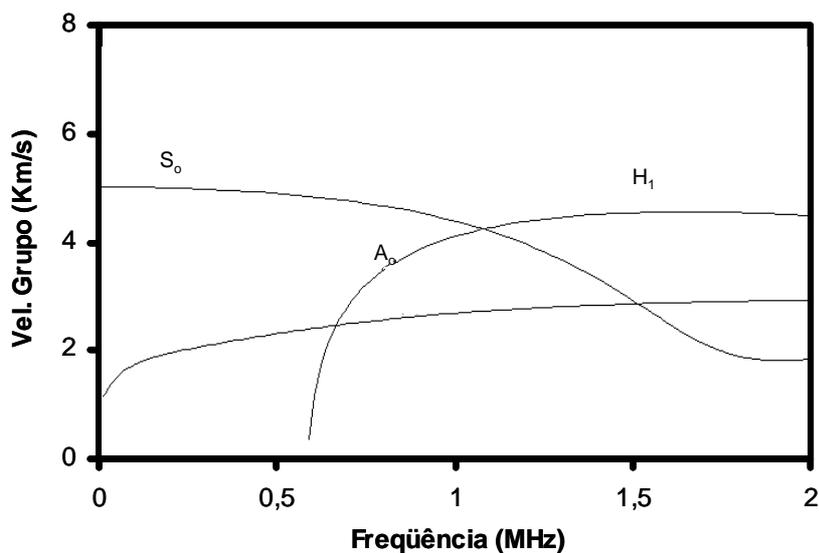


Figura 5.10 - Curva de dispersão simulada para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm em ensaio por contato em sapata de perspex: Velocidades de grupo na faixa de frequência de 0 a 2 MHz, com a presença dos modos de propagação A_0 , S_0 , H_1 [45].

A tabela 5.2 relaciona os valores dos ângulos de incidência em função da frequência, necessários a geração do modo de propagação S_0 em ensaio por contato com sapata de perspex, bem como as velocidades de fase e de grupo, os corpos de prova CP3 e CP4.

Tabela 5.2 – Ângulos de incidência do feixe ultra-sônico para geração do modo de propagação S_0 , velocidades de fase e grupo na faixa de frequência de 0 a 1 MHz, em ensaio por contato com sapata de perspex em CP3 e CP4 com 1,34 mm de espessura.

Freq. (MHz)	S_0 – CP3			S_0 – CP4		
	Ângulo (°)	V_g (m/s)	V_f (m/s)	Ângulo (°)	V_g (m/s)	V_f (m/s)
0,55	27,0	5927	6001	33,0	4912	5016
0,60	27,0	5853	5979	33,0	4891	5010
0,65	27,0	5817	5970	33,0	4844	4995
0,70	27,0	5960	5960	33,0	4818	4987
0,75	27,5	5616	5934	33,0	4765	4971
0,80	27,5	5461	5915	33,0	4719	4953
0,85	27,5	5173	5889	33,5	4655	4939
0,90	28,0	3543	5776	33,5	4580	4917
0,95	31,0	900	4772	34,0	4541	4906
1,00	46,0	898	3796	34,0	4445	4879

5.1.3 – ENSAIOS POR NÃO-CONTATO

As curvas de dispersão em termos de número de onda em função da frequência foram simuladas para comparação posterior com as obtidas nos ensaios a laser pela técnica *Probe Scanning Line*. Como o vibrômetro detecta movimentos perpendiculares à superfície, o modo de propagação A_0 poderá ser avaliado.

(A) Corpo de prova CP3

A figura 5.11 mostra a curva de dispersão simulada em termos de número de onda em função da frequência para o corpo de prova CP3. A tabela 5.3 relaciona o número de onda, velocidade de fase com a frequência.

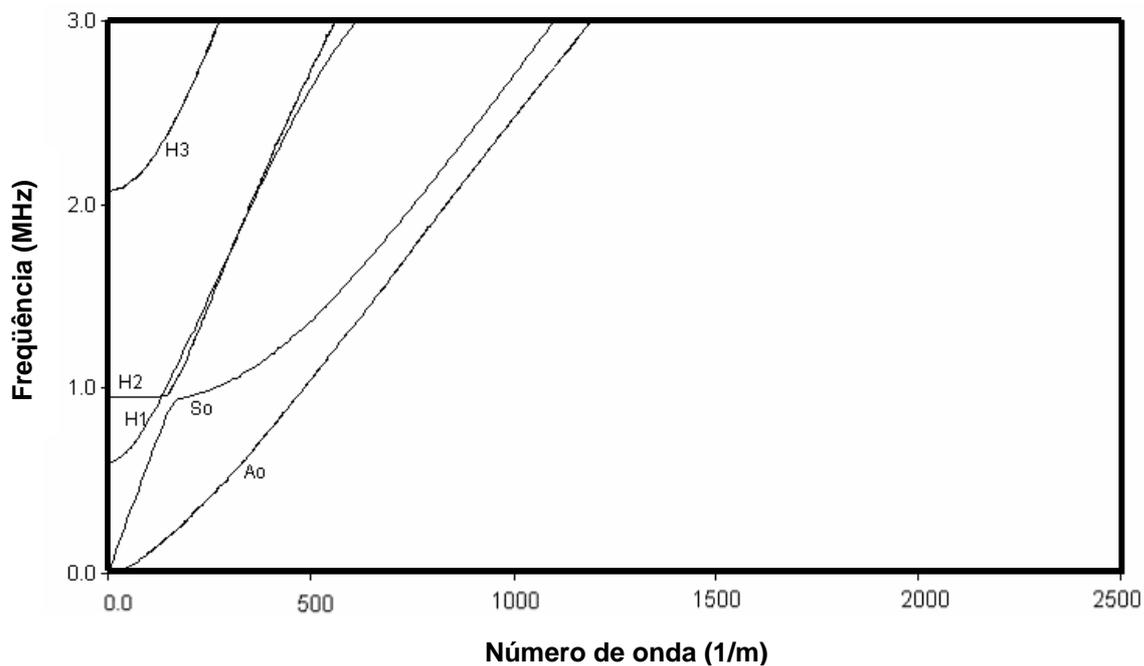


Figura 5.11 - Curva de dispersão para o LFM/CP3 com espessura de 1,34 mm por não-contato: frequência x número de onda ^[45].

Tabela 5.3 – Valores do número de onda e velocidade de fase em cada frequência para o modo de propagação A_0 no LFM/CP3 por ensaio de não-contato.

Frequência (MHz)	A_0 - Número de onda (1/m)	A_0 - Velocidade de fase (m/s)
0,2	213,00	1346
0,4	246,68	1641
0,6	328,38	1811
0,8	410,08	1962
1,0	484,98	2076
1,2	559,87	2171
1,4	627,95	2244
1,6	696,04	2668

(B) Corpo de prova CP4

A figura 5.12 mostra a curva de dispersão simulada em termos de número de onda em função da frequência para o corpo de prova CP4. A tabela 5.4 relaciona o número de onda, velocidade de fase com a frequência.

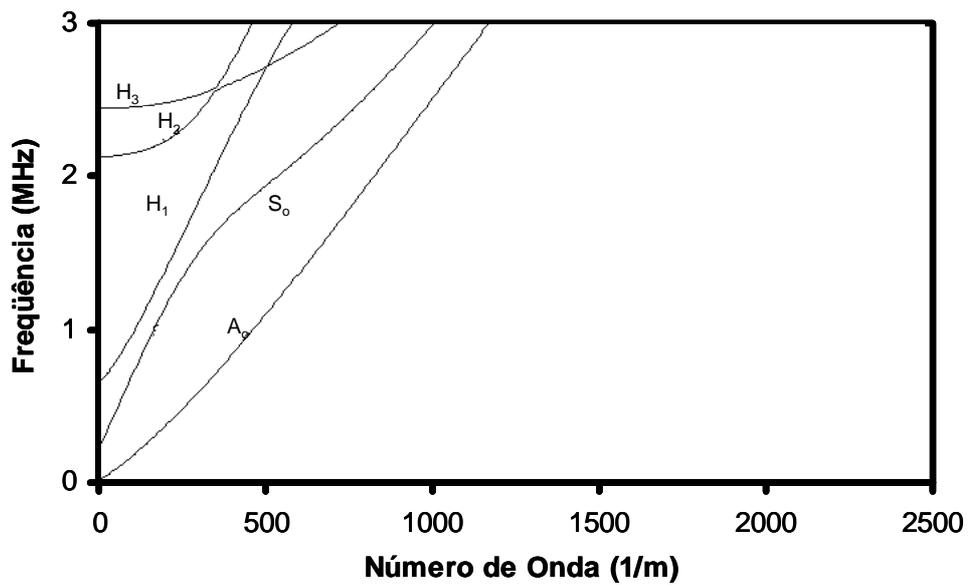


Figura 5.12 - Curva de dispersão para o LFM/CP4 com espessura de 1,34 mm por não-contato: frequência x número de onda ^[45].

Tabela 5.4 – Valores do número de onda e velocidade de fase em cada frequência para o modo de propagação A_0 no LFM/CP4 por ensaio de não-contato.

Frequência (MHz)	A_0 - Número de onda (1/m)	A_0 - Velocidade de fase (m/s)
0,2	151,35	1290
0,4	253,40	1539
0,6	335,18	1719
0,8	423,69	1860
1,0	498,54	1970
1,2	573,47	2071
1,4	641,56	2150
1,6	709,64	2215

5.2 – ENSAIOS ULTRA-SÔNICOS POR IMERSÃO E CONTATO

Para análise dos resultados, os valores das velocidades de fase e de grupo do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtidos experimentalmente por ensaios de imersão e de contato na configuração transmissão-recepção, receberam o seguinte tratamento estatístico:

- Cálculo do desvio padrão (σ);
- Cálculo da mediana seguido da adição de $\pm\sigma$.

5.2.1 – VELOCIDADES DE FASE E DE GRUPO OBTIDAS POR ENSAIOS DE IMERSÃO NA CONFIGURAÇÃO TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO

A chapa de alumínio foi inspecionada de forma que os resultados experimentais possam ser utilizados como um parâmetro de referência na avaliação dos resultados obtidos nos corpos de prova de LFM's pelo programa de simulação.

Na figura 5.13 são mostrados os valores das velocidades de fase do modo de propagação da onda de Lamb S_0 em função do deslocamento dos transdutores na chapa de alumínio com 0,5 mm de espessura. Pode-se observar que, no geral, os valores experimentais estão contidos nos limites de ± 1 desvio-padrão em torno da mediana, sendo superiores ao valor simulado com uma diferença entre o valor da mediana e o simulado, ΔVF_{MS} , de ~ 289 m/s (ver tabela 3 no Anexo A).

O valor simulado da velocidade de fase selecionado para o alumínio em imersão foi de 5418 m/s, considerando a frequência de 1 MHz (valor aproximado da frequência central do transdutor-transmissor, como mostrado na figura 4.24). Ocorre que a frequência experimental medida foi de 0,79 MHz (ver tabela 3 no Anexo A). Para esta frequência, o valor simulado para a velocidade de fase do alumínio é de ~ 5424 m/s. A variação dos valores simulados em função da frequência é pequena pois nesta faixa de frequência o alumínio é não-dispersivo conforme mostrado pela figura 5.1. Uma possível justificativa para a diferença entre o valor experimental e o simulado, considerando o valor da frequência experimental, pode ser devido a uma pequena diferença no valor dos dados de entrada, ver figura 4.9, no programa de simulação (por exemplo, com um aumento de 10% no valor da velocidade

transversal do alumínio, as velocidades de fase simulada e experimental são similares).

A figura 5.14 mostra os valores da velocidade de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidos experimentalmente por varredura da chapa de alumínio por ensaio de imersão. Pode-se verificar que cerca de 27% dos valores experimentais ficaram fora dos limites de ± 1 desvio-padrão em torno da mediana, sendo que, a diferença entre o valor da mediana dos valores experimentais e o valor simulado, ΔVG_{MS} , foi de 58,10 m/s. Mas, considerando o valor de frequência experimental (ver tabela 4 no Anexo A), a velocidade de grupo simulada é de ~ 5398 m/s e a diferença ΔVG_{MS} cai para ~ 36 m/s. Considerando a equação 3.24, os valores experimentais das velocidades de fase e de grupo seguem a ordem para a chapa de alumínio em imersão, ou seja, $V_g < V_f$.

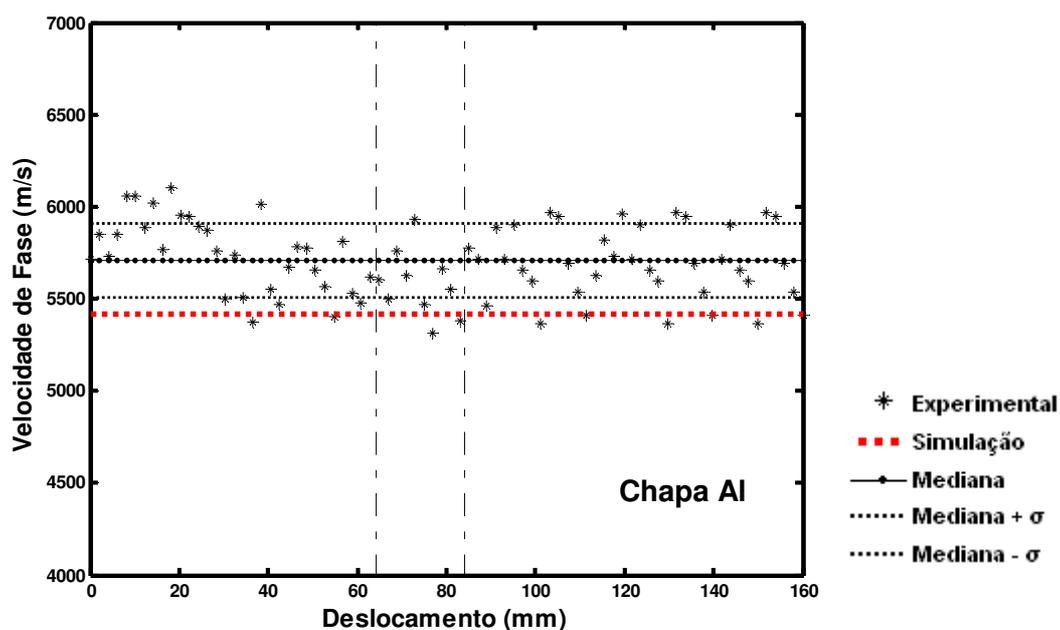


Figura 5.13 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura da chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura num total de 80 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra o defeito.

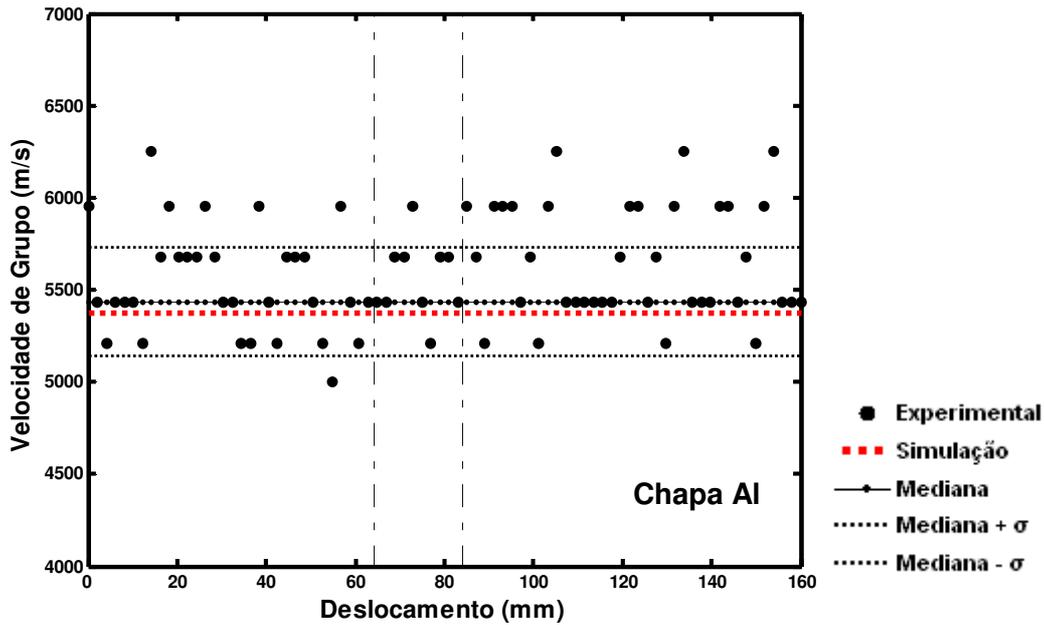


Figura 5.14 - Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura da chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura num total de 80 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra o defeito.

As figuras 5.15 e 5.16 mostram os valores das velocidades de fase e de grupo para o modo de propagação da Onda de Lamb S_0 , respectivamente, obtidos pela varredura do corpo de prova CP3_F por ensaio de imersão. Pode-se observar que tanto na velocidade de fase quanto na velocidade de grupo, a maioria dos valores obtidos experimentalmente se encontra nos limites de ± 1 desvio-padrão em torno da mediana. A frequência considerada para os corpos de prova CP3 por simulação foi de 0,85 MHz (valor de frequência contido na largura de banda do transdutor-transmissor conforme mostra a figura 4.24). Experimentalmente, a frequência observada, neste caso, foi de $\sim 0,66$ MHz.

Nas figuras 5.17 e 5.18 são mostrados, respectivamente os valores das velocidades de fase e de grupo do modo de propagação da onda de Lamb S_0 em função do deslocamento dos transdutores pelo corpo de prova CP3_D. Neste caso, também se observa que tanto para a velocidade de fase quanto para a velocidade de grupo, a maioria dos valores obtidos experimentalmente se encontra nos limites ± 1 desvio-padrão em torno da mediana. A frequência experimental verificada foi de $\sim 0,67$ MHz. Considerando a equação 3.24, os valores experimentais das velocidades de

fase e de grupo seguem a ordem para o corpo de prova CP3 em imersão, ou seja, $V_g < V_f$.

Supõe-se que a grande diferença observada entre os valores experimentais e simulados (ver tabela 3 no Anexo A) para as velocidades de fase e de grupo, considerando todos os corpos de prova CP3 nos ensaios por imersão, figuras 5.15 a 5.18, se deve ao fato de que o programa computacional utilizado na simulação não conseguiu traçar separadamente o modo de propagação S_0 (ver figuras 5.3 e 5.4). De acordo com a curva de dispersão, o modo de propagação S_0 propaga conjuntamente com os modos de propagação de ordem superior H_1 e H_2 . Portanto, o valor de velocidade de fase “real” para este modo de propagação deve ter valor abaixo do simulado na faixa de frequência analisada e o da velocidade de grupo deve ser mais elevado.

Para os corpos de prova CP3_F e CP3_D, as medianas dos valores experimentais obtidos para as velocidades de fase e de grupo (ver tabela 3 no Anexo A) mostram uma diferença de $\sim 3,5\%$ para os valores da velocidade de grupo e uma diferença de $\sim 4,2\%$ para os valores da velocidade de fase.

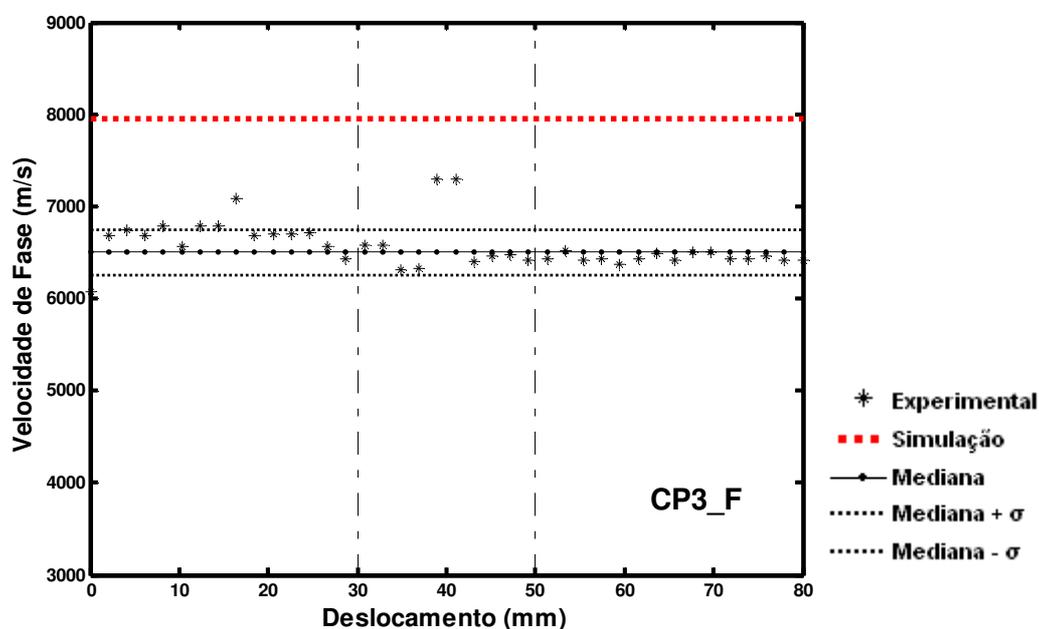


Figura 5.15 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

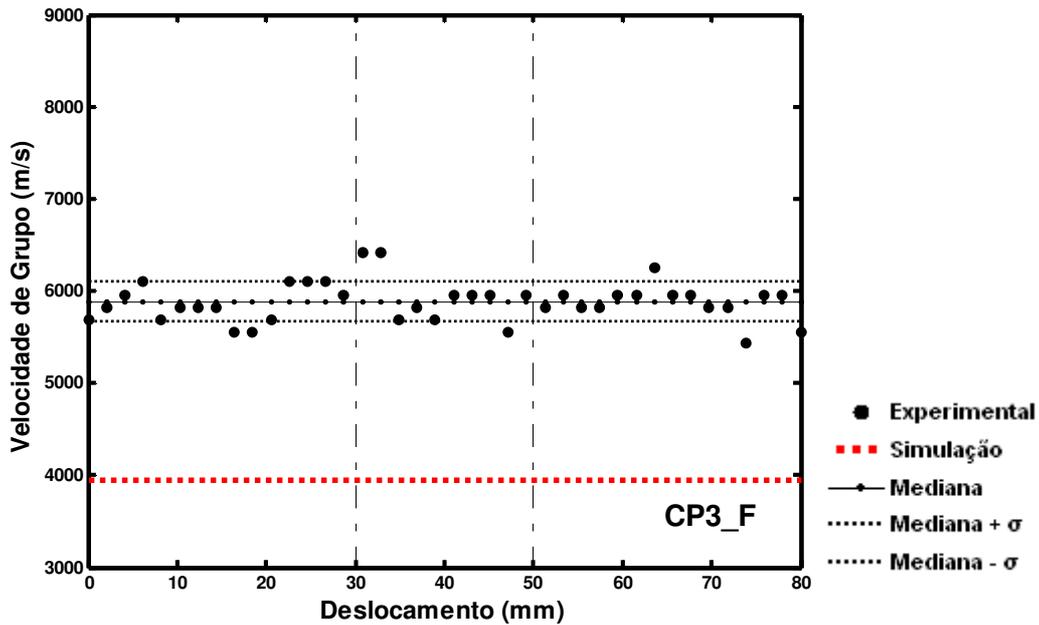


Figura 5.16 - Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

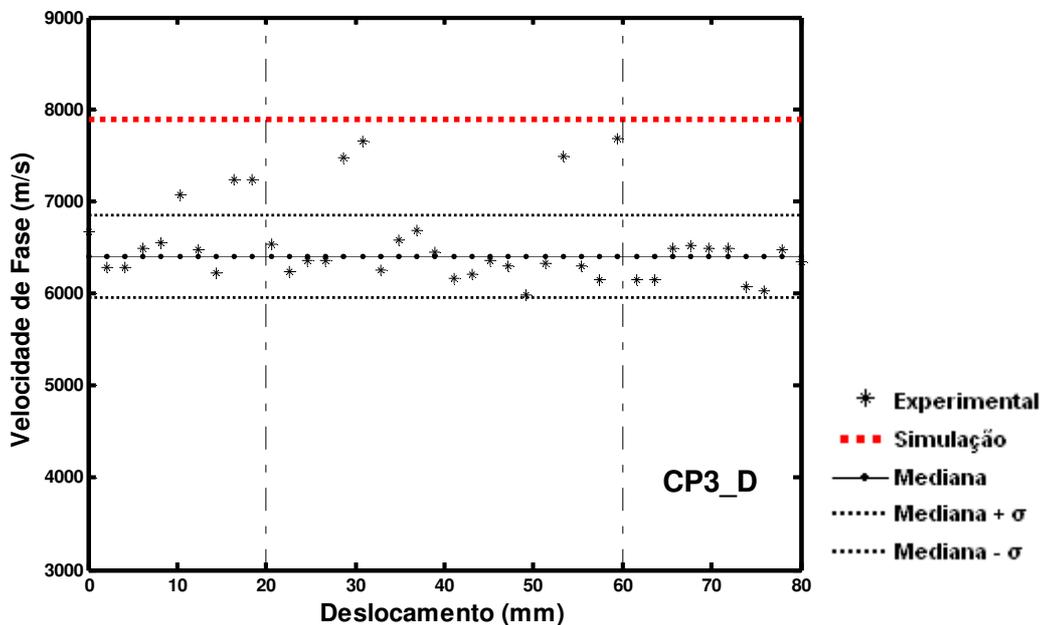


Figura 5.17 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

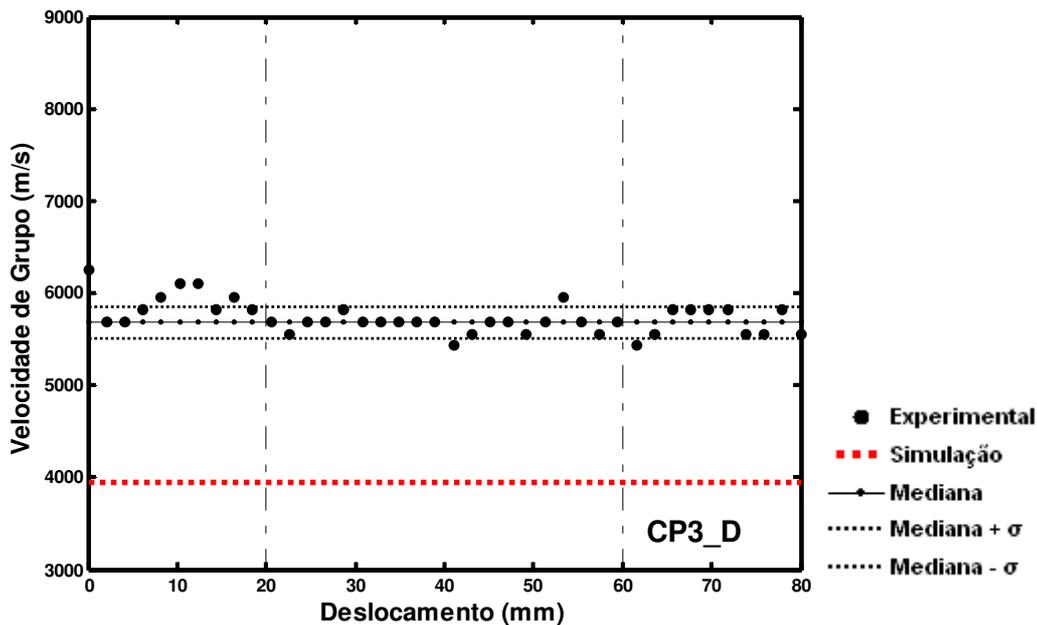


Figura 5.18 - Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

As figuras 5.19 e 5.20 ilustram, respectivamente, os valores das velocidades de fase e de grupo experimentais obtidos nas na varredura do corpo de prova CP4_F por ensaio de imersão. Para algumas posições, os valores s velocidade de fase W_e de grupo foram diferentes da maioria dos valores experimentais, portanto, o desvio-padrão foi muito elevado. Apesar disso, é visto que a maioria dos valores está coerente em relação ao valor simulado, $\Delta V_{F_{MS}} \sim 333$ m/s e $\Delta V_{G_{MS}} \sim 105$ m/s. O valor considerado para a frequência simulada foi 0,80 MHz. Contudo, a frequência verificada medida foi de 0,57 MHz, fora da banda de -6 dB do transdutor-transmissor. Neste valor de frequência, as velocidades de fase e de grupo simuladas se aproximam da mediana dos valores obtidos experimentalmente, como mostra a tabela 3 do Anexo A. Então, a diferença entre a mediana dos valores experimentais cai para ~ 275 m/s para a velocidade de fase e ~ 30 m/s para a velocidade de grupo. Para o corpo de prova CP4_F, considerando a equação 3.24, os valores experimentais das velocidades de fase e de grupo seguem a ordem para ensaio em imersão, ou seja, $V_g < V_f$.

Nas figuras 5.21 e 5.22, se visualizam os resultados experimentais as velocidades de fase e de grupo, respectivamente, obtidos por varredura do corpo de prova CP4_D em ensaio por imersão. Para este corpo de prova, todos os valores experimentais para a velocidade de fase ficaram contidos nos limites de ± 1 desvio-padrão em torno da mediana, sendo a diferença entre a mediana dos valores experimentais e o valor simulado da velocidade de fase, $\Delta VF_{MS} \sim 569$ m/s considerando a frequência selecionada por simulação de 0,8 MHz. Levando-se em conta a frequência medida experimentalmente, 0,68 MHz, essa diferença cai para ~ 527 m/s. Em relação a velocidade de grupo, a maioria dos valores experimentais está contida nos limites de ± 1 desvio-padrão em torno da mediana e ΔVG_{MS} é ~ 298 m/s para a frequência considerada na simulação e ~ 157 m/s na frequência experimental.

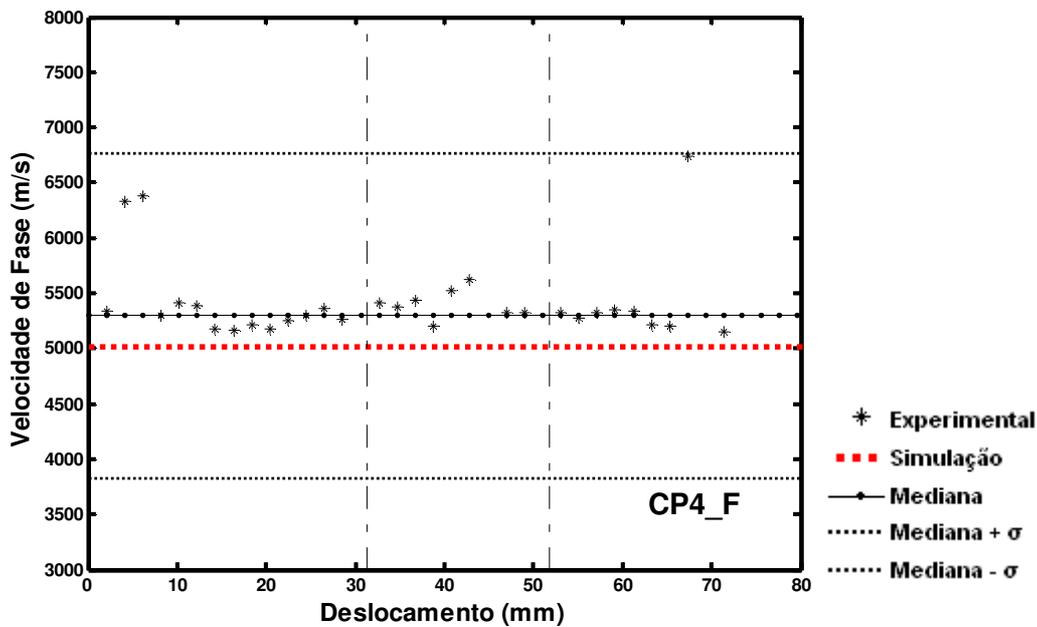


Figura 5.19 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

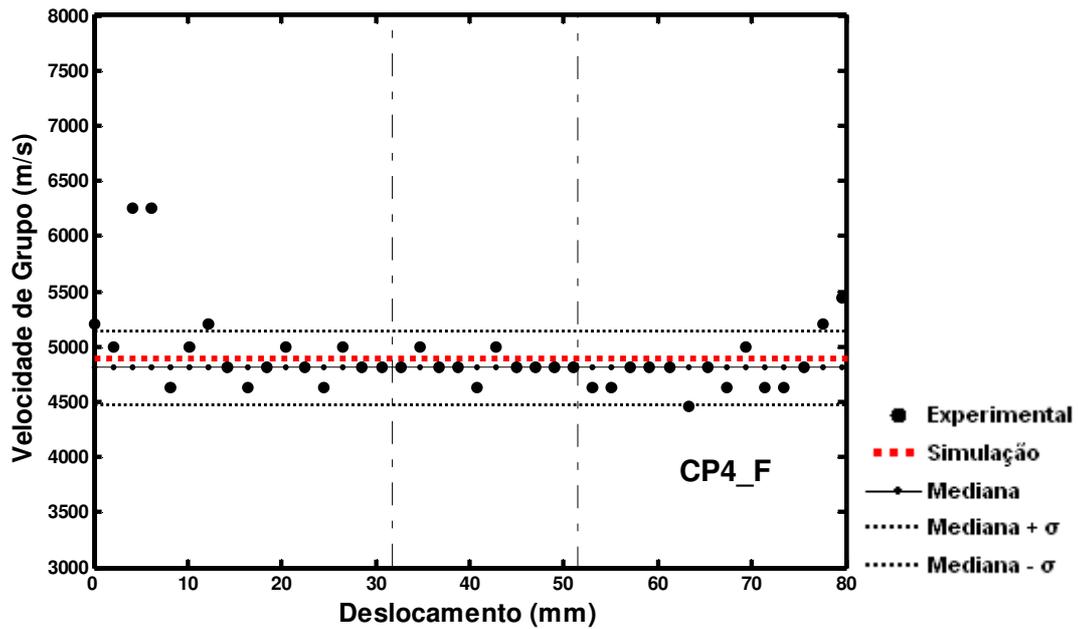


Figura 5.20 - Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

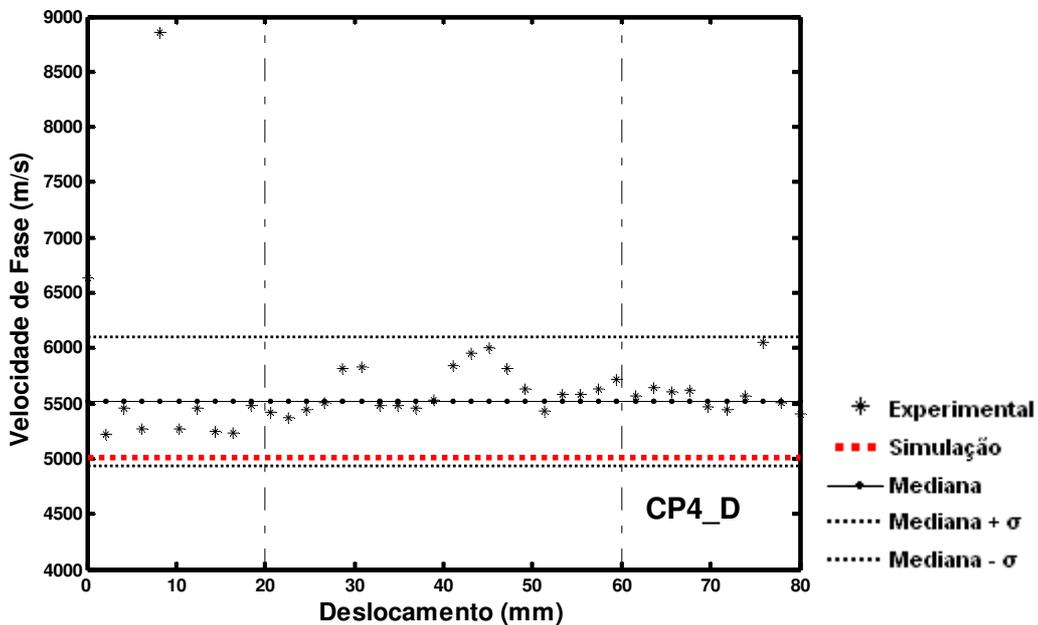


Figura 5.21 - Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

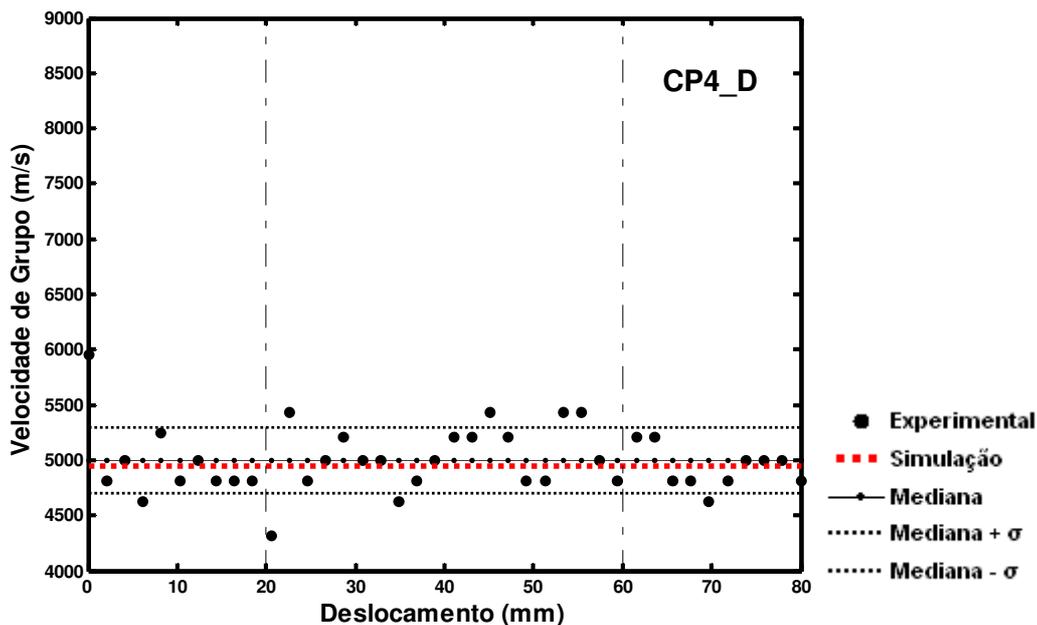


Figura 5.22 - Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

5.2.1.1 – ATRASO E AMPLITUDE DO PULSO TRANSMITIDO PELO CORPO DE PROVA PARA O MODO DE PROPAGAÇÃO S_0 POR ENSAIOS DE IMERSÃO

Na figura 5.23 é mostrada a diferença do atraso do modo de propagação S_0 ao transdutor-receptor devido à presença do defeito na chapa de alumínio com 0,5 mm de espessura. Observa-se que a região referente às bordas do defeito apresenta uma queda no tempo de percurso da onda e, no defeito, houve uma leve tendência de aumento no tempo de propagação. Este aumento pode ser causado pelo fato da onda propagar na água na região do defeito. A velocidade de grupo do modo de propagação S_0 no alumínio é de ~ 5435 m/s, na frequência de 0,79 MHz, e na água (defeito) a velocidade de propagação é de ~ 1500 m/s. Portanto, o atraso da onda deve aumentar.

A amplitude do sinal do modo de propagação S_0 em função da varredura da chapa de alumínio, figura 5.24, apresenta uma queda na região das bordas do defeito.

A figura 5.25 mostra o atraso do modo de propagação S_0 em função varredura do corpo de prova CP3_F. Não foi possível visualizar mudança no atraso devido a presença da fratura de fibras no corpo de prova. Possivelmente, não houve alteração no atraso porque a velocidade de grupo do modo de propagação S_0 do corpo de prova CP3 é similar à velocidade de grupo do alumínio (material da região do defeito). Contudo, a figura 5.26 mostra a amplitude do sinal do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP3_F. O aumento na amplitude do sinal é evidente. Supõe-se, então, que a onda propaga na região do defeito, através da chapa de alumínio.

Na figura 5.27-(a) é visualizado o A-scan do sinal transmitido na região sem defeito do corpo de prova CP3_F em ensaio por imersão, utilizando transdutores de 1MHz em incidência normal na configuração transmissão-recepção. E, na figura 5.27-(b) é visualizado o A-scan na região sob o defeito. Pode-se detectar a falha através da queda da amplitude do sinal na região com defeito. Uma vez que, as fibras/epóxi foram retiradas restando somente o alumínio, possivelmente exista vácuo no espaço vazio devido ao processo de fabricação do corpo de prova. Isso pode explicar a queda do sinal ao se propagar perpendicularmente ao corpo de prova, através do defeito.

Na figura 5.28 é visualizado o tempo de chegada do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP3_D. Não foi possível observar o atraso relativo a presença da delaminação no corpo de prova, apesar de se perceber uma variação nos tempos de chegada da onda na região com defeito. O C-Scan para este corpo de prova (técnica descrita no apêndice A) mostra a existência da delaminação. Portanto, a variação do tempo de chegada da onda na presença do defeito.

A heterogeneidade dos corpos de prova de LFMs é bem visualizada nas imagens C-scan (ver apêndice A), onde se pode observar que mesmo em corpos de prova sem defeito existem variações na amplitude do sinais. Provavelmente, esta heterogeneidade é função do processo de fabricação dos corpos de prova.

A amplitude do sinal do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP3_D é mostrada pela figura 5.29. A região delaminada também não é detectada.

Na figura 5.30-(a) é visualizado o A-scan do sinal transmitido na região sem defeito do corpo de prova CP3_D em ensaio por imersão, utilizando transdutores de 1MHz em incidência normal na configuração transmissão-recepção. E, na figura 5.30-(b) é visualizado o A-scan na região sob o defeito. Pode-se observar que não houve queda de amplitude do sinal na região com defeito.

Na figura 5.31 pode-se visualizar o atraso em função da varredura no corpo de prova CP4_F. O atraso é menor quando a onda propaga pela região com defeito. Da mesma forma que no caso do corpo de prova CP3_F em imersão, a onda deve propagar apenas pelo alumínio. Como a velocidade do alumínio é maior que a do modo de propagação S_0 neste corpo de prova, na região do defeito o atraso é negativo na região do defeito. Embora os corpos de prova sejam diferentes, o mecanismo de propagação da onda de Lamb na região do defeito visto por TOYAMA *et al.* ^[42] é semelhante ao proposto nesta pesquisa.

A figura 5.32 mostra a amplitude do sinal do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP4_F. Observa-se aumento significativo na amplitude do sinal na região da fratura de fibras.

Na figura 5.33-(a) é visualizado o A-scan do sinal transmitido na região sem defeito do corpo de prova CP4_F em ensaio por imersão, utilizando transdutores de 1MHz em incidência normal na configuração transmissão-recepção. E, na figura 5.33-(b) é visualizado o A-scan na região sob o defeito. E, da mesma forma que no corpo de prova CP3_F, a falha é detectada, em função da possível existência de vácuo ocupando o espaço das fibras que foram retiradas para simular o defeito.

Para o corpo de prova CP4_D, a figura 5.34, mostra que não houve variação no atraso no sinal em toda faixa varrida no corpo de prova. Na figura 5.35 se observa que a amplitude do sinal também não varia na faixa de varredura do corpo de prova.

Na figura 5.36-(a) é visualizado o A-scan do sinal transmitido na região sem defeito do corpo de prova CP4_D em ensaio por imersão, utilizando transdutores de 1MHz em incidência normal na configuração transmissão-recepção. E, na figura 5.36-(b) é visualizado o A-scan na região sob o defeito. Pode-se observar que também não houve queda de amplitude do sinal na região com defeito. Comparando com a imagem do C-scan (ver apêndice A), que também não visualiza o defeito, é possível

que no processo de fabricação, a delaminação simulada tenha sido descaracterizada.

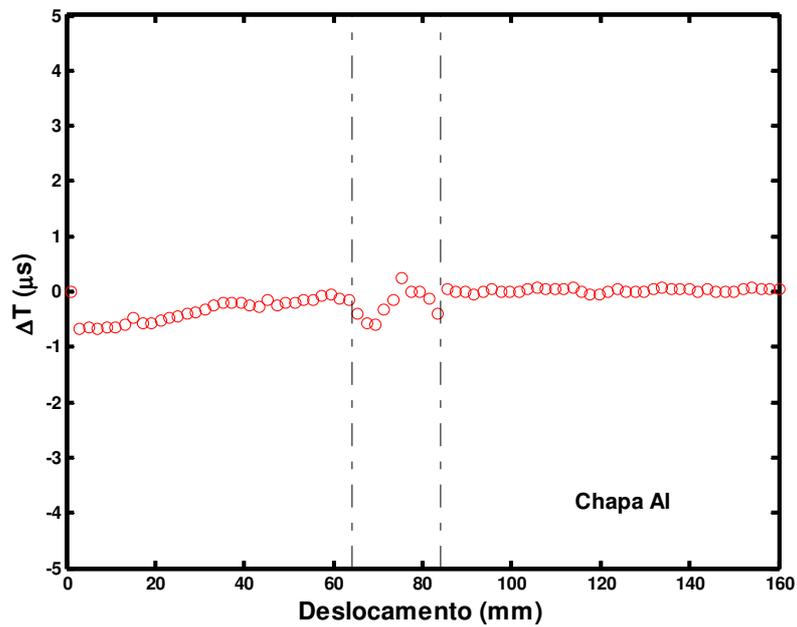


Figura 5.23 – Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X_1 da chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura num total de 80 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra o furo.

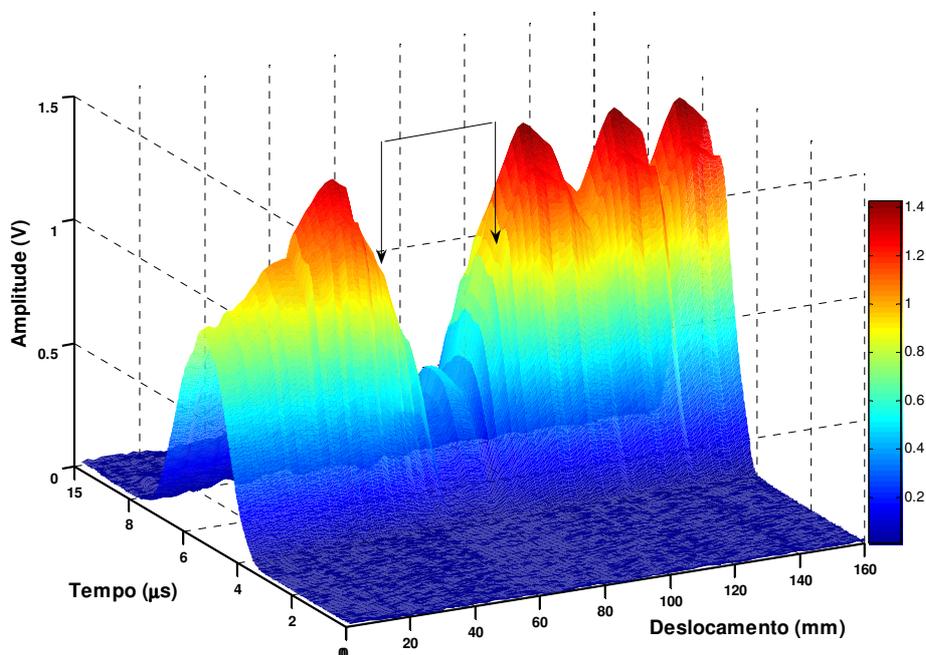


Figura 5.24 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura da chapa de alumínio de 0,5 mm de espessura num total de 80 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As setas verticais delimitam a região onde se encontra o furo.

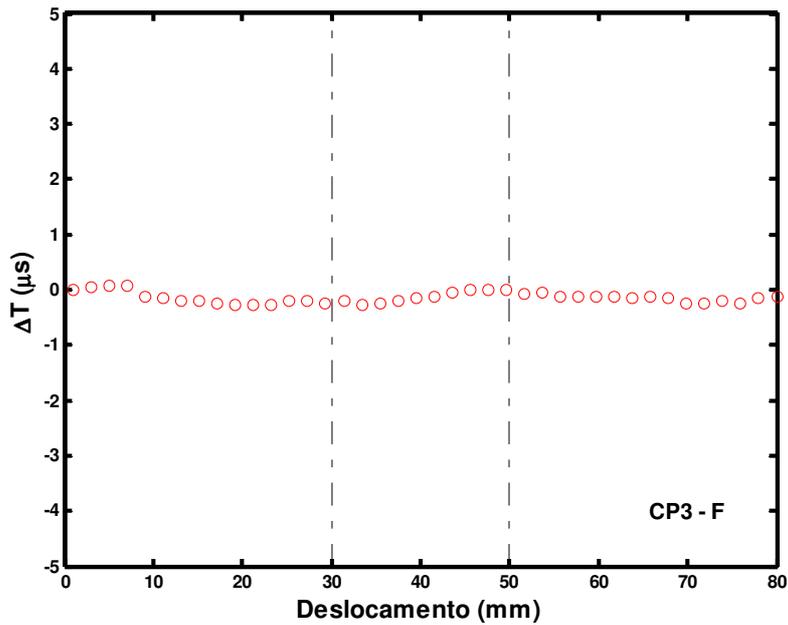


Figura 5.25 – Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial $X1$ do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

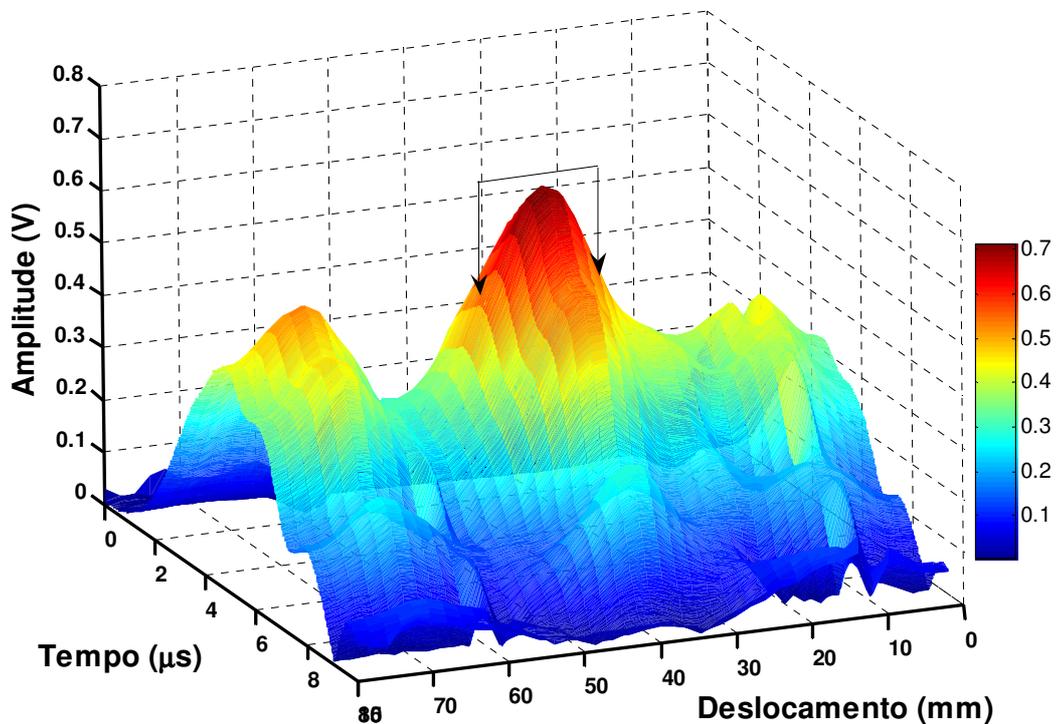


Figura 5.26 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP3_F em ensaio por imersão num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

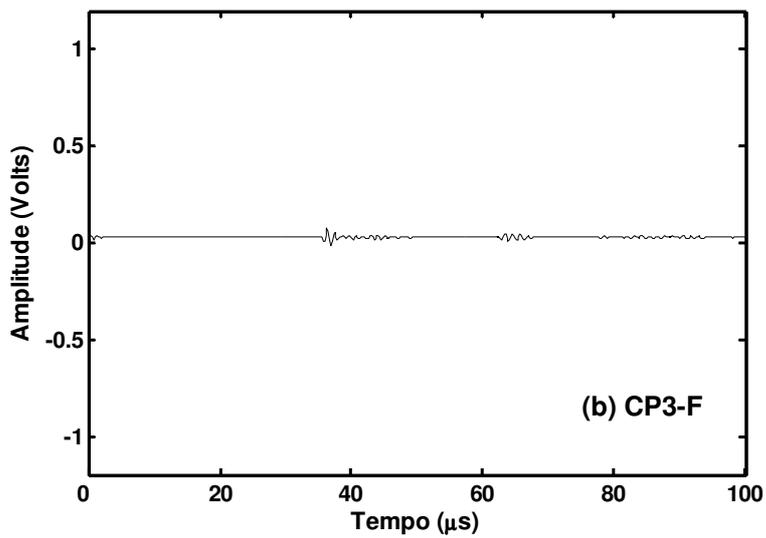
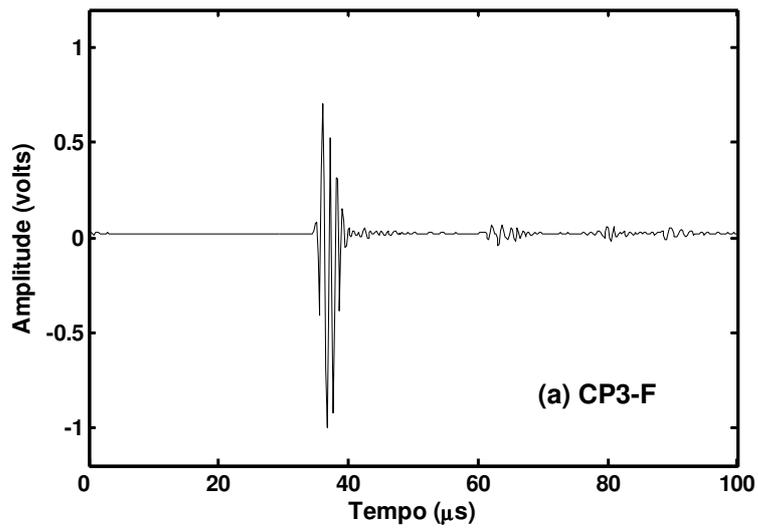


Figura 5.27 – A-scan dos sinais obtidos por incidência normal em imersão por transmissão-recepção no corpo de prova CP3_F nas regiões: (a) sem defeito; (b) sob a fratura de fibras.

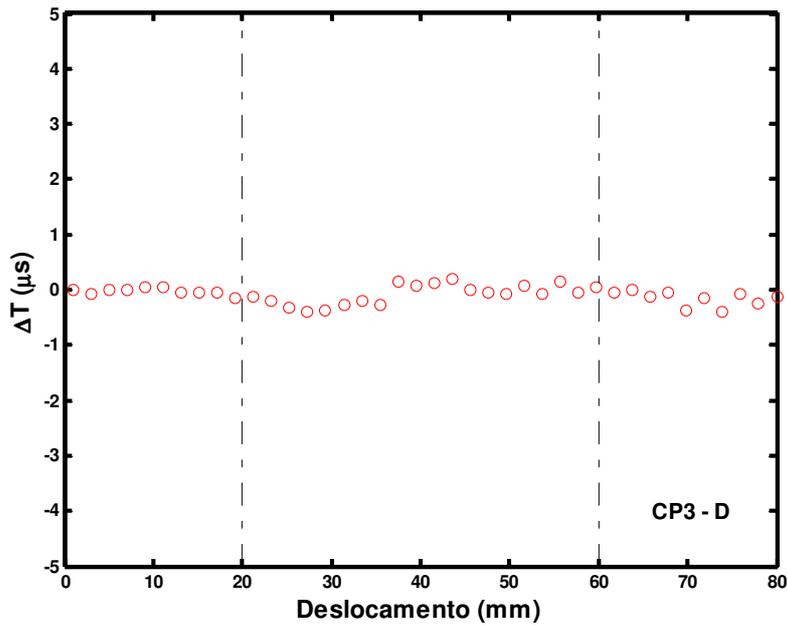


FIGURA 5.28 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X_1 do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

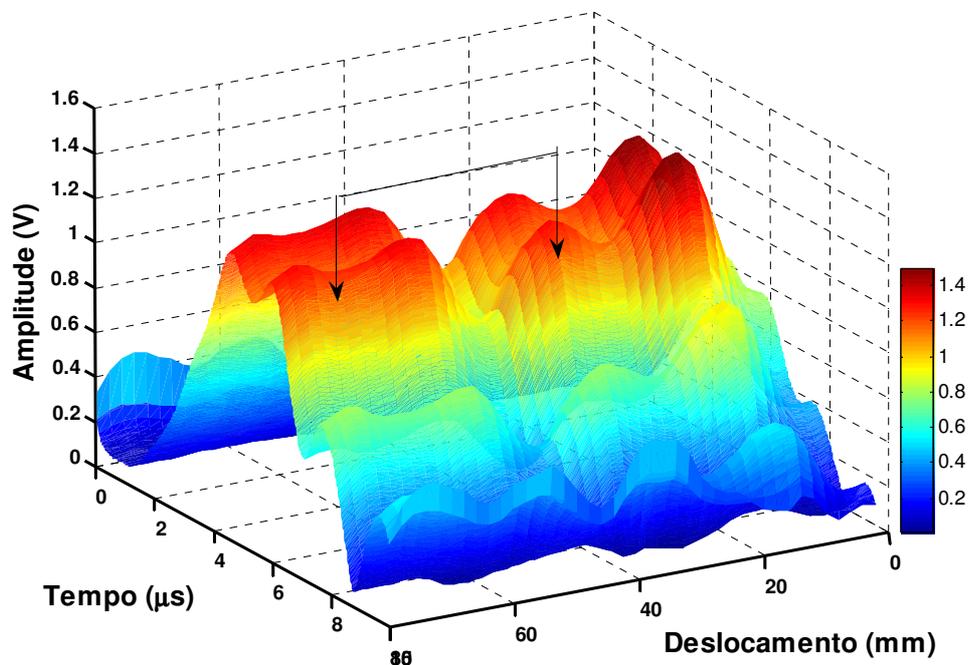


FIGURA 5.29 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP3_D em ensaio por imersão num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

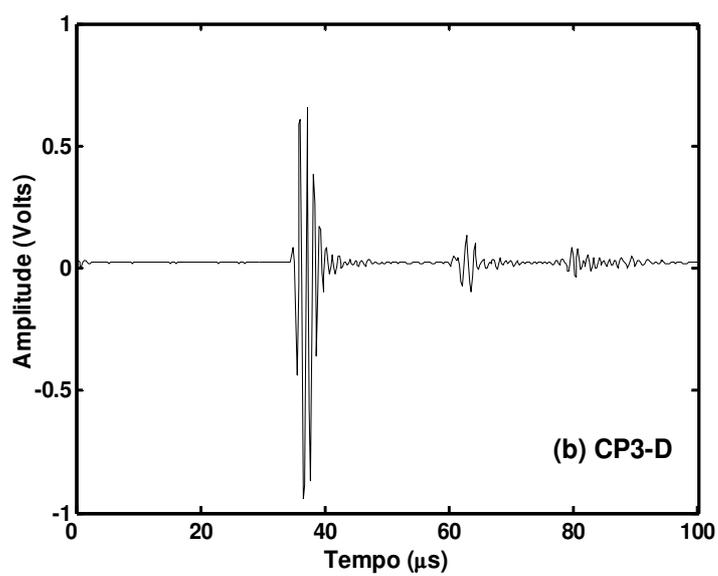
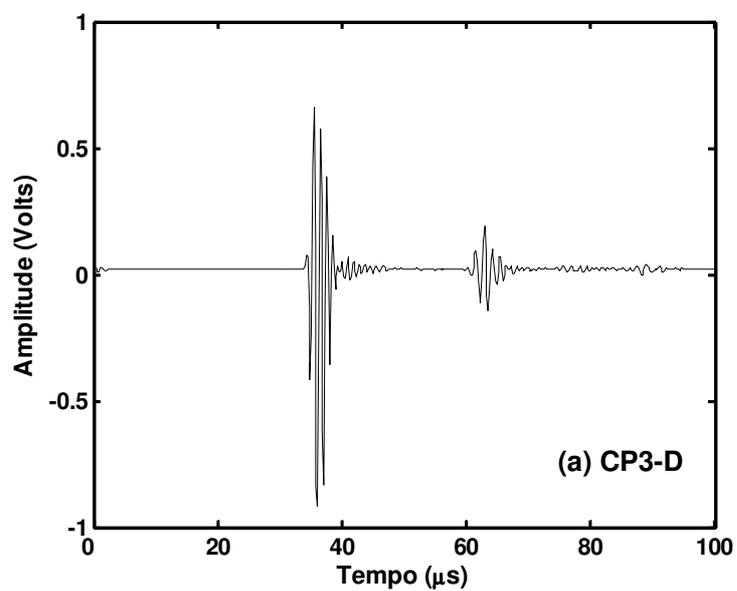


FIGURA 5.30 – A-scan dos sinais obtidos por incidência normal em imersão por transmissão-recepção no corpo de prova CP3_D nas regiões: (a) sem defeito; (b) sob a delaminação.

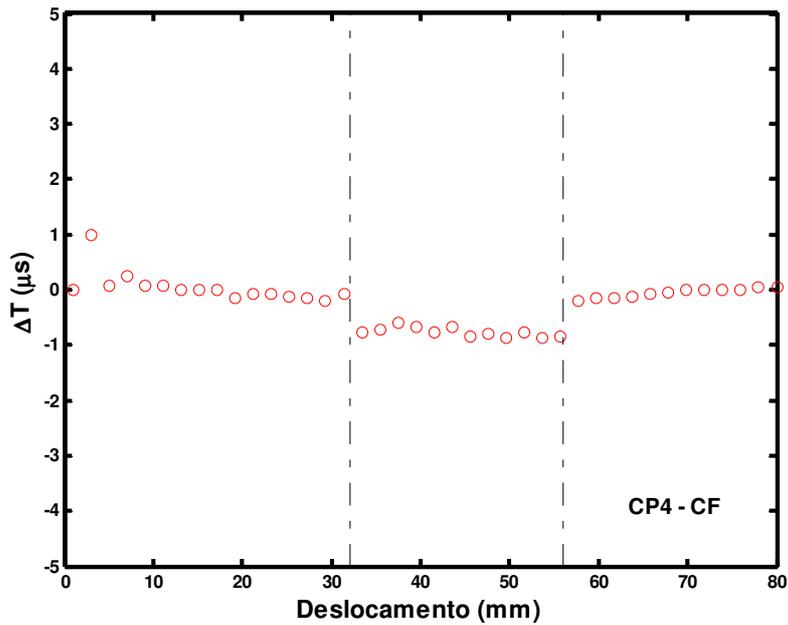


Figura 5.31 - Atraso ΔT do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial $X1$ do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

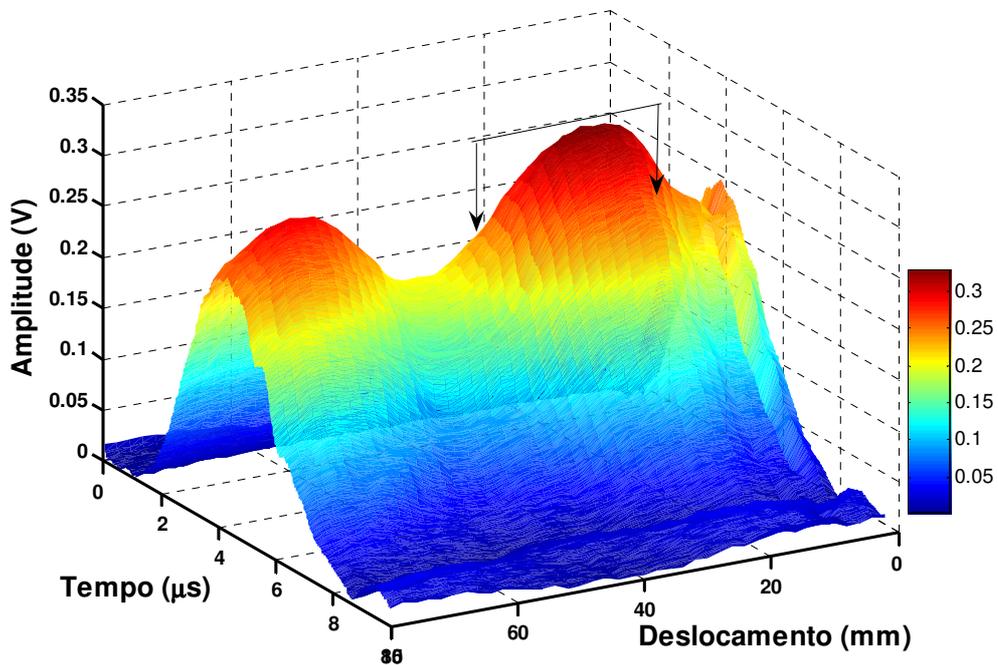


Figura 5.32 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP4_F em ensaio por imersão num total de 50 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

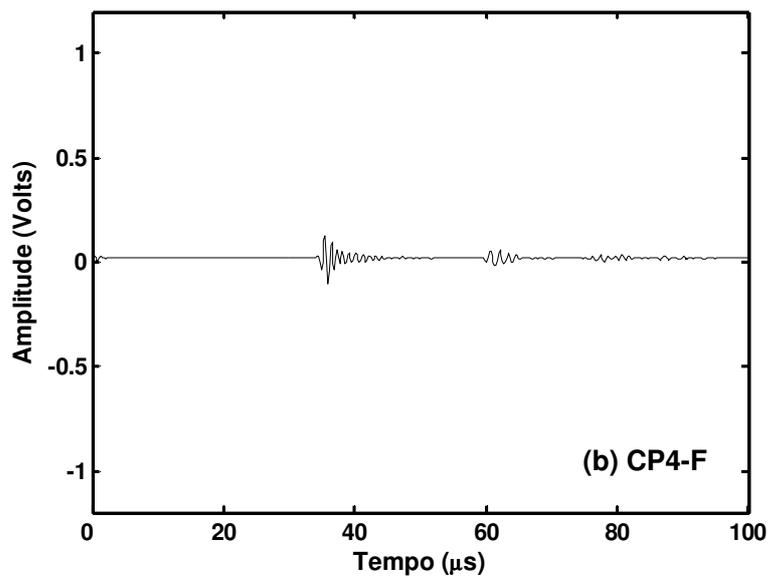
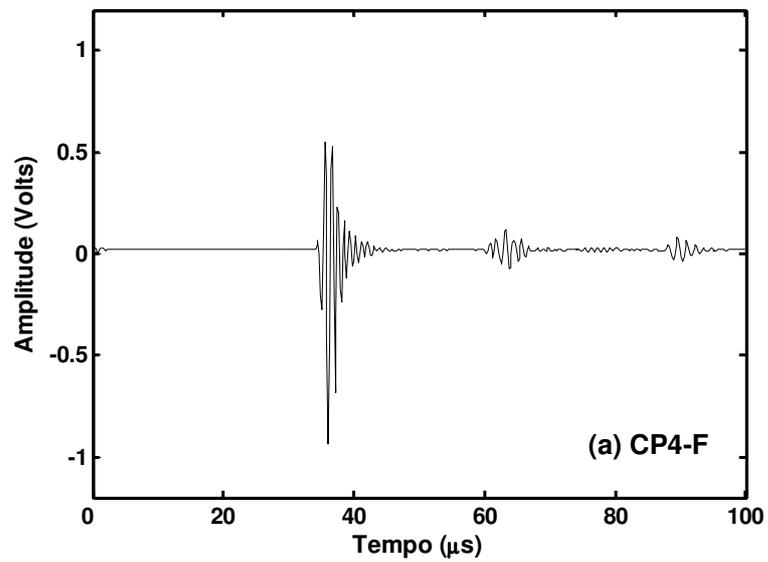


Figura 5.33 – A-scan dos sinais obtidos por incidência normal em imersão por transmissão-recepção no corpo de prova CP4_F nas regiões: (a) sem defeito; (b) sob a fratura de fibras.

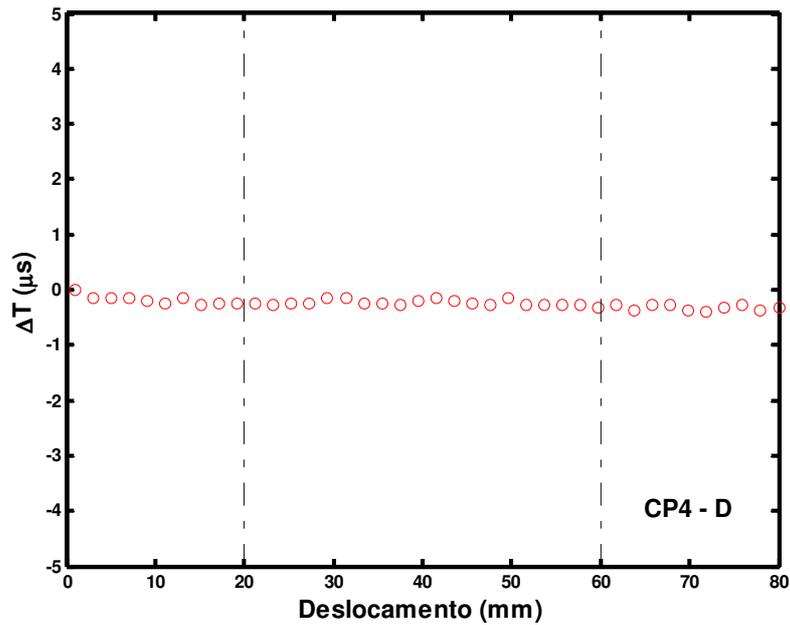


Figura 5.34 - Atraso ΔT do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X_1 do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio por imersão. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

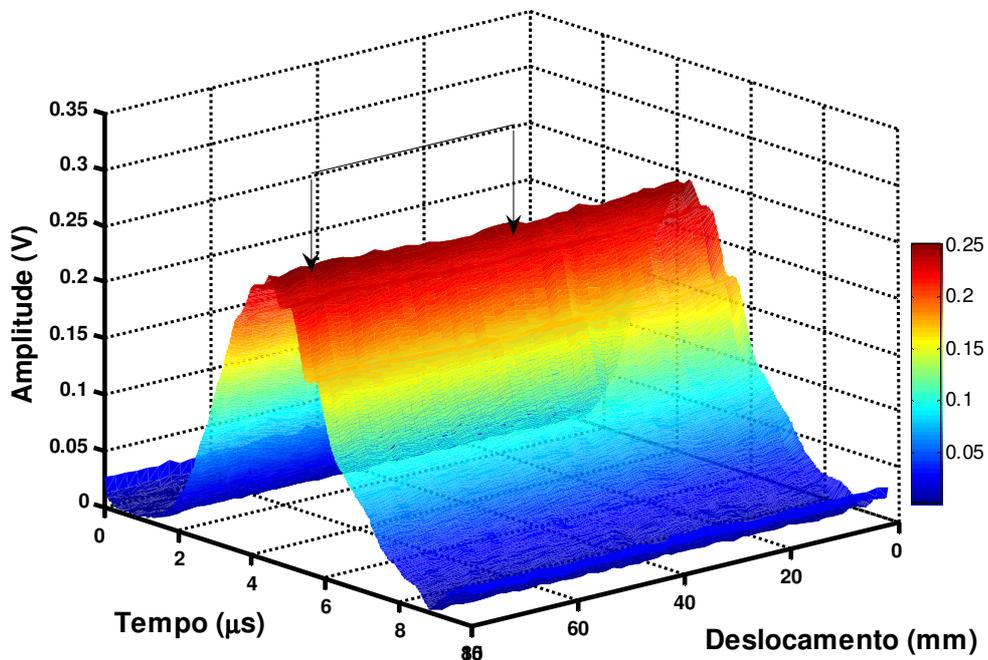


Figura 5.35 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP4_D em ensaio por imersão num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

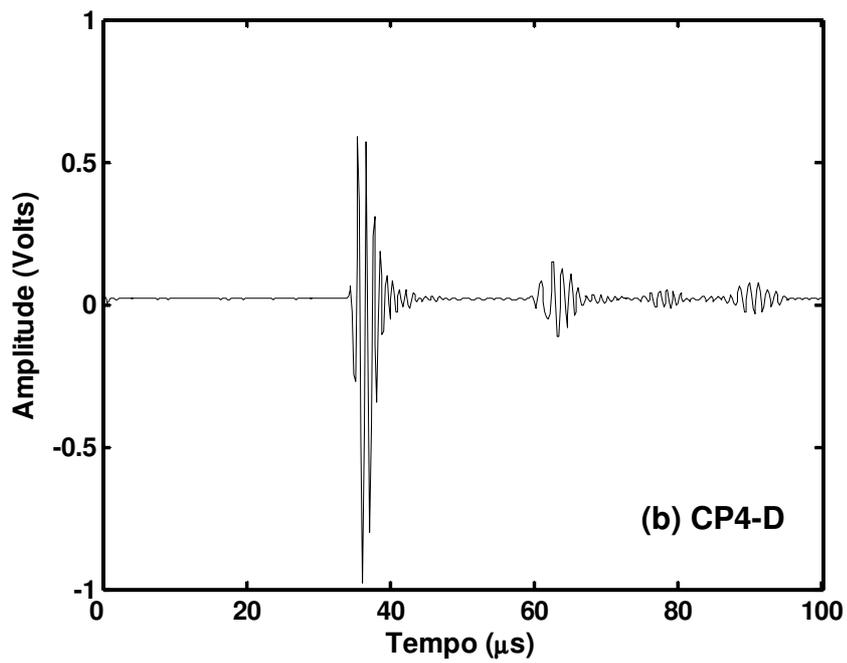
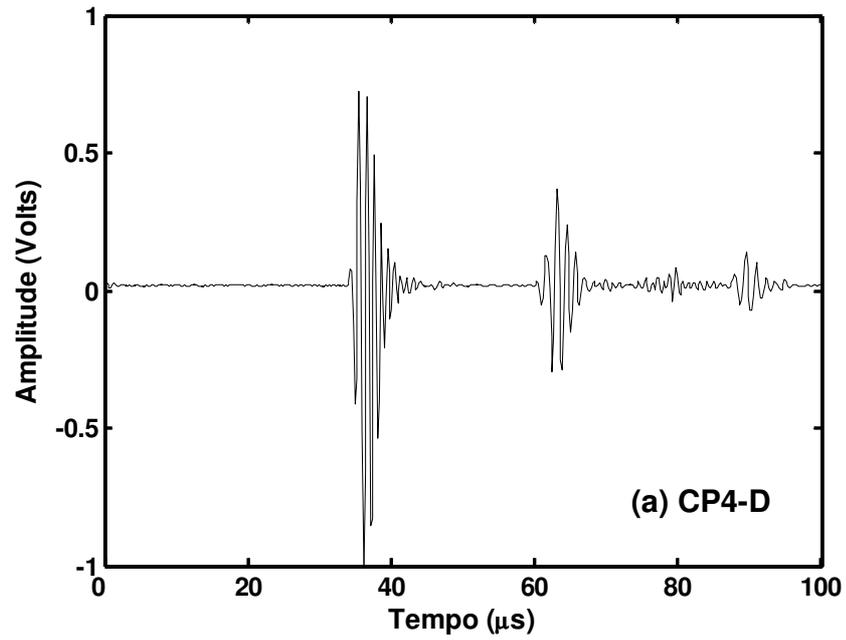


Figura 5.36 – A-scan dos sinais obtidos por incidência normal em imersão por transmissão-recepção no corpo de prova CP4_D nas regiões: (a) sem defeito; (b) sob a delaminação.

5.2.2 – VELOCIDADES DE FASE E DE GRUPO OBTIDAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CONTATO COM SAPATA DE PERSPEX NA CONFIGURAÇÃO TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO

As figuras 5.37 e 5.38 mostram os valores das velocidades de fase e de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidos durante a varredura do corpo de prova CP3_F por ensaio de contato com sapata de perspex. Pode-se observar que tanto na velocidade de fase quanto na de grupo, a maioria dos valores obtidos experimentalmente se encontra nos limites de ± 1 desvio-padrão em torno da mediana. A frequência considerada para os corpos de prova CP3 por simulação para ensaio de contato foi de 0,75 MHz (valor de frequência fora da banda de -6dB dos transdutores utilizados conforme mostra a figura 4.27). A diferença entre a mediana dos valores experimentais e o valor simulado para a velocidade de fase, $\Delta V_{F_{MS}}$ é de ~ 197 m/s e para a velocidade de grupo, $\Delta V_{G_{MS}}$, é de ~ 565 m/s, considerando a frequência medida experimentalmente de $\sim 0,77$ MHz. As medianas dos valores experimentais das velocidades de fase e de grupo são similares, indicando que na frequência experimental, o meio é não dispersivo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 . Isto é confirmado pelas curvas de dispersão, figuras 5.7 e 5.8, obtidas por simulação. Neste caso, pode-se considerar que a equação 3.24 se reduz a: $V_g \cong V_f$.

Nas figuras 5.39 e 5.40 são mostrados, respectivamente, os valores experimentais para as velocidades de fase e de grupo do modo de propagação da onda de Lamb S_0 em função do deslocamento dos transdutores pelo corpo de prova CP3_D. Neste caso, também se observa que tanto para a velocidade de fase quanto para a de grupo, a maioria dos valores obtidos experimentalmente se encontra nos limites ± 1 desvio-padrão em torno da mediana. Como a frequência considerada para os corpos de prova CP3 por simulação para ensaio de contato foi de 0,75 MHz, a diferença entre a mediana dos valores experimentais e o valor simulado para a velocidade de fase, $\Delta V_{F_{MS}}$ é de ~ 407 m/s e para a velocidade de grupo, $\Delta V_{G_{MS}}$ é de ~ 616 m/s, considerando a frequência medida experimentalmente de $\sim 0,80$ MHz. Considerando a equação 3.24, os valores experimentais das velocidades de fase e de grupo seguem a ordem para o corpo de prova CP3 em ensaio de contato, ou seja, $V_g < V_f$.

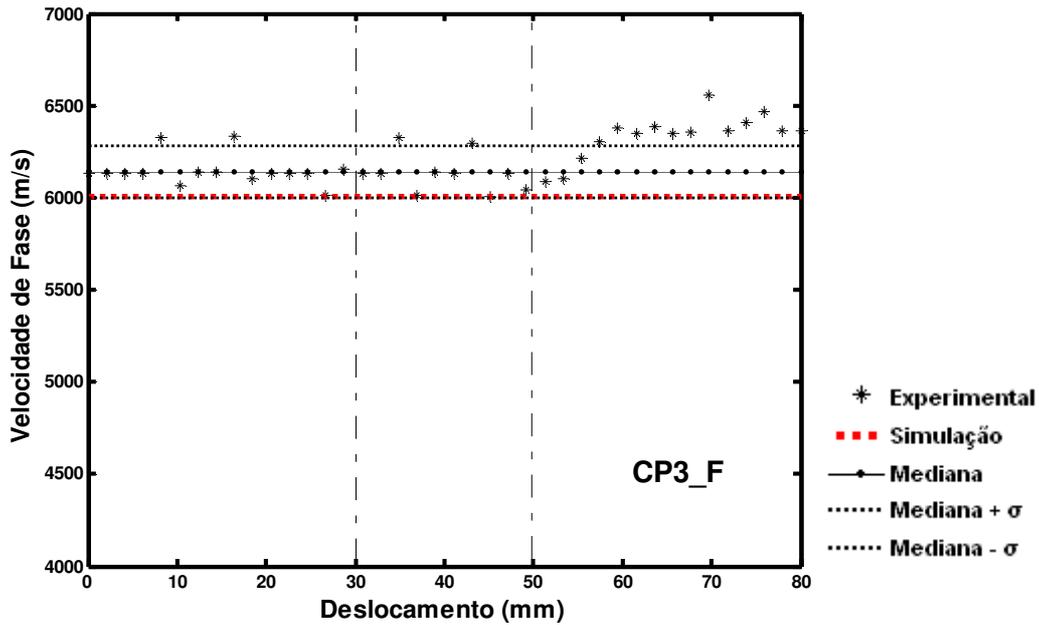


Figura 5.37 – Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

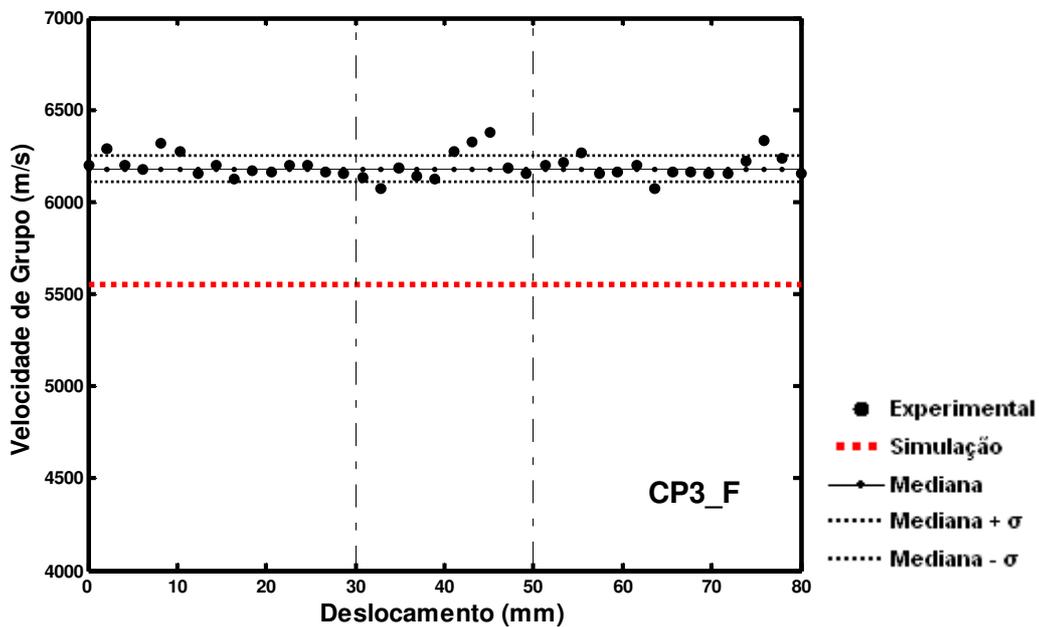


Figura 5.38 – Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

Para os corpos de prova CP3_F e CP3_D, as medianas dos valores experimentais por ensaio de contato, (ver tabela 3 do anexo A) mostram uma diferença percentual

de ~ 19% para os valores da velocidade de grupo e uma diferença de ~ 3,4% para os valores da velocidade de fase.

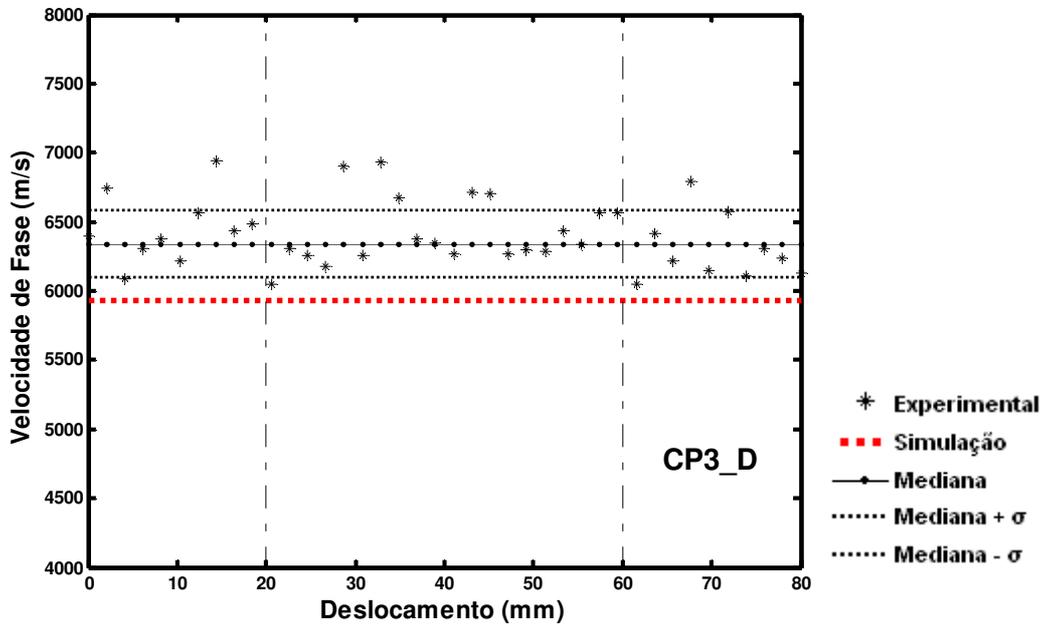


Figura 5.39 – Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

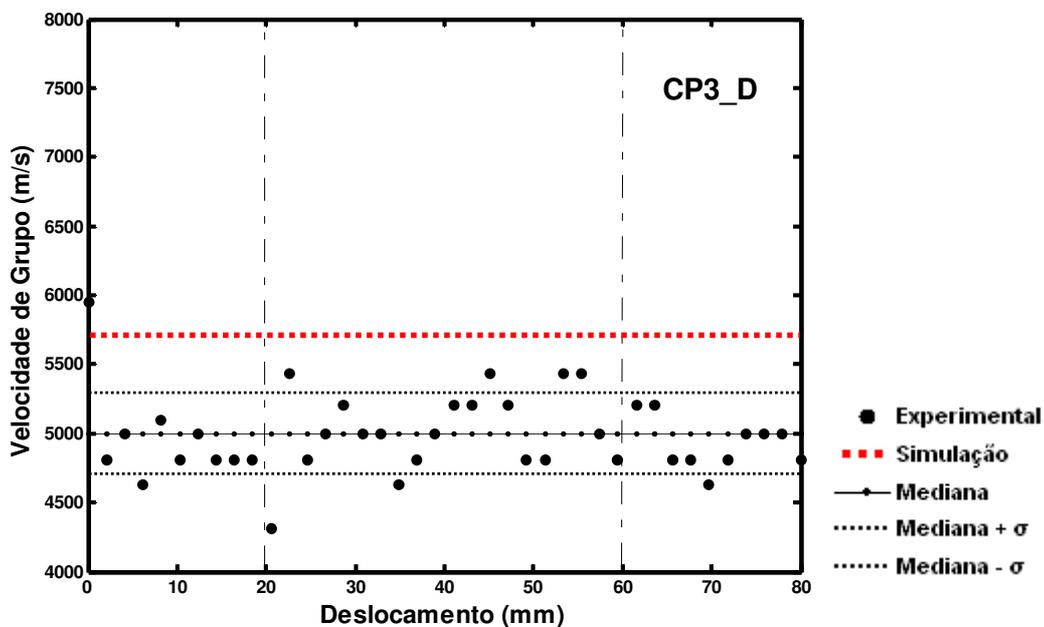


Figura 5.40 – Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

As figuras 5.41 e 5.42 ilustram, respectivamente, os valores experimentais das velocidades de fase e de grupo obtidos durante a varredura do corpo de prova CP4_F por ensaio de contato por sapata de perspex. A maioria dos valores obtidos experimentalmente se encontra nos limites ± 1 desvio-padrão em torno da mediana $\Delta VF_{MS} \sim 166$ m/s e $\Delta VG_{MS} \sim 266$ m/s. O valor considerado para a frequência simulada foi de 0,95 MHz. Contudo, a frequência verificada experimentalmente foi de $\sim 0,70$ MHz, fora da banda de -6 dB do transdutor-transmissor. Neste valor de frequência, as velocidades de fase e de grupo simuladas se aproximam da mediana dos valores obtidos experimentalmente, como mostra a tabela 4 do Anexo A. A diferença entre a mediana dos valores experimentais cai para ~ 15 m/s para a velocidade de fase e ~ 11 m/s para a velocidade de grupo. Para o corpo de prova CP4__F, considerando a equação 3.24, os valores experimentais das velocidades de fase e de grupo seguem a ordem para ensaio em imersão, ou seja, $V_g \leq V_f$.

Nas figuras 5.43 e 5.44, se visualizam os resultados experimentais para as velocidades de fase e de grupo, obtidos durante a varredura do corpo de prova CP4_D em ensaio por contato por sapata de perspex. Para este corpo de prova, a maioria dos valores experimentais para a velocidade de fase está contida nos limites de ± 1 desvio-padrão em torno da mediana, sendo a diferença entre a mediana dos valores experimentais e o valor simulado da velocidade de fase, $\Delta VF_{MS} \sim 160$ m/s considerando a frequência selecionada por simulação de 0,95 MHz. Levando-se em conta a frequência medida experimentalmente, $\sim 0,71$ MHz, essa diferença cai para ~ 15 m/s. Em relação a velocidade de grupo, a maioria dos valores experimentais está contida nos limites de ± 1 desvio-padrão em torno da mediana e ΔVG_{MS} é ~ 541 m/s para a frequência considerada na simulação e ~ 264 m/s na frequência experimental.

Para os corpos de prova CP4_F e CP4_D, as medianas dos valores experimentais obtidos para as velocidades de fase e de grupo por ensaio de contato, (ver tabela 3 do anexo A), mostram uma diferença percentual de $\sim 5,7\%$ para os valores da velocidade de grupo e de $\sim 0,11\%$ para os valores da velocidade de fase.

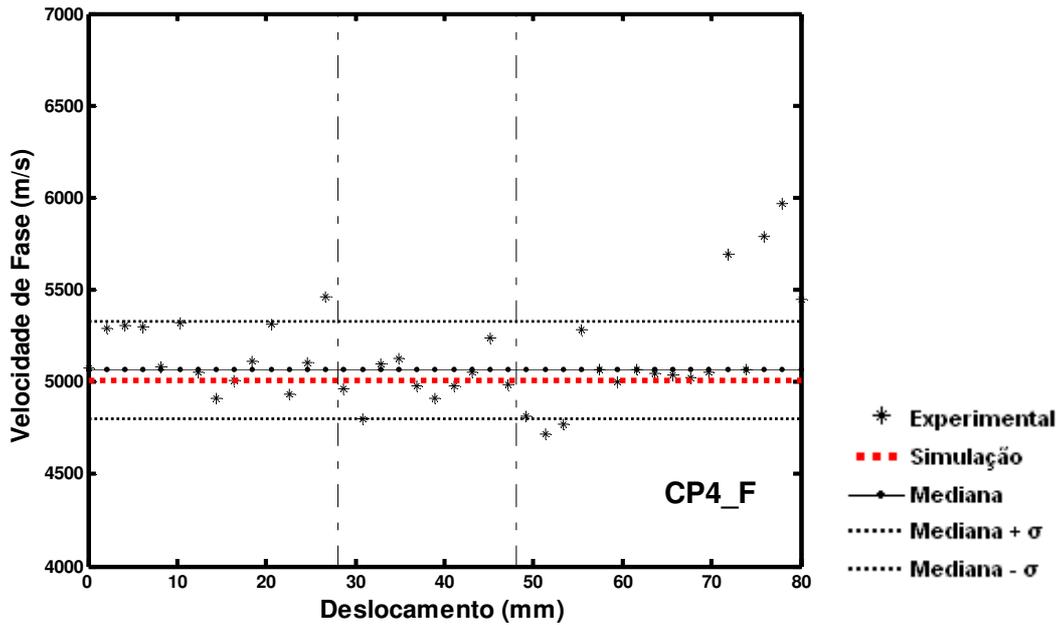


Figura 5.41 – Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

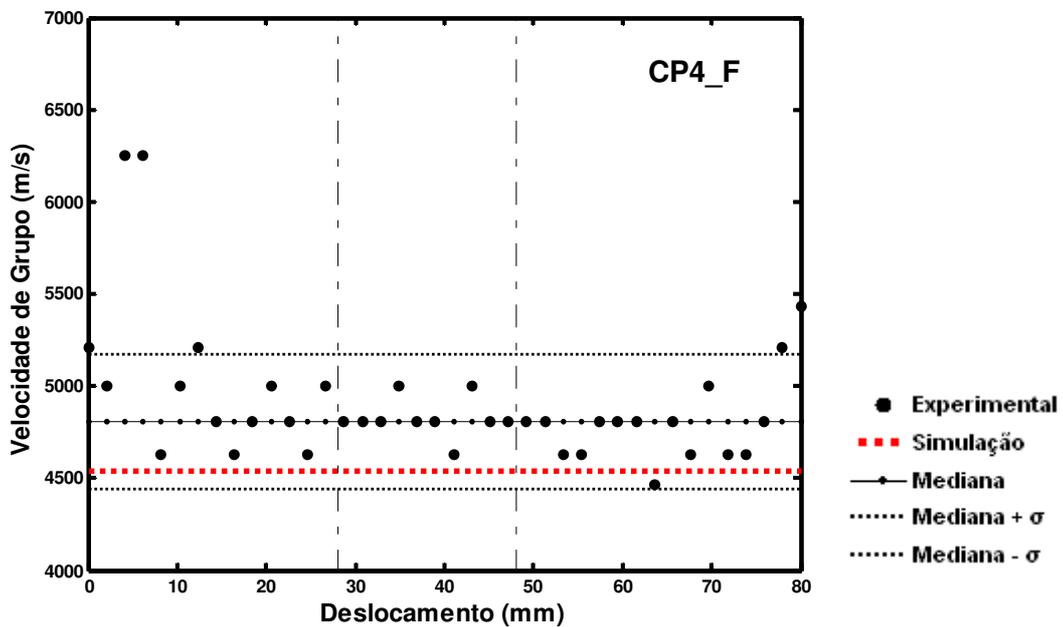


Figura 5.42 – Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

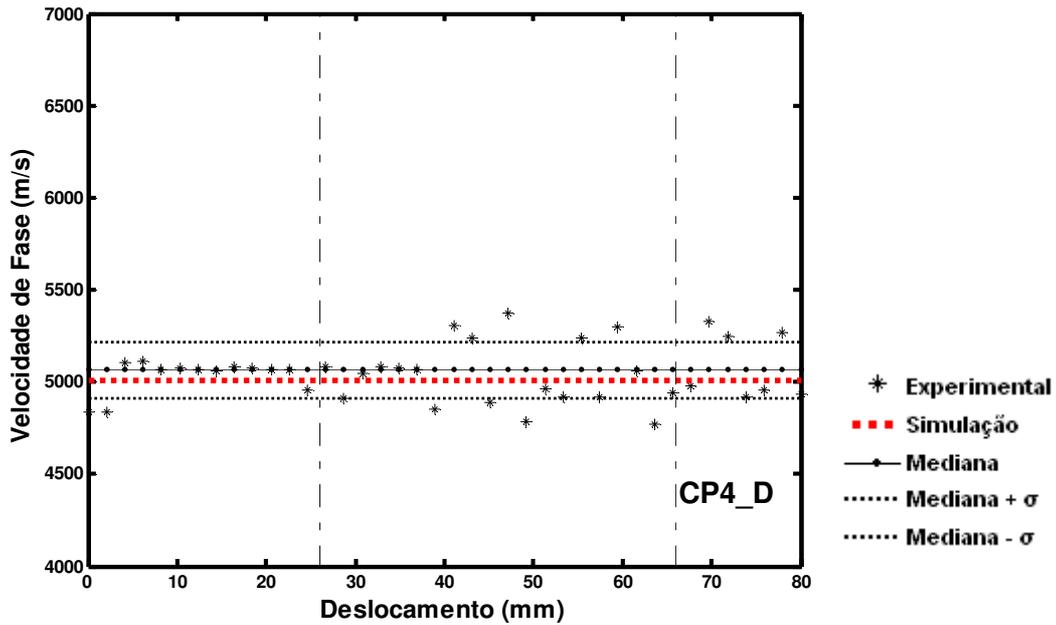


Figura 5.43 – Velocidades de fase para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

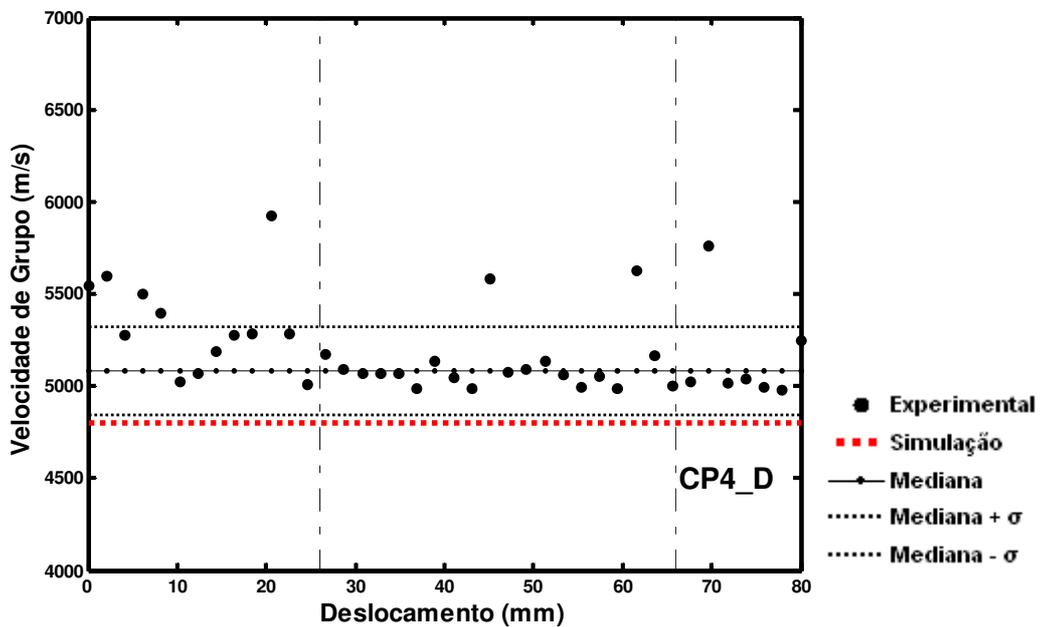


Figura 5.44 – Velocidades de grupo para o modo de propagação da onda de Lamb S_0 obtidas na varredura do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

5.2.2.1- ATRASO E AMPLITUDE DO PULSO TRANSMITIDO PELO CORPO DE PROVA PARA O MODO DE PROPAGAÇÃO S_0 POR ENSAIO DE CONTATO COM SAPATA DE PERSPEX.

A figura 5.45 mostra o atraso do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP3_F em ensaio por contato com sapata de perspex. É possível visualizar mudança no atraso na região das bordas do defeito. Mas, da mesma forma que no ensaio de imersão, possivelmente, não houve alteração no atraso na região do defeito, possivelmente porque a velocidade de grupo do modo de propagação S_0 do corpo de prova CP3_F possui valor próximo ao da velocidade de grupo do alumínio (material da região do defeito), conforme mostra a tabela 1 do anexo A. Supõe-se, então, que a onda propaga na região do defeito, através da chapa de alumínio.

A figura 5.46 mostra a amplitude do sinal do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP3_F. Ocorre queda da amplitude do sinal nas bordas do defeito e não há mudança na amplitude do sinal na região do defeito.

Na figura 5.47 é visualizado o atraso do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP3_D. Novamente, foi possível visualizar mudança no atraso na região das bordas do defeito. Mas, da mesma forma que no ensaio de imersão, possivelmente, não houve alteração no atraso na região do defeito, possivelmente porque a velocidade de grupo do modo de propagação S_0 do corpo de prova CP3 é similar à velocidade de grupo do alumínio (material da região do defeito), conforme mostram as tabelas 1, 2 e 3 do anexo A. Supõe-se, então, que a onda propaga através da chapa de alumínio na região do defeito. O C-Scan para este corpo de prova (ver apêndice A) mostra a existência da delaminação.

A amplitude do sinal do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP3_D é mostrada pela figura 5.48. Observa-se que nas bordas da delaminação a amplitude do sinal diminui.

Na figura 5.49 pode-se visualizar o atraso em função da varredura no corpo de prova CP4_F. Apesar do atraso variar ao longo da varredura do corpo de prova, percebe-se que o mesmo é negativo quando a onda propaga pela região central do defeito. Neste caso, também pode-se supor que a onda propaga, através da chapa de

alumínio na região do defeito. O atraso é negativo, pois a velocidade do modo de propagação no corpo de prova CP4 é menor do que a sua velocidade no alumínio (conforme mostram as tabelas 1, 2 e 3 do anexo A).

A figura 5.50 mostra a amplitude do sinal do modo de propagação S_0 em função da varredura do corpo de prova CP4_F. Observa-se uma queda na amplitude do sinal nas bordas da fratura de fibras.

Para o corpo de prova CP4_D, a figura 5.51 mostra que não houve variação no atraso no sinal na região do defeito. Na figura 5.52 se observa que a amplitude do sinal também não varia na faixa de varredura do corpo de prova. Analisando a imagem do C-scan, nota-se a ausência do defeito. Portanto, é possível que no processo de fabricação a delaminação simulada tenha sido descaracterizada.

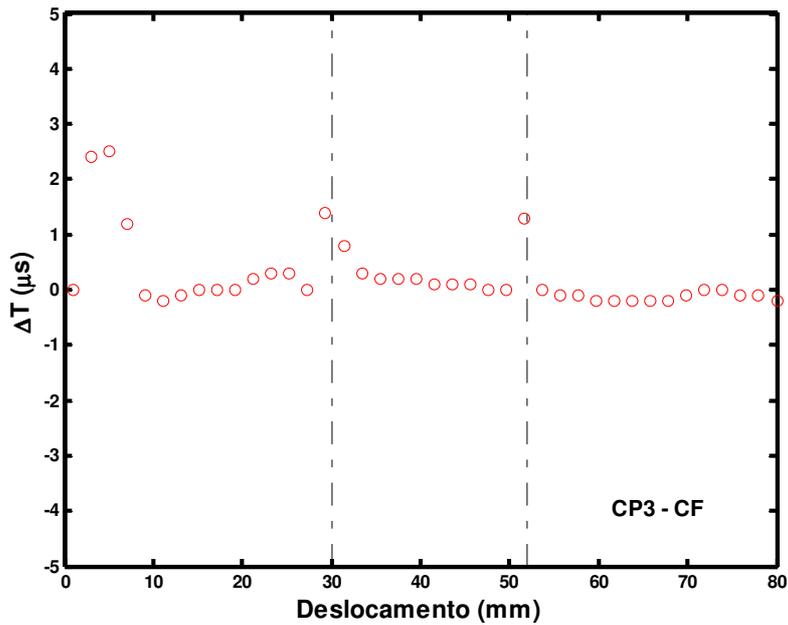


Figura 5.45 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP3_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

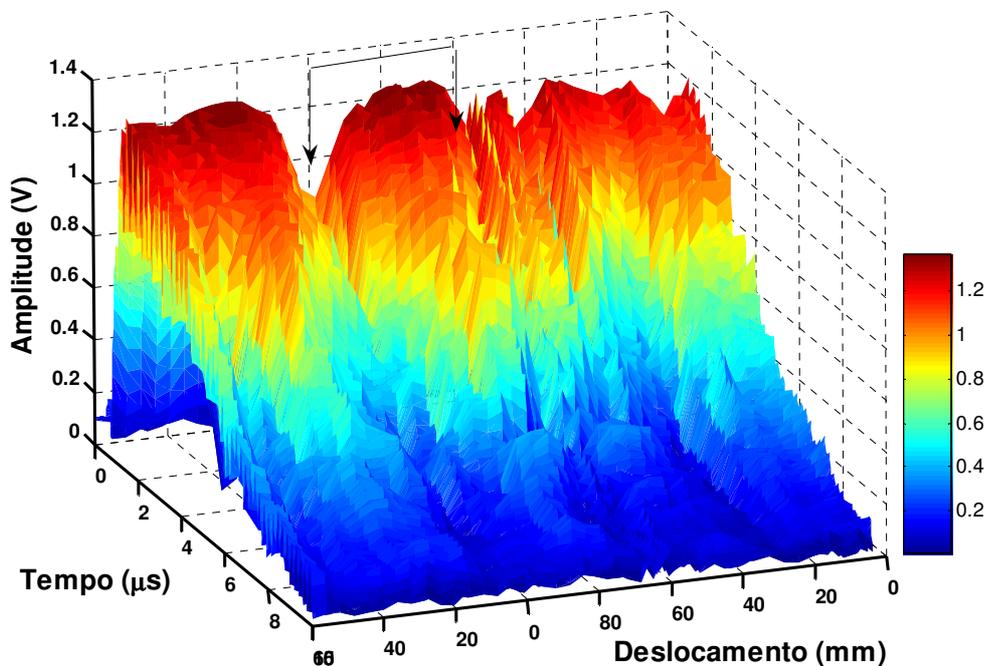


FIGURA 5.46 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida pela varredura do corpo de prova CP3_F em ensaio por contato com sapata de perspex num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

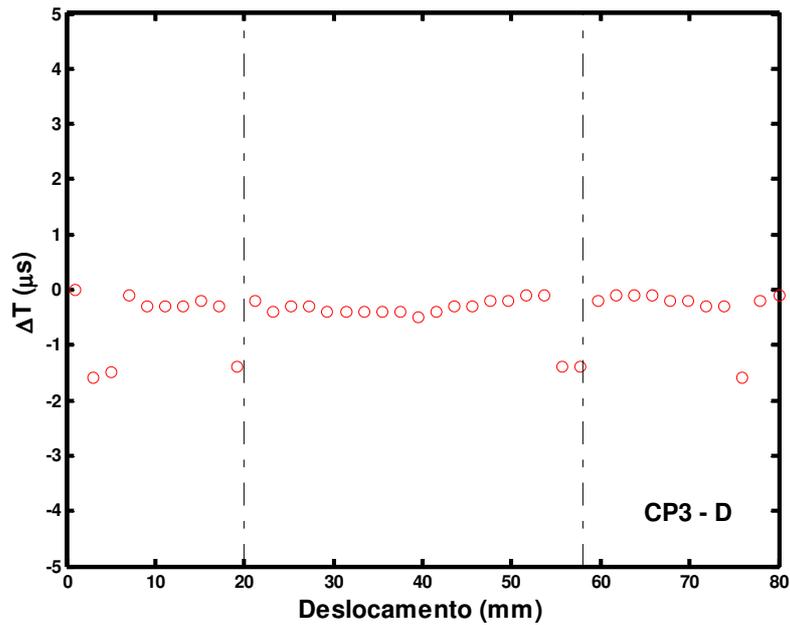


FIGURA 5.47 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X1 do corpo de prova CP3_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.a delaminação.

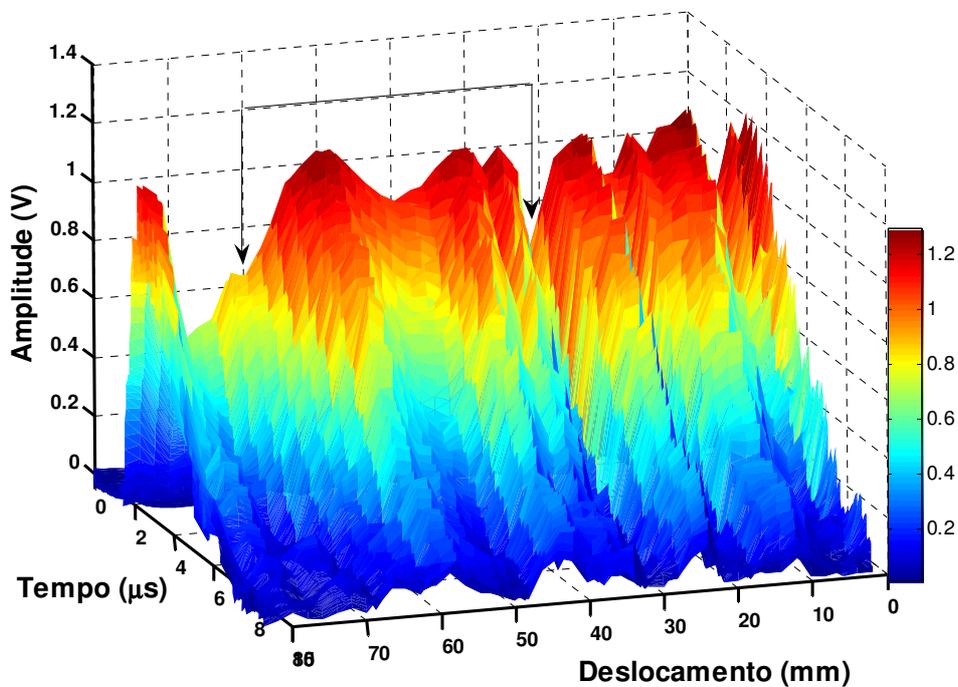


Figura 5.48 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida na varredura do corpo de prova CP3_D em ensaio por contato com sapata de perspex num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

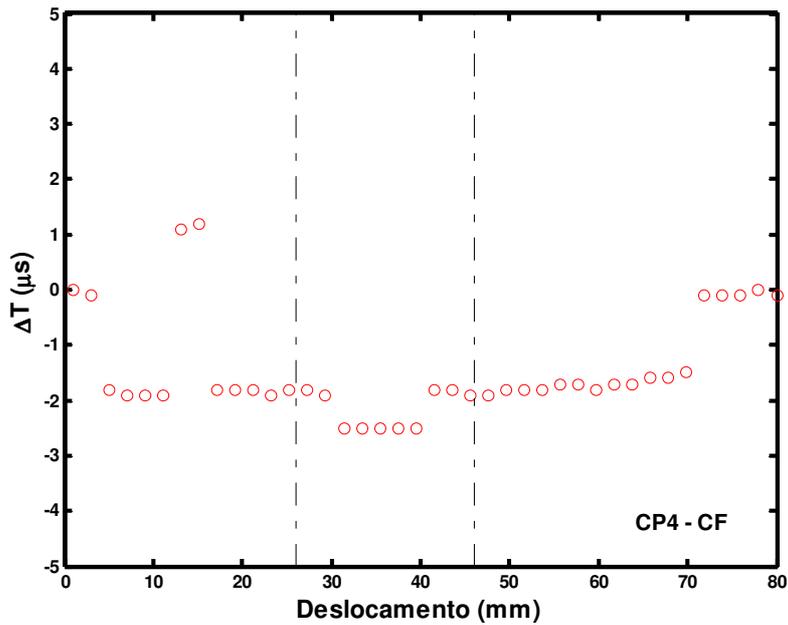


FIGURA 5.49 - Atraso Δt do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial X_1 do corpo de prova CP4_F num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

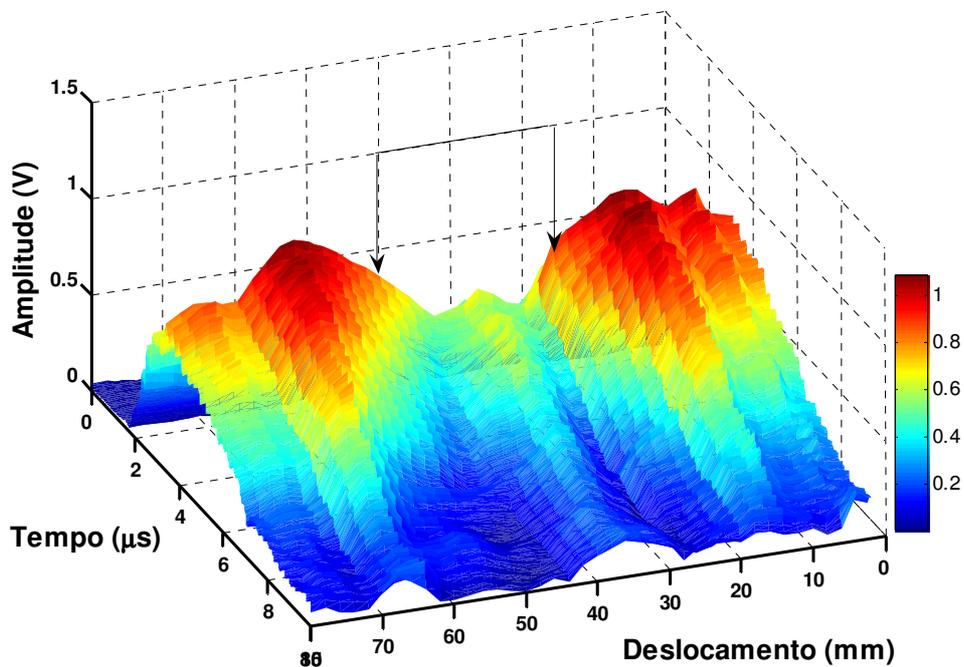


FIGURA 5.50 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida na varredura do corpo de prova CP4_F em ensaio por contato com sapata de perspex num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a fratura de fibras.

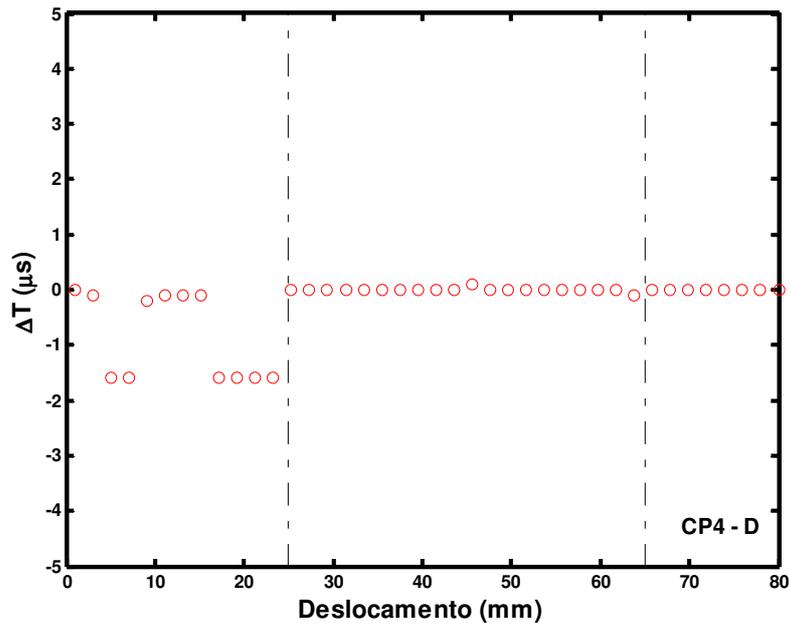


Figura 5.51 - Atraso ΔT do pulso transmitido em relação ao pulso de referência para o modo de propagação S_0 em função da varredura na posição inicial $X1$ do corpo de prova CP4_D num total de 40 pontos com passo de 2 mm em ensaio de contato com sapata de perspex. As linhas tracejadas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

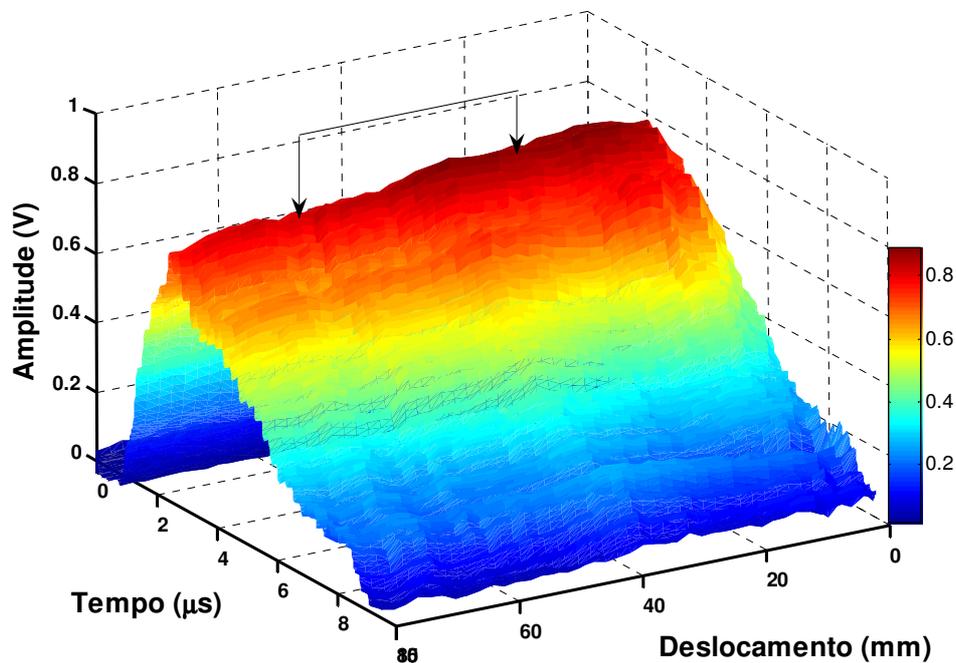


Figura 5.52 – Amplitude do sinal do modo de propagação da onda de Lamb S_0 , obtida na varredura do corpo de prova CP4_D em ensaio por contato com sapata de perspex num total de 40 pontos com passo de 2 mm. As setas verticais delimitam a região onde se encontra a delaminação.

5.2.3 - ENSAIOS DE CONTATO COM SAPATA DE PERSPEX NA CONFIGURAÇÃO TRANSMISSÃO-REFLEXÃO

As figuras 5.53 a 5.57 ilustram os A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 nos corpos de prova inspecionados por ensaio de contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. Foram consideradas para análise dos resultados as seguintes legendas:

- S_0T – modo de propagação S_0 transmitido diretamente do transdutor-transmissor para o transdutor-receptor;
- S_0RB - eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova;
- S_0RD - eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 no defeito.

Na figura 5.53 tem-se o A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP3_F. A figura 5.53(a) mostra o sinal capturado em região fora do defeito. Observa-se que S_0T é visualizado no tempo de 20 μs e a sua reflexão de borda, S_0RB , é vista no tempo de 100 μs . A figura 5.53(b) ilustra o A-scan do sinal capturado em frente ao defeito. Neste caso, pode-se observar o eco correspondente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda da fratura de fibras no tempo de 50 μs além de uma queda na amplitude de S_0RB . É possível que o sinal posterior a S_0T , com um tempo \sim de 35 μs seja devido à reverberação do sinal na sapata que chega com atraso em relação a S_0T . Por outro lado, o sinal adiantado no tempo de 10 μs , ao lado, pode ser a onda superficial de Rayleigh.

Para o corpo de prova CP3_D, o A-scan é mostrado pela figura 5.54. A figura 5.54(a) ilustra o A-scan fora da região delaminada. Em \sim 10 μs é visualizado S_0T e a sua reflexão de borda, S_0RB , aparece em 40 μs . Para a região em frente ao defeito, figura 5.54(b), não é visualizado o eco correspondente a reflexão na borda da delaminação, apesar de ser observado uma queda na amplitude da reflexão da borda do corpo de prova.

A figura 5.55 ilustra o A-scan relativo ao corpo de prova CP4_F. A figura 5.55(a) mostra o sinal capturado em região fora do defeito. O sinal do S_0T é visualizado no tempo \sim de 30 μ s e em \sim 125 μ s aparece o eco correspondente a sua reflexão de borda. Na figura 5.55(b), é mostrado o A-scan referente a região a frente do defeito. Pode-se observar que o sinal correspondente ao eco refletido na borda do corpo de prova perde amplitude. Possivelmente, o eco correspondente a reflexão, S_0RD , é visualizado no tempo de 75 μ s.

A fim de verificar a influência do direcionamento das fibras, o corpo de prova CP4_F foi inspecionado de forma que as fibras estivessem paralelas à direção de propagação das ondas de Lamb e o A-scan, nesta configuração é visualizado na figura 5.56. Para o sinal capturado na região fora do defeito, figura 5.56(a), o eco correspondente à reflexão na borda do corpo de prova apresenta amplitude mais elevada do que a do sinal obtido na propagação da onda de Lamb perpendicular as fibras, figura 5.55. Já no sinal capturado em frente ao defeito, figura 5.56(b), o eco correspondente à reflexão na borda do defeito também apresenta amplitude mais elevada.

A figura 5.57 mostra o A-scan para o corpo de prova CP4_D. Como era de se esperar, em função dos resultados obtidos anteriormente pelas outras técnicas para este corpo de prova, os A-scan da região fora do defeito, figura 5.57(a), e em frente ao defeito, figura 5.57(b), foram similares.

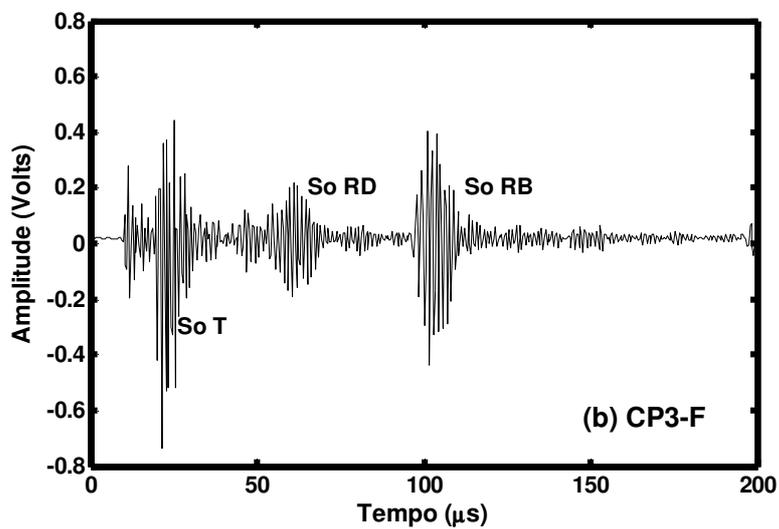
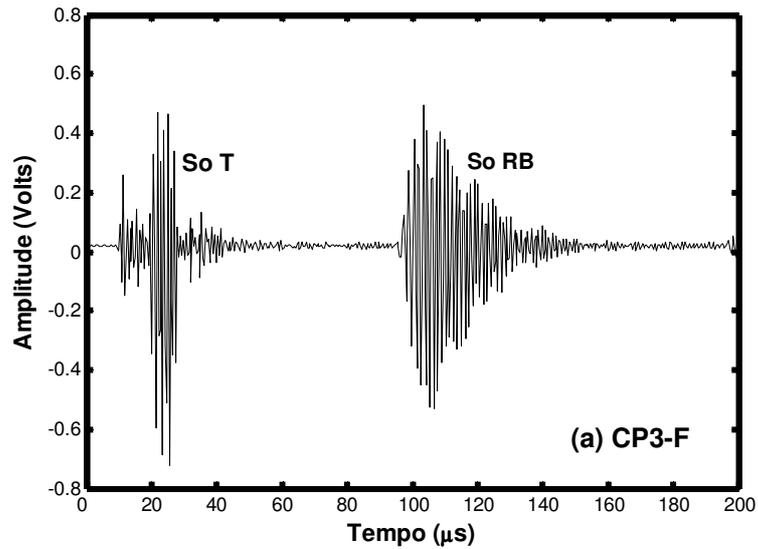


Figura 5.53 – A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP3_F obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova. S_0RD é o eco referente a reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 no defeito.

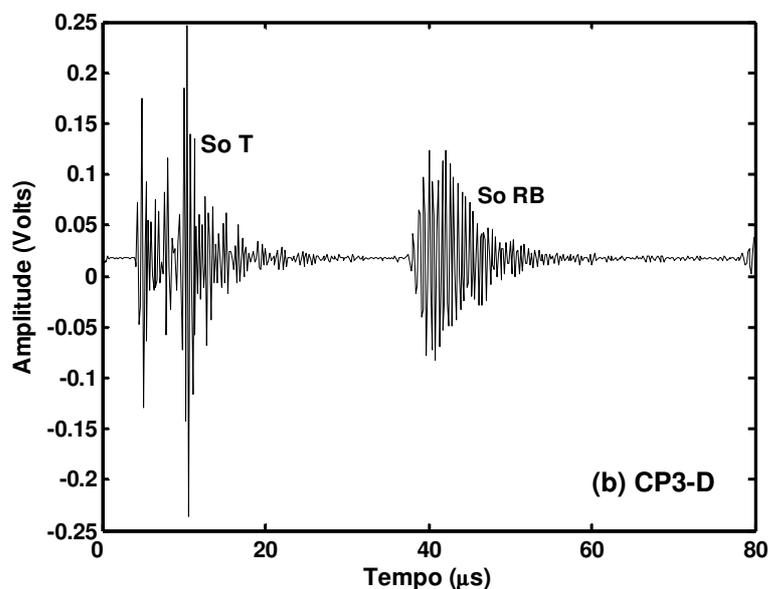
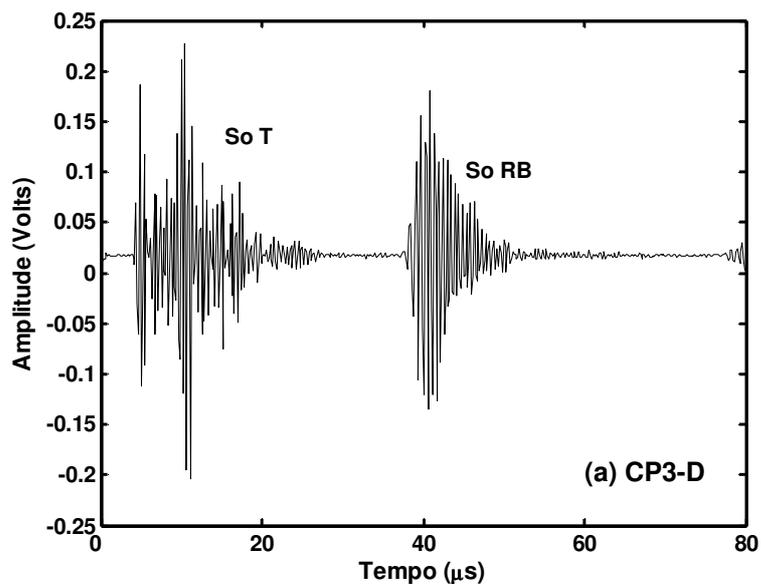


Figura 5.54 – A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP3_D obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. $S_0 T$ é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. $S_0 RB$ é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova

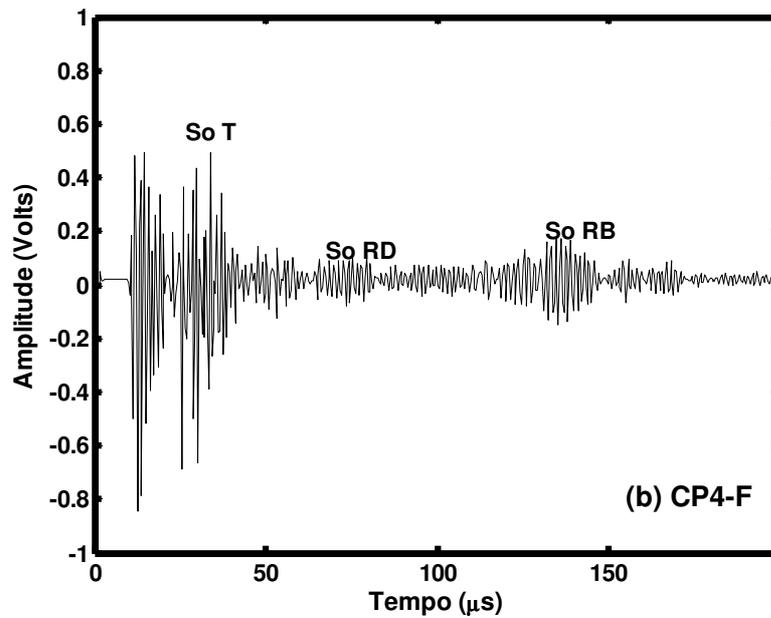
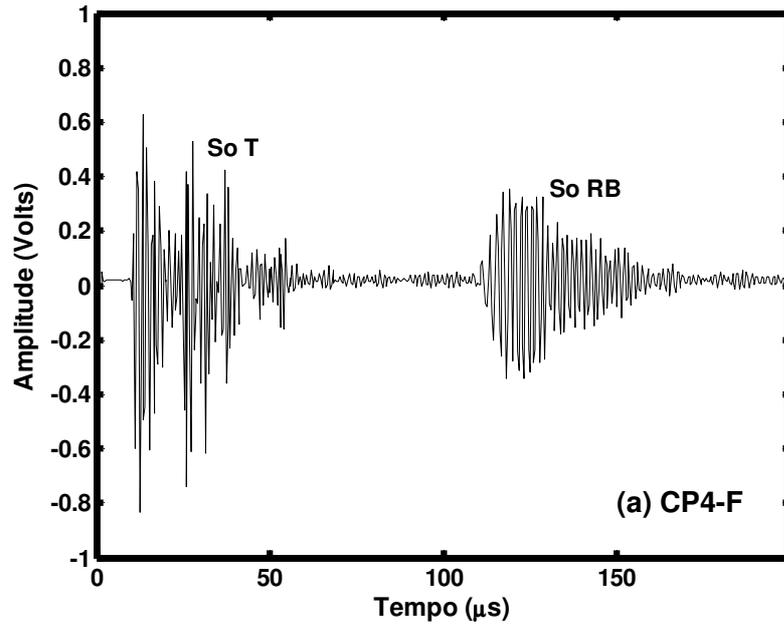


Figura 5.55 – A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP4_F obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova. S_0RD é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 no defeito.

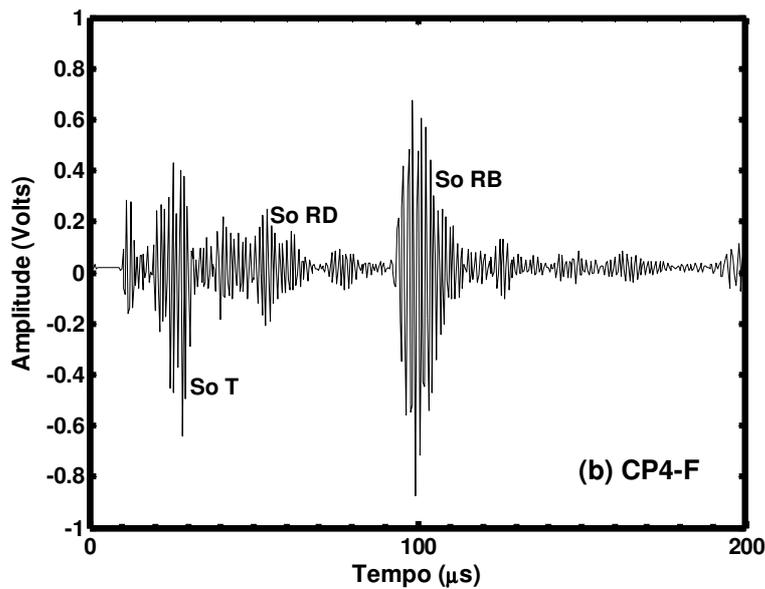
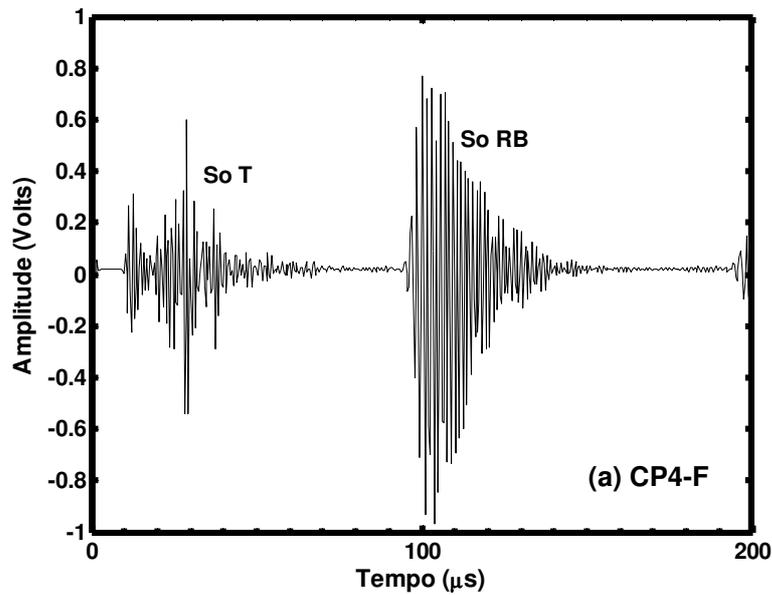


Figura 5.56 – A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 propagando paralelamente a direção das fibras, no corpo de prova CP4_F obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova. S_0RD é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 no defeito.

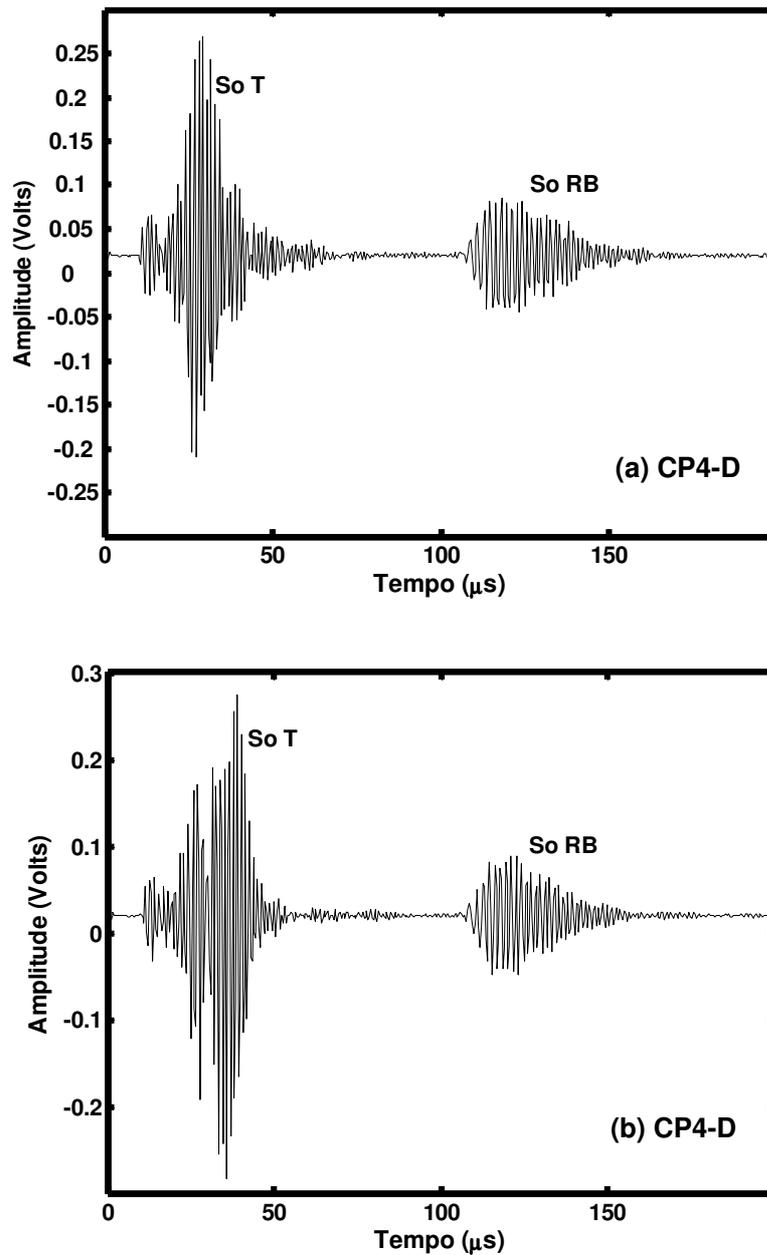


Figura 5.57– A-scan do sinal referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 no corpo de prova CP4_D obtido em ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão. As ilustrações (a) e (b) são os sinais capturados em região fora do defeito e em frente ao defeito, respectivamente. S_0T é o eco referente ao modo de propagação da onda de Lamb S_0 transmitido diretamente pelo transdutor-transmissor ao transdutor-receptor. S_0RB é o eco referente à reflexão do modo de propagação da onda de Lamb S_0 na borda do corpo de prova.

5.3 – CURVAS DE DISPERSÃO EXPERIMENTAIS OBTIDAS UTILIZANDO A TÉCNICA “*PROBE LASER SCANNING LINE*”

Os sinais capturados no tempo e no espaço pelo detector nos corpos de prova CP3 e CP4 são visualizados nas figuras 5.58 e 5.59, respectivamente. Como era esperado, conforme o detector se aproxima da fonte, o tempo de chegada das ondas de Lamb incidentes, localizadas nas regiões superiores (**I**) em cada gráfico, diminui.

Para o caso dos corpos de prova sem defeito, figuras 5.58(a) e 5.59(a), a primeira onda refletida tem origem na borda da placa do corpo de prova. Nos corpos de prova com defeito tipo fraturas de fibras, figuras 5.58(b) e 5.59(b); e delaminação, figuras 5.58(c) e 5.59(c), o detector foi posicionado entre a fonte de laser e o defeito. Por isto, a primeira onda refletida ocorre na borda do defeito e, a região de interferência entre as ondas refletidas (**R**), é visualizada mais cedo do que nos corpos de prova sem defeito.

A onda que propaga no ar próxima a superfície das placas de LFM, foi também detectada mais tardiamente, uma vez que a velocidade do som no ar é menor do que as velocidades dos modos de propagação das ondas de Lamb no material compósito.

Não foram observadas diferenças relevantes entre os B-scan dos corpos de prova CP3 e CP4.

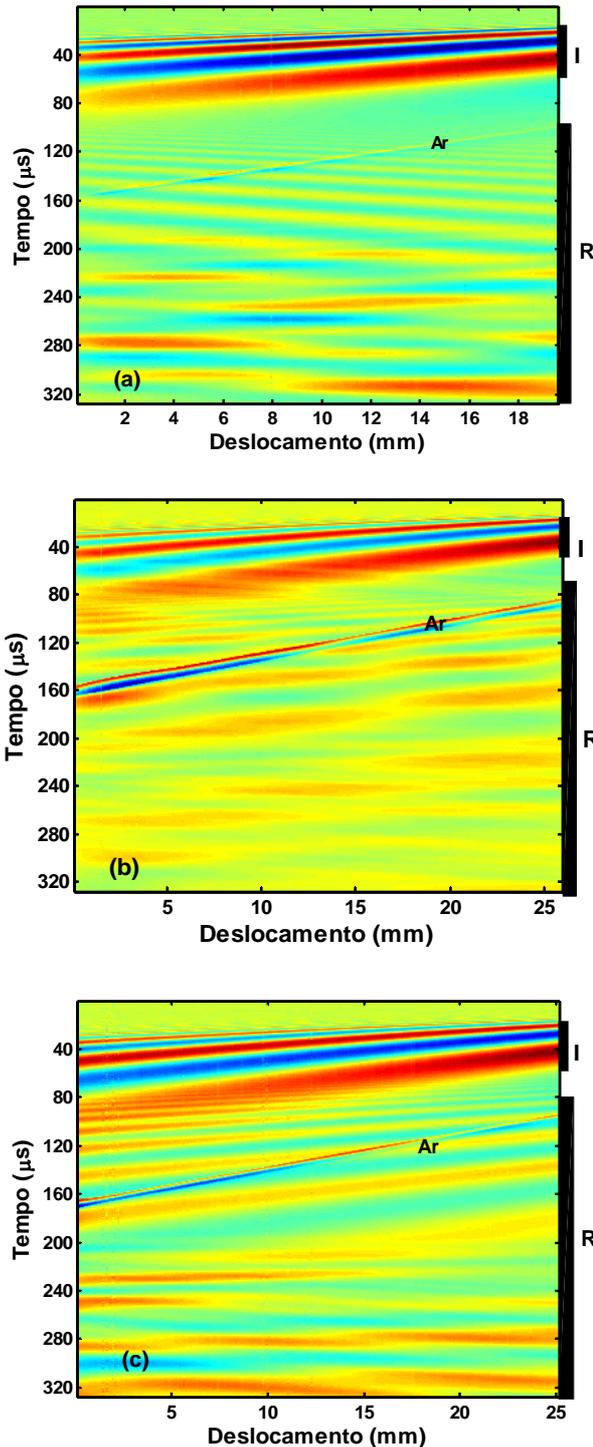


Figura 5.58 – As ilustrações (a), (b) e (c) representam o B-scan dos corpos de prova CP3_SD, CP3_F e CP3_D, respectivamente, obtidos por varredura pelo vibrômetro a laser num passo de 0,1 mm em média de 200 posições em direção a fonte de laser. **I** representa as ondas de Lamb incidentes e **R** a região de interferência entre as ondas refletidas. A onda sônica que propaga no ar próxima a superfície dos corpos de prova também é capturada pelo detector.

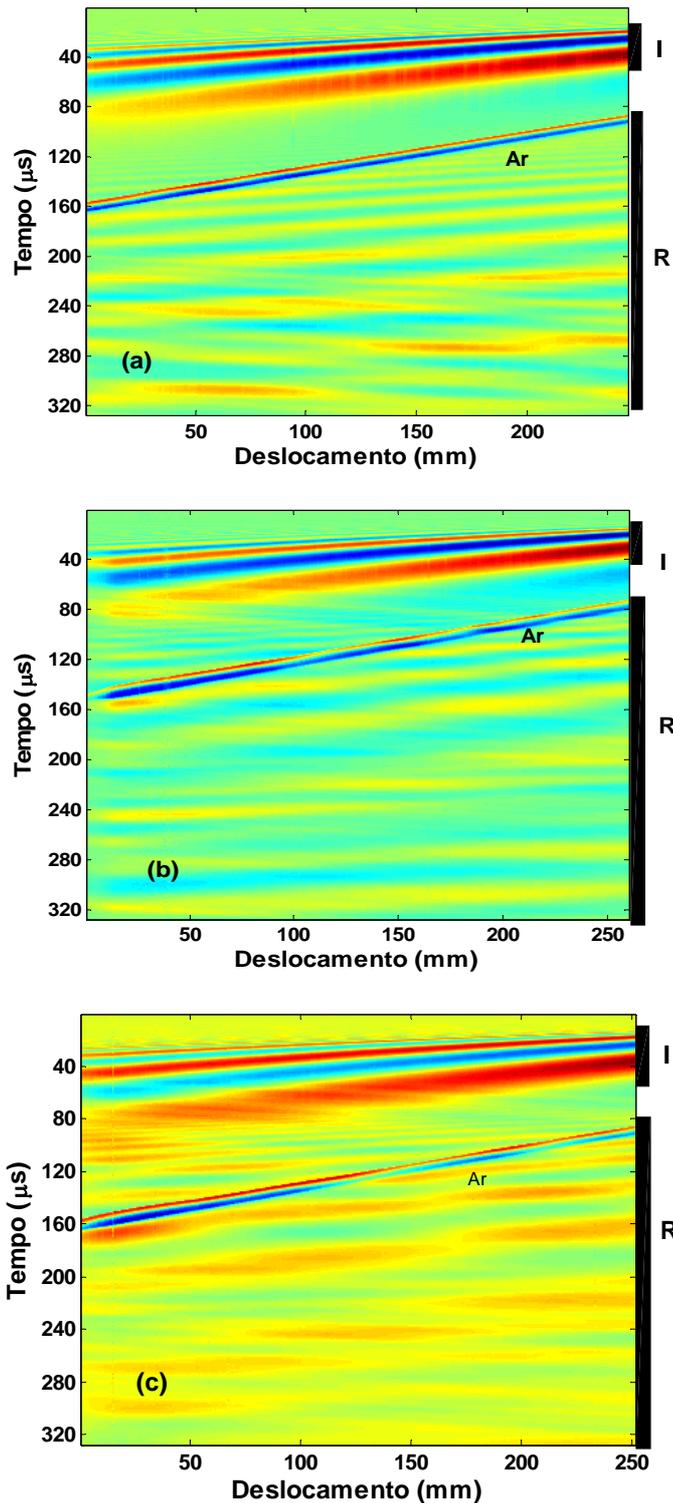


Figura 5.59 – As ilustrações (a), (b) e (c) representam o B-scan dos corpos de prova CP4_SD, CP4_F e CP4_D, respectivamente, obtidos por varredura pelo vibrômetro a laser num passo de 0,1 mm em média de 200 posições em direção a fonte de laser. I representa as ondas de Lamb incidentes e R a região de interferência entre as ondas refletidas. A onda sônica que propaga no ar próxima a superfície dos corpos de prova também é capturada pelo detector.

As figuras 5.60 e 5.61 mostram as curvas de dispersão para os corpos de prova CP3 e CP4, respectivamente, nas dimensões de frequência e número de onda, para os modos de propagação das ondas de Lamb incidentes (gráficos da coluna à esquerda) e refletidas correspondentes (gráficos da coluna à direita) obtidas via Transformada de Fourier bi-dimensional aplicada ao sinal no tempo e espaço, capturados por vibrômetro a laser nos corpos de prova de LFM.

Como a fonte de laser aplicada foi abrasiva, os modos propagados com deslocamentos do campo sônico “fora do plano” (modos de propagação das ondas de Lamb anti-simétricos) são gerados preferencialmente ^[75]. Por isso, o modo de propagação da onda de Lamb que aparece nos gráficos experimentais com maior amplitude é o modo de propagação da onda de Lamb A_0 . Comparando as curvas de dispersão obtidas por simulação e experimentalmente, são identificados os modos de propagação S_0 e H_1 .

Em função do posicionamento do detector e da fonte de laser, já era esperado que os gráficos correspondentes às ondas incidentes fossem semelhantes para os corpos de prova com e sem defeito.

Para o caso dos corpos de prova com defeito, nos gráficos das ondas refletidas, os modos de propagação A_0 referentes tanto à reflexão que ocorre na borda da placa quanto a que ocorre na borda do defeito, aparecem sobrepostos. Isto é devido ao processamento por transformada de Fourier bi-dimensional ter sido realizado no sinal em todo o domínio do tempo.

As figuras 5.62 e 5.63 mostram, respectivamente, as curvas de dispersão obtidas por simulação e experimentalmente para os corpos de prova CP3 e CP4. Pode-se observar que a forma da curva obtida experimentalmente é similar à simulada para todos os modos propagados, sendo as diferenças observadas entre os valores experimentais e os simulados tendendo a ser constante, no geral, para todos os modos propagados.

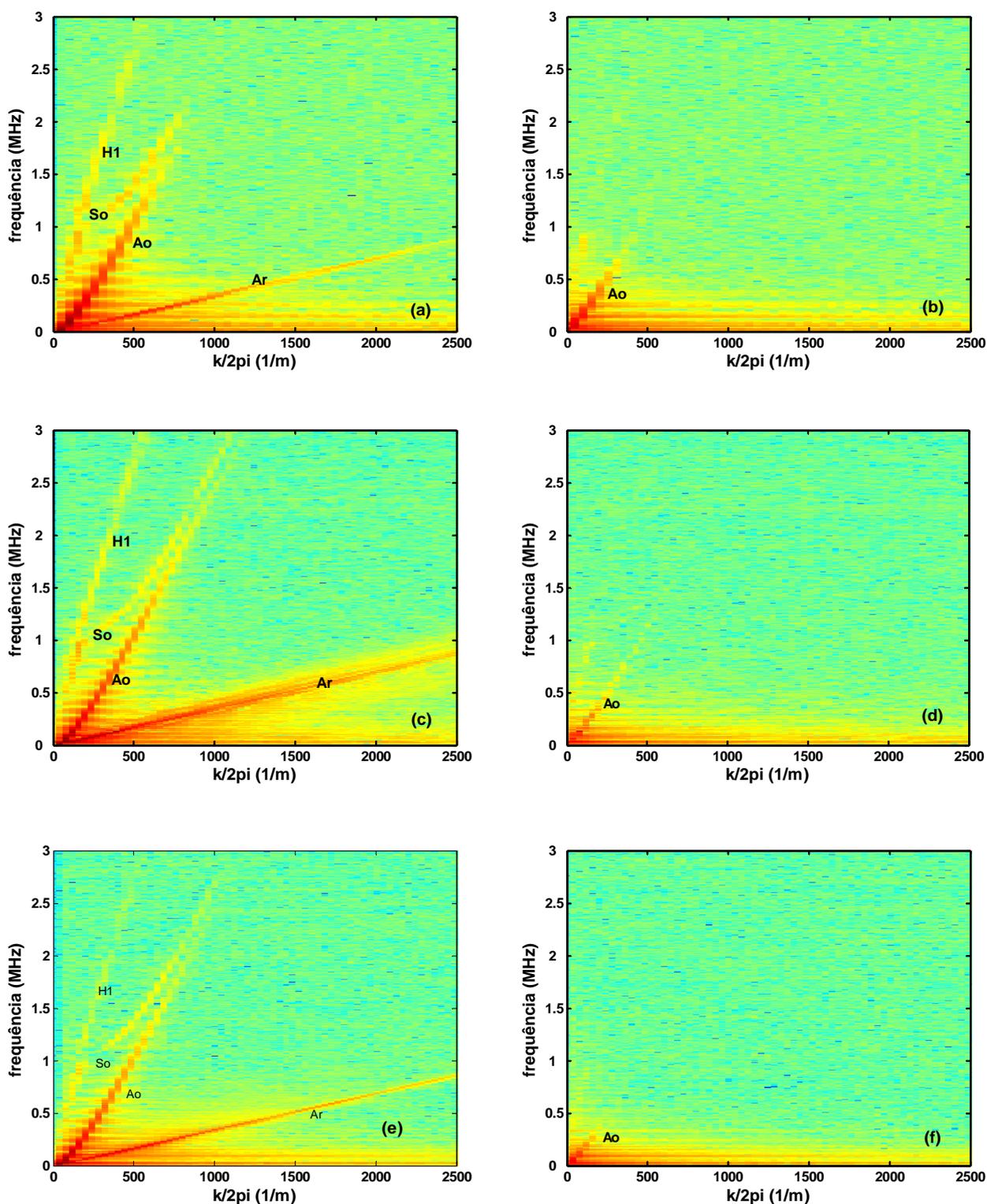


Figura 5.60 – Modos de propagação de Lamb obtidos via FFT-2D dos sinais no domínio do tempo e espaço. As ilustrações à esquerda representam as ondas incidentes e as da direita representam as ondas refletidas correspondentes: (a) e (b)CP3_SD; (c) e (d) CP3_F; (e) e (f) CP3_D.

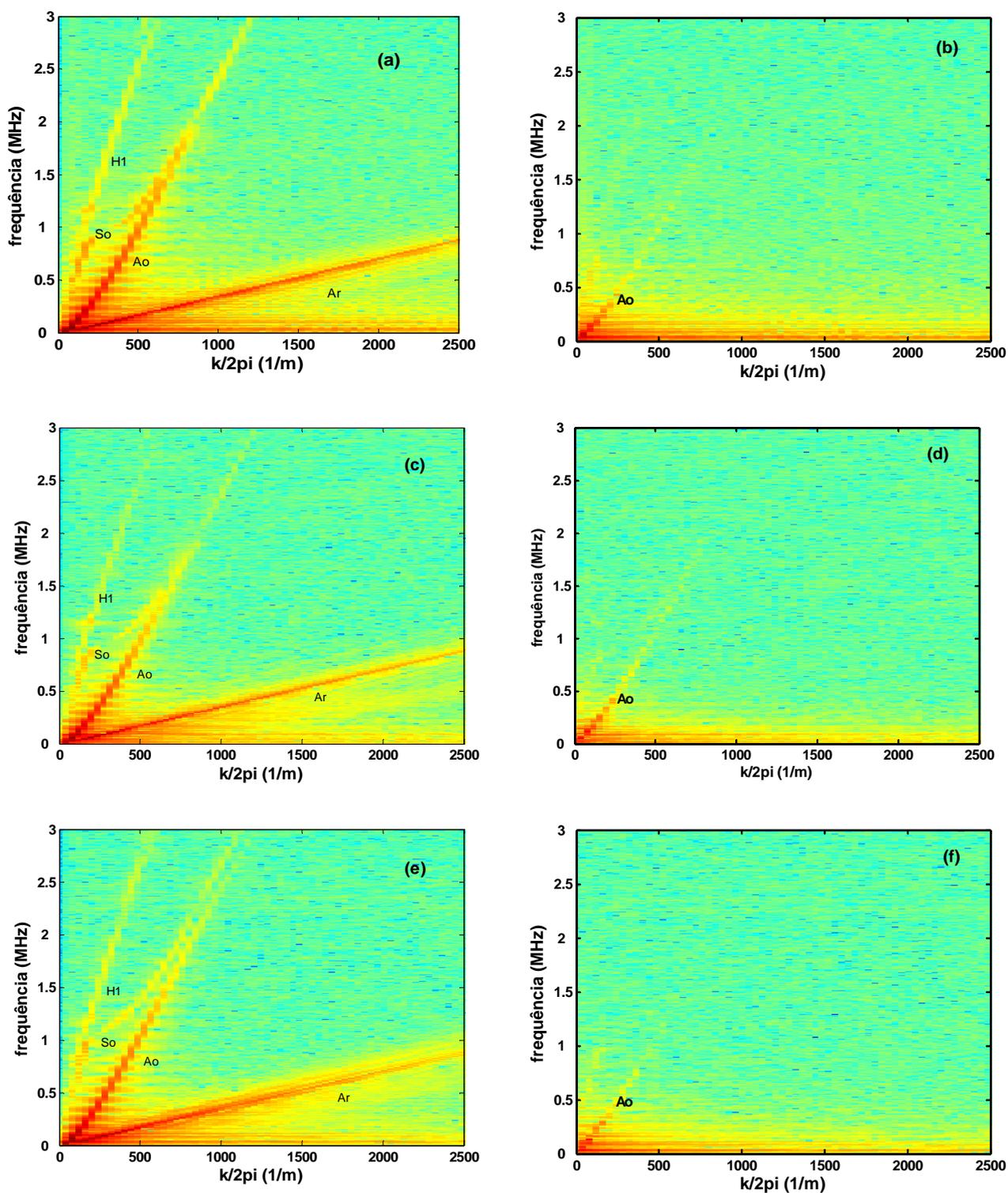


Figura 5.61 – Modos de propagação de Lamb obtidos via FFT-2D dos sinais no domínio do tempo e espaço. As ilustrações à esquerda representam as ondas incidentes e as da direita representam as ondas refletidas correspondentes: (a) e (b)CP4_SD; (c) e (d) CP4_F; (e) e (f) CP4_D.

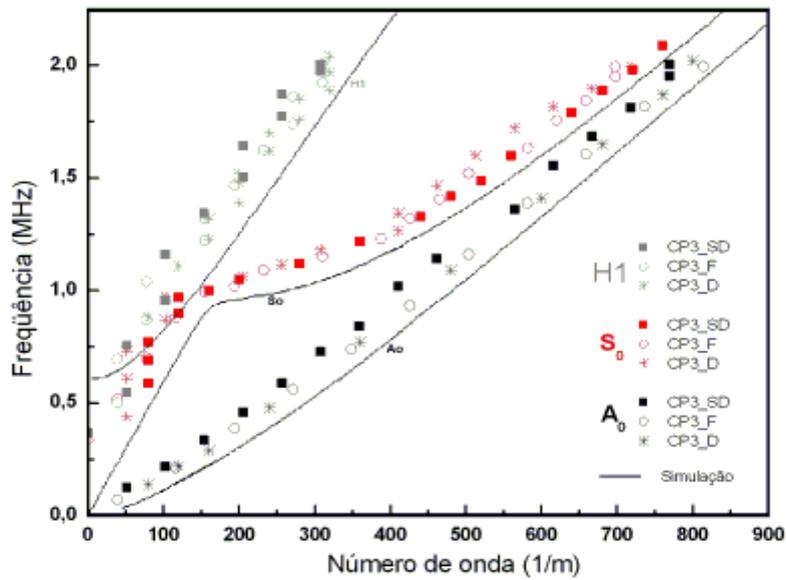


Figura 5.62 – Curvas de dispersão experimental e simulada em termos de frequência e número de onda dos modos de propagação das ondas de Lamb incidentes para os Corpos de Prova CP3. São visualizados os modos de propagação A_0 , S_0 e H_1

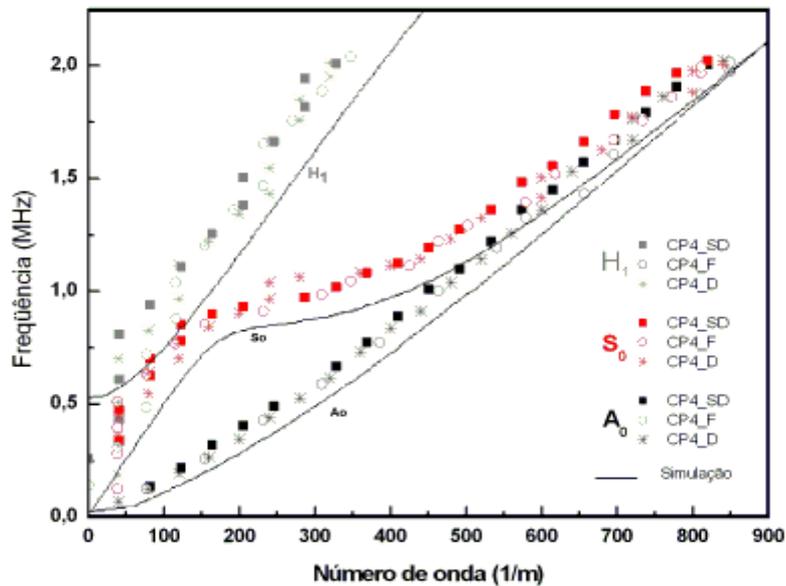


Figura 5.63 – Curvas de dispersão experimental e simulada em termos de frequência e número de onda dos modos de propagação das ondas de Lamb incidentes para os Corpos de Prova CP4. São visualizados os modos de propagação A_0 , S_0 e H_1 .

Tabela 5.5 – Valores simulados e experimentais do número de onda em função da frequência para o corpo de prova CP3.

Frequência (MHz)	Numero de onda (1/m)					
	A ₀		A ₁		S ₀	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
1,0	484	462	138	102,6	263	205,0
1,2	553	513	183	153,8	413	359,0
1,4	627	615	227	205,1	515	461,5
1,6	696	667	274	256,4	597	564,0
1,8	791	769	329	307,2	706	615,4

Tabela 5.6 – Valores simulados e experimentais do número de onda em função da frequência para o corpo de prova CP4.

Frequência (MHz)	Numero de onda (1/m)					
	A ₀		A ₁		S ₀	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
1,0	492	450	150	123	205	368
1,2	573	574	198	204	253	491
1,4	641	614	246	245	307	614
1,6	709	737	287	286	376	655
1,8	778	778	327	327	477	737

As tabelas 5.5 e 5.6 mostram os valores experimentais e simulados aproximados do número de onda em função da frequência, obtidos para os modos de propagação A₀, H₁ e S₀, nos corpos de prova CP3 e CP4, respectivamente.

Nas figuras 5.64 e 5.65 são mostrados os valores para as velocidades de fase obtidas experimentalmente em função da frequência a partir do valor do número de onda K . Seria esperado que para um mesmo valor de frequência, as velocidades de fase do modo de propagação A₀ incidente e refletido fossem os mesmos. Os erros estão relacionados à forma de obtenção dos valores de K e f nas a partir das figuras 5.60 e 5.61. Para a coleta desses valores a fim de obter a velocidade de fase, foi utilizada a função *ginput* que permite a obtenção dos pontos clicando na figura. Cada ponto no gráfico da velocidade de fase das figuras 5.64 e 5.65 corresponde a um *click* sobre a curva do modo de propagação A₀ nas figuras 5.60 e 5.61. Nas figuras onde são visualizadas as ondas refletidas, a baixa amplitude não permite a

escolha de muitos pontos e aqueles próximos a origem induzem a erros provavelmente devido a baixa resolução da imagem. Ocorreu também uma tendência de superestimar a velocidade da onda refletida em relação a incidente para todo o espectro de frequência, revelando um erro sistemático.

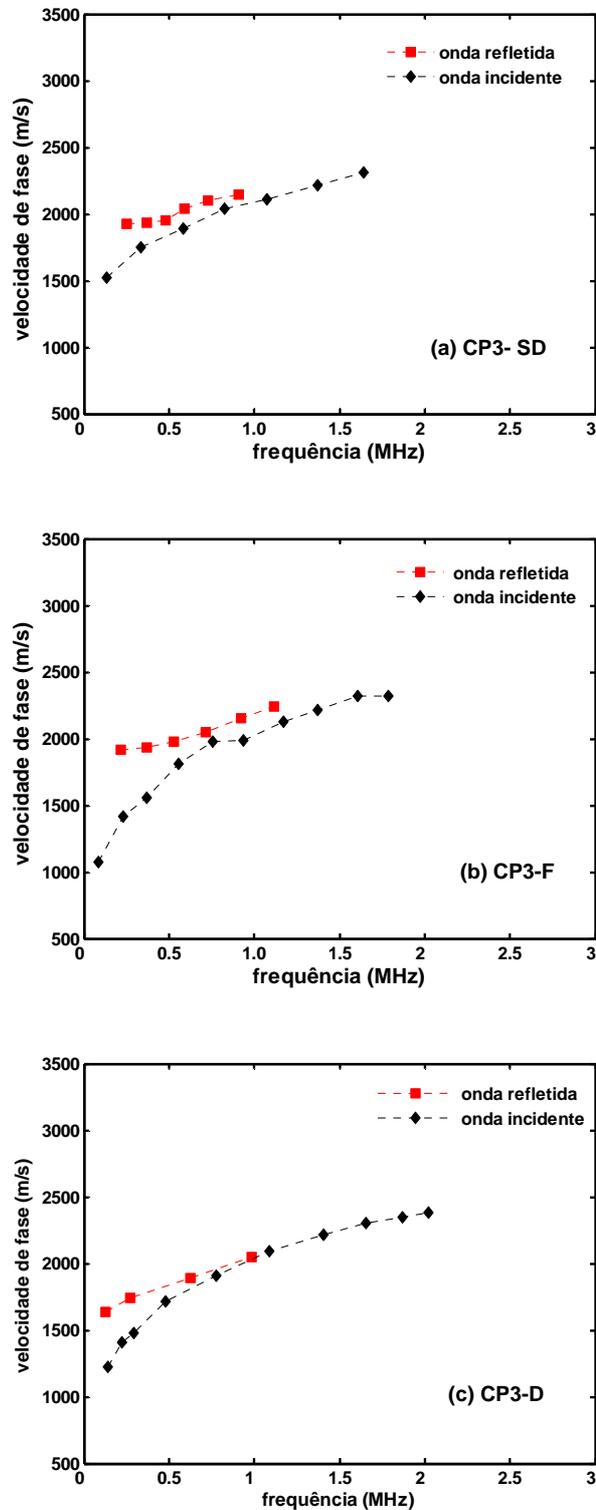


Figura 5.64– As ilustrações mostram as velocidades de fase em função da frequência para as ondas incidentes e refletidas para os corpos de prova: (a) CP3_SD; (b) CP3_F; (c) CP3_D.

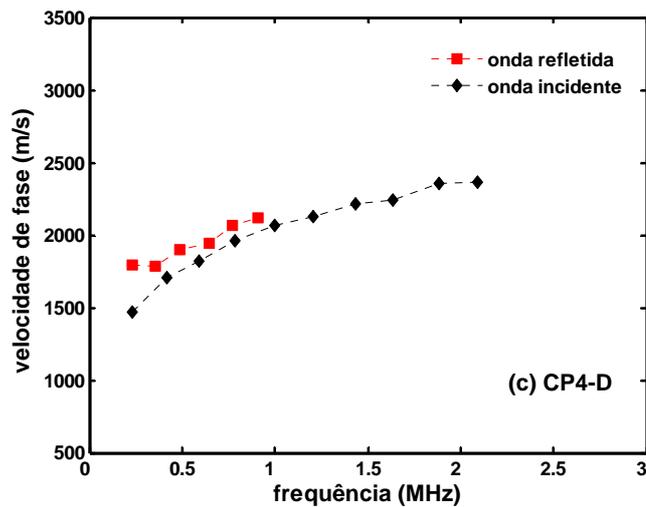
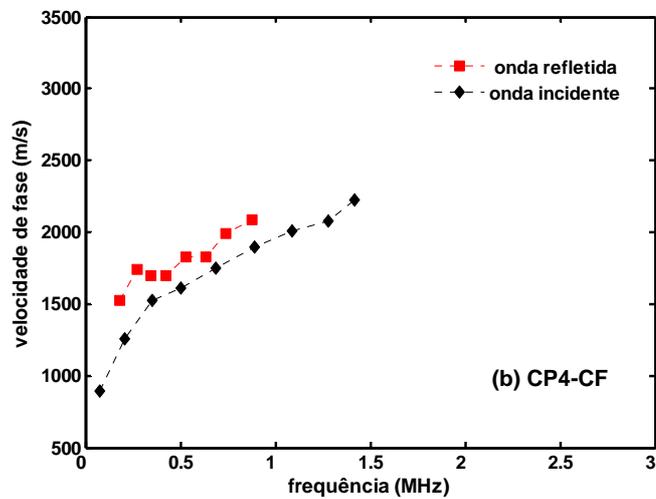
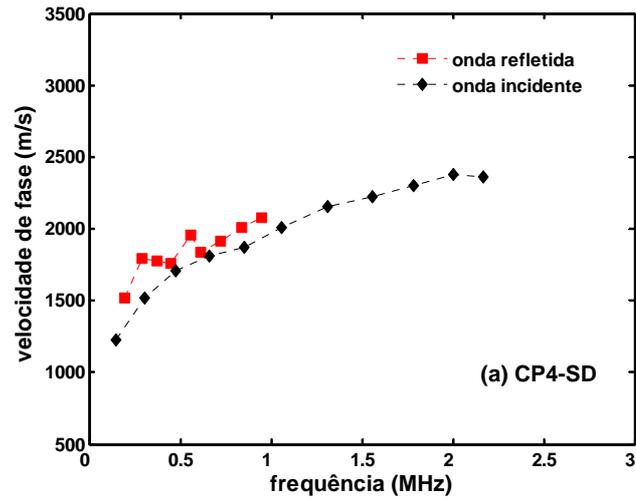
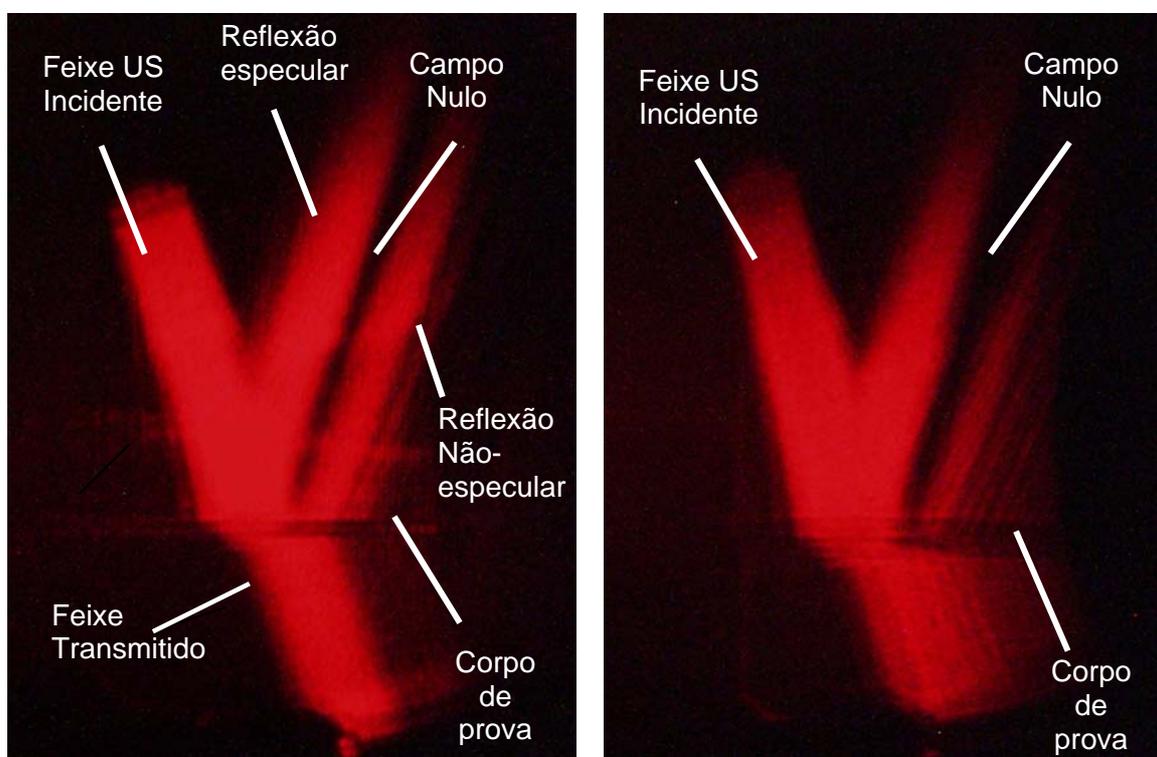


Figura 5.65 - As ilustrações mostram as velocidades de fase em função da frequência para as ondas incidentes e refletidas para os corpos de prova: (a) CP4_SD; (b) CP4_F; (c) CP4_D.

5.4 – FEIXE ULTRA-SÔNICO VISUALIZADO POR FOTOGRAFIAS SCHLIEREN

Nesta seção é apresentada a detecção de danos usando as imagens fotográficas resultantes da interação do ultra-som com a luz monocromática de laser, quando o feixe sônico incide em regiões com e sem defeito dos corpos de prova.

Como a frequência do transdutor para geração do feixe incidente foi de 3 MHz, a técnica não teve como objetivo indicar o direcionamento das fibras dos LFMs, como no caso do trabalho apresentado por DECLERCQ *et al.* [50] onde os pesquisadores usaram frequência elevada de 10 MHz.



(a)

(b)

Figura 5.66 – Fotografias Schlieren dos corpos de prova: (a) CP1_SD com feixe ultra-sônico incidente paralelo as fibras; (b) CP21_SD com feixe ultra-sônico incidente perpendicular as fibras. Nas imagens, é visualizado o feixe ultra-sônico que incide sobre a superfície do corpo de prova, o feixe transmitido e a região de interferência (campo nulo) entre as reflexões geométrica e não-especular (efeito Schoch).

Na figura 5.66, pode-se observar que nas fotografias Schlieren de ambos os corpos de prova sem defeito aparece uma interferência destrutiva, campo nulo, resultante das reflexões geométrica e não-especular (efeito Schoch). Para o corpo de prova CP1_SD da figura 5.66(b), a imagem foi capturada quando o feixe incidente se aproximava da

borda do LFM. Com isso, um padrão de raias paralelas é visualizado como decorrente da interferência entre campos “leakage” dos diferentes tipos de conversão de modo das ondas de Lamb que ocorrem na borda do corpo de prova do LFM, como visto por DECLERQ *et al.* [53].

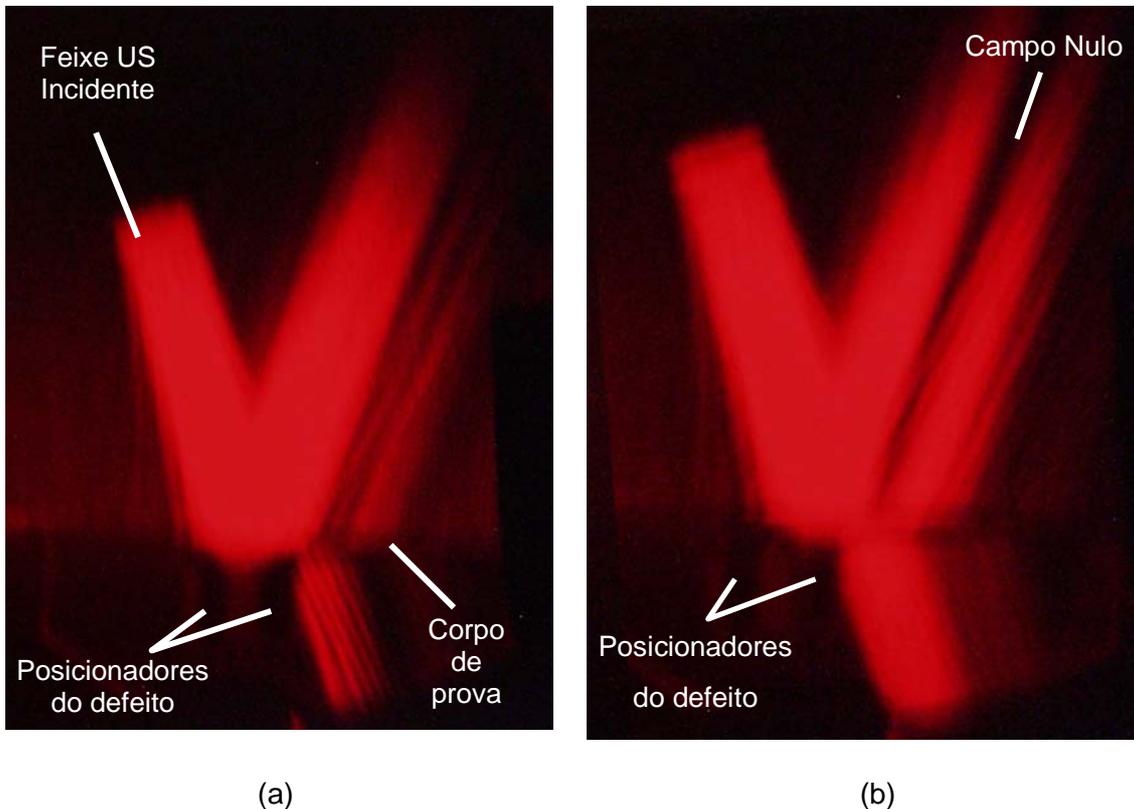


Figura 5.67 – Fotografias Schlieren do corpo de prova CP1_F com o feixe ultra-sônico incidente paralelo à direção das fibras: (a) sobre a região com fratura de fibras; (b) em região sem defeito. Os posicionadores delimitam a região do defeito.

A figura 5.67 mostra as fotografias Schlieren do corpo de prova com defeito tipo fratura de fibras, e o feixe ultra-sônico incidente paralelo à direção das fibras. Na figura 5.67(a), o feixe ultra-sônico incide sobre a região do defeito. Observa-se a ausência do feixe transmitido através do LFM. O feixe refletido não-especular e um perfeito campo nulo também não são observados. A presença de raias deve-se a conversão de modo das ondas de Lamb que ocorrem na borda do defeito. Este mesmo efeito foi verificado por DECLERQ *et al.* [53]. Através da figura 5.67(b) percebe-se que conforme o feixe sônico desloca-se em direção à região sem defeito, o efeito Schoch e o feixe transmitido são visualizados perfeitamente.

No corpo de prova CP1_F com o feixe ultra-sônico perpendicular à direção das fibras, figura 5.68, a distância entre os posicionadores do defeito é o dobro daquela usada para o corpo de prova CP1_F, uma vez que o lado maior do defeito coincide com a direção de laminação das chapas de alumínio. O efeito Schoch é visualizado somente quando o feixe sônico incide na região fora do defeito.

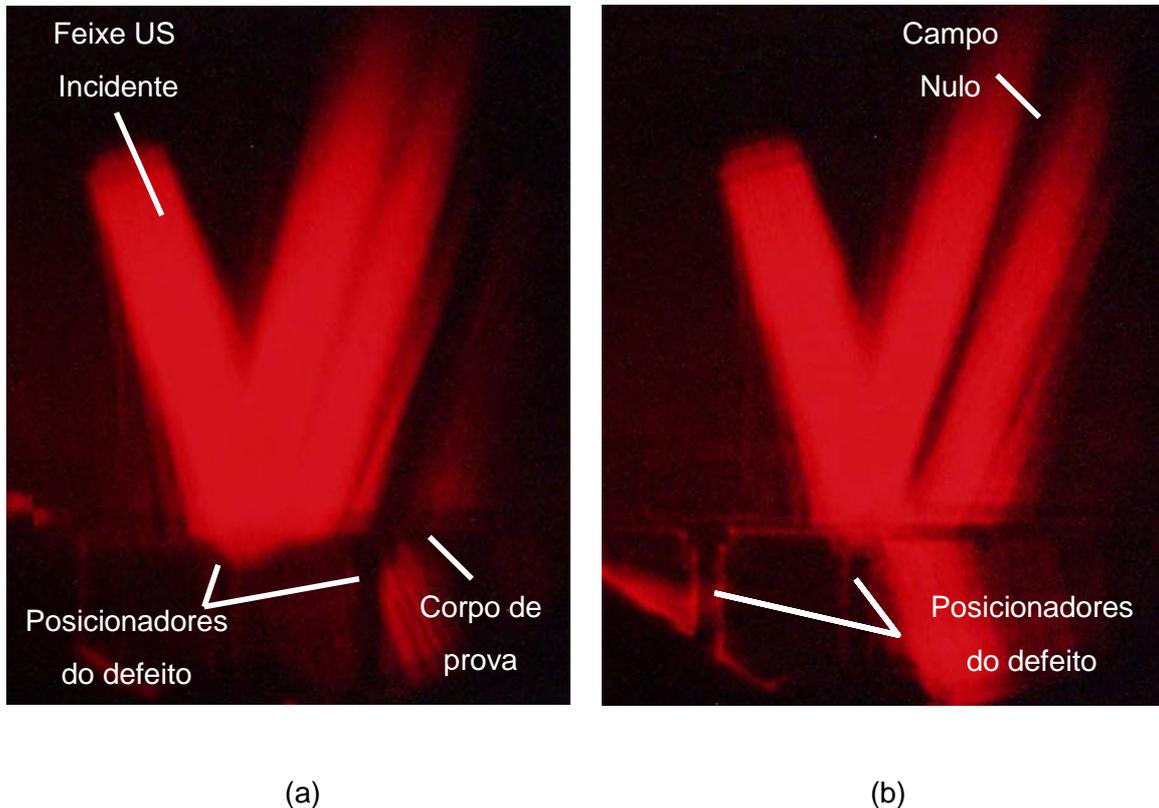
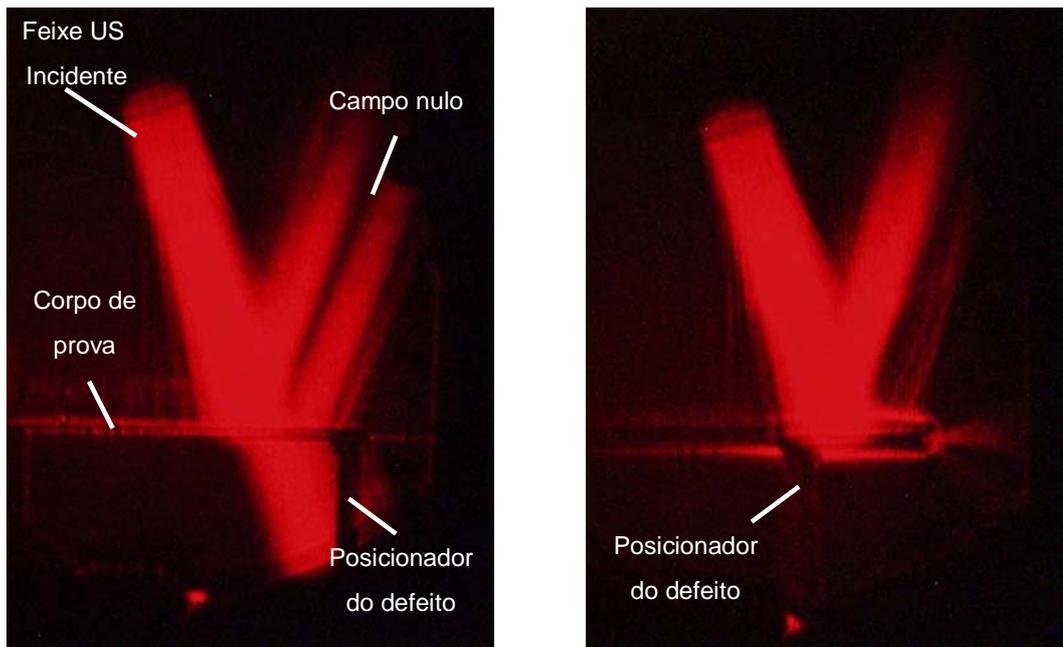


Figura 5.68 – Fotografias Schlieren do corpo de prova CP1_F com o feixe ultra-sônico incidente perpendicular a direção das fibras: (a) sobre a região com fratura de fibras; (b) em região sem defeito. Os posicionadores delimitam a região do defeito.

Na figura 5.68(a), pode-se observar a ausência do feixe transmitido entre os dois posicionadores do defeito, assim como, não se visualiza o efeito Schoch. Enquanto que, fora da região sem defeito o efeito Schoch e o feixe transmitido são visíveis, figura 5.68(b). É observado também a presença de raios devido à conversão de modo na borda do defeito como mostrado por DECLERQ *et al.* ^[53].



(a)

(b)

Figura 5.69 – Fotografias Schlieren do corpo de prova CP1_D com o feixe ultra-sônico incidente paralelo à direção das fibras: (a) saindo da região sem defeito; (b) totalmente sobre a área delaminada.

Nas figuras 5.69(a) e (b) são ilustradas as fotografias Schlieren dos corpos de prova CP1_D com o feixe ultra-sônico incidente paralelo à direção das fibras e incidindo numa região anterior a delaminação e sob a região delaminada, respectivamente.

Na figura 5.69(a), o feixe transmitido e o efeito Shoch são bem visualizados. Quando o feixe incidente se encontra sob a delaminação, figura 5.69(b), nota-se a ausência do feixe transmitido e do efeito Shoch. As raias observadas são devidas à interferência entre campos *leakage* dos diferentes tipos de conversão de modo das ondas de Lamb na borda da placa de LFM. Nota-se que as ondas de Lamb radiam também, ao chegar à extremidade, na direção à frente da chapa, segundo DECLERQ *et al.* ^[53]. Isto é devido à formação de múltiplos pólos acústicos na extremidade da placa.

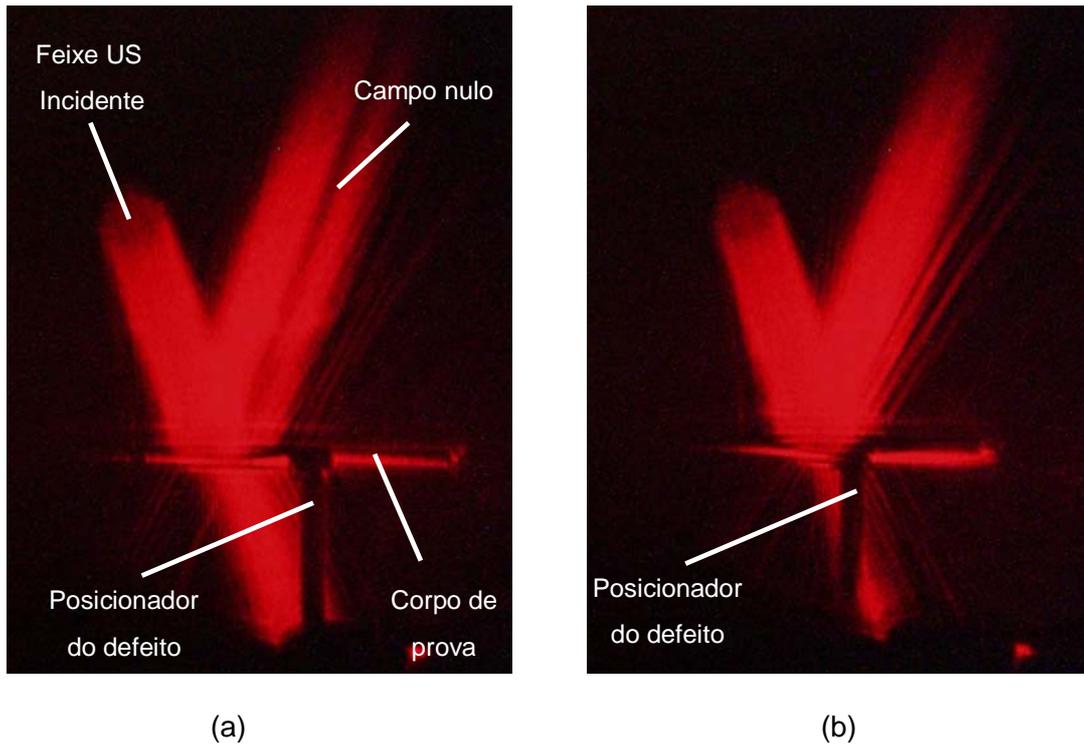


Figura 5.70 – Fotografias Schlieren do corpo de prova CP1_D com o feixe ultra-sônico incidente perpendicular à direção das fibras: (a) saindo da região sem defeito; (b) na borda da delaminação

Nas figuras 5.70(a) e (b) são mostradas as fotografias Schlieren dos corpos de prova CP1_D com o feixe ultra-sônico incidente perpendicular à direção das fibras incidindo numa região anterior a delaminação e na borda do defeito, respectivamente. Na figura 5.69(a), o feixe transmitido e o efeito Shoch são visualizados. Quando o feixe incidente se encontra na borda da delaminação, figura 5.69(b), nota-se a presença de raias devido, provavelmente, à interferência entre campos “leakage” dos diferentes tipos de conversão de modo das ondas de Lamb na borda do defeito.

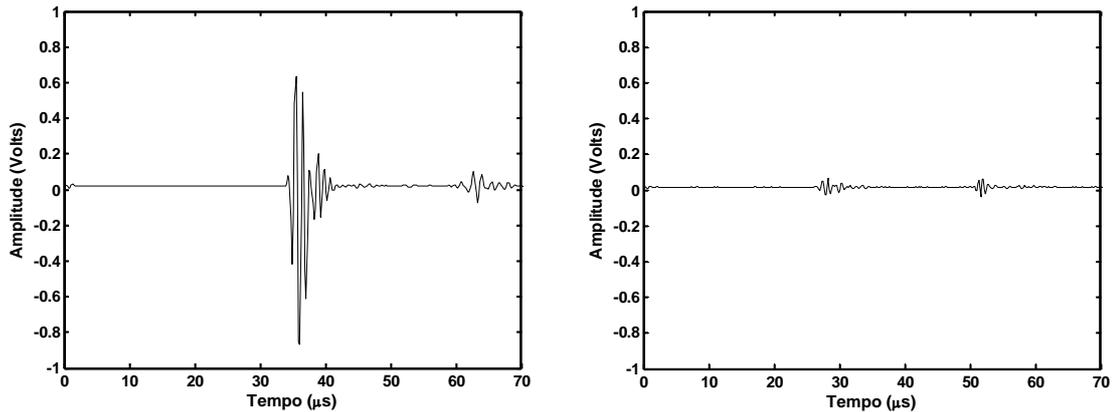


Figura 5.71 – Ensaio de incidência normal por imersão no corpo de prova CP1_D em configuração transmissão-recepção: (a) A-scan sobre região sem defeito; (b) A-scan sobre a região delaminada.

As figuras 5.71(a) e (b) ilustram os A-scan dos corpos de prova em região fora da delaminação e sobre a delaminação, respectivamente.

Para justificar a ausência do feixe transmitido na região delaminada uma vez que a técnica foi realizada com os corpos de prova imersos em água e a delaminação nos casos dos corpos de prova CP1 encontra-se na borda, foi feita inspeção ultra-sônica por incidência normal utilizando transdutores de 1 MHz na configuração transmissão-recepção a fim de caracterizar a presença de ar “aprisionado” no interior do defeito.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Em relação aos ensaios ultra-sônicos por imersão e por contato com sapata de perspex, pode-se concluir que:

- Os valores experimentais das velocidades de fase e de grupo para o modo de propagação S_0 são compatíveis com os resultados teóricos simulados, à exceção dos obtidos para os corpos de prova em imersão e com a propagação das ondas de Lamb ocorrendo paralela às fibras, (CP3);
- Houve reprodutibilidade dos valores medidos das velocidades de fase e de grupo entre os corpos de prova de mesma configuração, à exceção dos valores para a velocidade de grupo dos corpos de prova em contato por sapata de perspex e com a propagação das ondas de Lamb ocorrendo paralela às fibras, (CP3);
- A frequência experimental medida não correspondeu, no geral com a frequência teórica considerada por simulação. Usando valores da frequência medida, nas simulações, os valores teóricos das velocidades de fase e de grupo se aproximaram dos valores experimentais;
- O atraso medido para o modo de propagação S_0 nos ensaios de transmissão pelos LFM, detectou a presença da fratura de fibras. Para os corpos de prova com delaminação, o atraso medido para o modo de propagação S_0 não detectou o defeito, provavelmente devido ao processo utilizado para a inserção deste tipo de defeito.
- Por variação da amplitude do sinal do modo de propagação S_0 . Foi possível detectar a presença dos defeitos através da análise da amplitude da onda transmitida através do LFM, à exceção do corpo de prova com fibras perpendiculares a propagação da onda, com delaminação, (CP4) ;

- Pela técnica de ensaio por contato com sapata de perspex na configuração transmissão-reflexão, a fratura de fibras é detectada em todos os corpos de prova, sendo que a amplitude do sinal refletido é maior quando a onda de Lamb propaga paralelamente na direção das fibras.

Na técnica de ensaio de geração das ondas de Lamb a partir do laser, o modo de propagação A_0 pode ser gerado. As curvas de dispersão obtidas experimentalmente em nas dimensões do número de onda e frequência são semelhantes as obtidas por simulação.

A técnica de fotografia Schlieren detectou o defeito em todos os corpos de prova de LFM inspecionados.

As heterogeneidades verificadas nas imagens C-scan presentes no apêndice A, provavelmente devido ao processo de fabricação das placas de LFM, podem ter influenciado nos resultados experimentais obtidos.

Através dos resultados obtidos, conclui-se que as ondas ultra-sônicas de Lamb podem ser utilizadas nas inspeções de compósitos laminados fibra-metal.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões, são listados abaixo os seguintes trabalhos a serem desenvolvidos em continuação à presente pesquisa:

- Definição de metodologia de inspeção específica para uma determinada configuração de LFM;
- Confeção de corpos de prova de LFM com dimensões maiores do que os utilizados com fibra de carbono na presente pesquisa;
- Produção de defeitos por impacto de forma a obter resultados mais próximos de uma condição real;
- Simular os corpos de prova por modelagem via elementos finitos o técnica do problema inverso na determinação da velocidade dos modos de propagação das ondas de Lamb.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HULL, D.; *An Introduction to Composite Material*. Great Britain, Cambridge University Press, 1981.
- [2] CANTWELL, W. J., MORTON, J.; *The Impact Resistance of Composite Materials - A Review*. Composites, v.22, n.5, p. 347-362, 1991.
- [3] DE VRIES, T. J.; *Blunt and Sharp Notch Behaviour of Glare Laminates*, PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2001.
- [4] TAN, K. S., GUO, N., WONG, B. S., TUI, C. G.; *Comparison of Lamb Waves and Pulse Echo in Detection of Near-surface Defects in Laminate Plates*. NDT&E International v. 28, n. 4, pp. 215-223, Aug. 1995.
- [5] GROS, X. E., LOWDEN, D. W.; *Electromagnetic Testing Methodologies of Composite Materials*. Insight 37 4, pp 290-293, 1995.
- [6] ZHONGQING Su, LIN Ye, YE Lu; *Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review*. Journal of Sound and Vibration, (Article in Press - accepted 24 January 2006).
- [7] ROSALIE, S. C.; VAUGHAN, M.; BREMNER, A; CHIU, W. K.; *Variation in the group velocity of Lamb waves as a tool for the detection of delamination in GLARE aluminium plate-like structures*. Composite Structures, Volume 66, Issues 1-4, Pages 77-86, 2004.
- [8] DEMČENKO, A., ŽUKAUSKAS, MAŽEIKA, E., L., KAŽYS, R.; *Measurement of the A_0 mode phase velocity in GLARE3-3/2 composite with air-coupled ultrasonic techniques*. Insight, Vol.47, No.3, March-2005.

- [9] CASTRODEZA, E. M., BASTIAN, F. L.; *Tenacidade à Fratura de Compósitos Laminados Metálicos de Ligas de Alumínio com Epóxi Reforçado por Fibras de Vidro*. Anais do 53^o Congresso Anual da ABM, p.1288-1298. Belo Horizonte, 1998.
- [10] BASTIAN, F. L.; *Compósitos Laminados Fibra-Metal: Características e Tenacidade à Fratura*. 58^o Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro, julho, 2003.
- [11] CASTRODEZA, E. M.; BASTIAN, F. L.; PEREZ IPIÑA, J. E.; *Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Metal Laminates: Crack Orientation Effect*. Engineering Fracture Mechanics, v. 72, n. 14, p. 2268-2279, 2005.
- [12] CASTRODEZA, E. M.; PEREZ IPIÑA, J. E.; BASTIAN, F. L.; *Fracture Toughness Evaluation of Unidirectional Fibre Metal Laminates Using Traditional CTOD and Schwalbe (Delta5) Methodologies*. Engineering Fracture Mechanics, Inglaterra, v. 71, p. 1107-1118, 2004.
- [13] CASTRODEZA, E. M.; BASTIAN, F. L.; PEREZ IPIÑA, J. E.; *Residual Strength of Unidirectional Fibre Metal Laminates Based on Jc Toughness Values of C(T) and SE(B) Specimens. Comparison with M(T) Test Results*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, Grã-Bretanha, v. 27, p. 923-929, 2004.
- [14] CASTRODEZA, E. M.; BASTIAN, F. L.; PEREZ IPIÑA, J. E.; *Critical Fracture Toughness, Jc and d5c, of Unidirectional Fibre-Metal Laminates*. Thin-Walled Structures, Grã-Bretanha, v. 41, p. 1089-1101, 2003.
- [15] CASTRODEZA, E. M.; BASTIAN, F. L.; PEREZ IPIÑA, J. E.; *Tenacidade à Fratura de Laminados fibra-metal*. Metalurgia e Materiais, São Paulo- Brasil, v. 59, n. 538, p. 634-635, 2003.
- [16] CASTRODEZA, E. M.; BASTIAN, F. L.; YAWNY, A.; PEREZ IPIÑA, J. E.; *Fracture Micromechanisms of Fibre-Metal Laminates: In-Situ SEM Observations*. Journal of Composite Materials, Inglaterra, v. 36, n. 04, p. 387-400, 2002.

[17] VLOT, A., GUNNINK, J. W.; *Fibre Metal Laminates: an introduction*. 1 ed. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001.

[18] VERMEEREN, C. A. J. R.; *An Historic Overview of the Development of Fibre Metal Laminates*. Applied Composite Materials, Volume 10, Issue 4 - 5, Pages 189 - 205 ,Jul 2003.

[19] FREISCHMIDT, G.; COUTTS, R. S. P.; JANARDHANA, M. N.; *Aluminium/lithium alloy-carbon fibre/epoxy laminated hybrid composite material Part I Preliminary results*. Journal of Materials Science Letters, Volume 13, Issue 14, Pages 1027 - 1031 , 1994.

[20] LALIBERTE, J. F.; POON, C.; STRAZNICKY, P. V.; FAHR, A ; *Applications of fiber-metal laminates*. Polymer Composites (USA), Vol. 21, no. 4, pp. 558-567, 2000.

[21] CHAWLA, K. K.; *Composite Materials Science and Engineering*. New York, ,Springer-Verlag, 1987.

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

[22] SIQUEIRA, M. H. S.; *Inspeção em Grandes Distâncias Utilizando Ondas Ultra-Sônicas Guiadas e Inteligência Artificial*. Tese de D. Sc.;COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

[23] PAVLAKOVIC B., LOWE M.; *Manual Disperse*. Imperial College. NDT Lab. London, July, 2001.

[24] KESSLER, S. S., SPEARING, S. M., SOUTIS, C., *Optimization of Lamb Wave Methods for Damage Detection on Composite Materials*. Massachusetts Institute of Technology, 2001.

[25] KESSLER, S. S., SPEARING, S. M., SOUTIS, C., *Damage Detection in Composite Materials Using Lamb Wave Methods*. Smart Materials and Structures v. 11, n. 2, pp. 269-278, Apr. 2002.

- [26] GHOSH, T., KUNDU, T., KARPUR, P. *Efficient Use of Lamb Waves for Detecting Defects on Large Plates*. Ultrasonics v. 36, pp. 791-801, May 1998.
- [27] MALLET, L.; LEE, B. C.; STASZEWSKI, W. J.; SCARPA, F.; *Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: II. Lamb waves for damage detection*. Smart Materials and Structures, Volume 13, Issue 2, Pages 261-269, 2004.
- [28] CAWLEY, P., ALLEYNE, D. *The Use of Lamb Waves for the Long Range Inspection of Large Structures*. Ultrasonics v. 34, pp. 287-290, Jun. 1996.
- [29] SHI, Y.; WOOH, S.; ORWAT, M.; *Laser-ultrasonic generation of Lamb waves in the reaction force range*. Ultrasonics, Volume 41, Issue 8, Pages 623-633, 2003.
- [30] DITRI J.J., ROSE J.L. and CHEN G., *Mode selection criteria for defect detection optimization using Lamb waves*, Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, in: D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Eds.) Plenum Press, New York, Vol.11,1992, p. 2109.
- [31] CHIMENTI, D. E., MARTIN, R. W.; *Nondestructive Evaluation of Composite Laminates by Leaky Lamb Waves*. Ultrasonics v. 29, pp. 13-21, Jan. 1991.
- [32] KUNDU, T., MASLOV, K. I., KARPUR, P., MATIKAS T., NICOLAOU P.; *A Lamb Wave Scanning Approach for Mapping Defects in [0/90] Titanium Matrix Composites*. Ultrasonics 34 (1996) 43.
- [33] KUNDU, T., MASLOV, K. I.; *Selection of Lamb Modes for Detecting Internal Defects in Laminated Composites*. Ultrasonics 35 (1997) 141.
- [34] KUNDU, T., MAJI A., GHOSH, T., MASLOV, K. I.; *Detection of kissing bonds by Lamb waves*. Ultrasonics 35 (1998) 573.
- [35] KUNDU, T., MASLOV, K. I.; *Material Interface Inspection by Lamb Waves*. International Journal of Solids and Structures, 34 (1997) 3885.

[36] ALLEYNE D. N., CAWLEY P.; *Optimization of Lamb Wave Inspection Techniques*. NDT & E International. Vol.25 n1 1992. pp. 11-22.

[37] DILIGENT, O.; LOWE, M.J.; *Reflection of the s₀ Lamb mode from a flat bottom circular hole*. Acoustical Society of America Journal, Volume 118, Issue 5, Pages 2869-2879, 2005.

[38] GUO, N., CAWLEY, P.; *The Interaction of Lamb Waves with Delaminations in Composite Laminates*. Journal of Acoustic of American Society v. 94, n. 4, pp. 2240-2245, Oct. 1993.

[39] TOYAMA, N., TAKATSUBO, J., *Lamb Wave Method for Quick Inspection of Impact-induced Delamination in Composite Materials*. Composites Science and Technology v. 64, n. 9, pp. 1293-1300, Jul. 2004.

[40] TOYAMA, N.; Tsuda, H., Urabe, K., Takatsubo, J.; *Impact damage detection in CFRP using fiber Bragg gratings*. Smart Mater. Struct. 13 (2004) 719–724.

[41] TOYAMA, N.; OKABE, T.; TAKEDA, N.; KISHI, T.; *Effect of transverse cracks on lamb wave velocity in CFRP cross-ply laminates*. Journal of Materials Science Letters, Volume 21, Issue 4, Pages 271 - 273, 2002.

[42] TOYAMA, N.; KIKUSHIMA, Y.; TAKATSUBO, J.; *Effect of delamination on Lamb wave velocity in cross-ply laminates*. Journal of Materials Science Letters, Volume 21, Issue 24, Pages 1891 - 1893, 2002.

[43] TOYAMA, N.; NODA, J.; OKABE; T.; *Quantitative damage detection in cross-ply laminates using Lamb wave method* . Composites Science and Technology, Volume 63, Issue 10, Pages 1473-1479, 2003.

[44] GUO, N., CAWLEY, P.; *Lamb Wave Reflection for Quick Nondestructive Evaluation of Large Composite Laminates*. Materials Evaluation, March 1994.

[45] PAVLAKOVIC B., LOWE M.; Disperse™ – A System for Generating Dispersion Curves. Version 2.0. Imperial College. NDT Lab. London, July, 2001.

[46] DEWHURST, R. J.; EDWARDS, C.; MCKIE, A. D. W.; PALMER, S. B.; *Estimation of the thickness of thin metal sheet using laser generated ultrasound*. Applied Physics Letters, Volume 51, Pages 1066-1068, 1987.

[47] PIERCE, S. G.; CULSHAW, B.; PHILP, W. R.; LECUYER, F; FARLOW, R.; *Broadband Lamb wave measurements in aluminium and carbon/glass fibre reinforced composite materials using non-contacting laser generation and detection* . Ultrasonics, Volume 35, Issue 2, Pages 105-114, 1997.

[48] WILKIE-CHANCELLIER, N.; DUFFO, H.; TINEL, A.; DUCLOS, J.; *Experimental study and signal analysis in the Lamb wave conversion at a bevelled edge* . Ultrasonics, Volume 42, Issues 1-9, Pages 377-381, 2004.

[49] DECLERCQ, N. F.; DEGRIECK, J.; LEROY, O.; *Schlieren photography to study sound interaction with highly absorbing* .Ultrasonics, Volume 43, Issue 7, Pages 505-507, 2005.

[50] DECLERCQ, N. F.; TEKLU, A.; BREAZEALE, M. A.; HASSE, R. D.; DEGRIECK, J.; LEROY, O.; *Detection of Fiber Direction in Composites by Means of a High-Frequency Wide-Bounded Beam and Schlieren Photography*. Research in Nondestructive Evaluation, vol. 16, No. 2, Pages 55-64, 2005.

[51] JIA, X.; *Normal-mode theory of nonspecular phenomena for a finite-aperture ultrasonic beam reflected from layered media*. Applied Physics Letters, Volume 70, Vol.3, pp.309-311, 1997.

[52] TEKLU, A., BREAZEALE, M. A., DECLERCQ, N. F., HASSE, Roger D. , McPherson, Michael S.; *Backward displacement of ultrasonic waves reflected from a periodically corrugated interface*. Journal Applied Physics. 97, 084904 (2005).

[53] DECLERCQ, N. F.; DEGRIECK, J.; LEROY, O.; *Bounded Beam Interaction with Plate-Edge at Lamb Angle*. Acta Acustica united with Acustica, Volume 91, Número 2, Março 2005, pp. 326-332(7).

[54] ZHU, Q. G., RUF, H. J., MAYER, W. G., *Lamb Wave Radiation from Plate Termination in a Liquid*. Ultrasonics, Vol. 29, novembro de 1991.

[55] LAFAUT JP, LEROY, O., WEVERS M, DEVOLDER S, BAERT L. *Schlieren photography study of energy absorption by uric acid nuclei*. Ultrasound Med Biol.; 26(2):335-40, Fevereiro 2000.

[56] PLONA, T. J., BEHAVESH, M., MAYER, W. G., *Rayleigh and Lamb waves at liquid solid boundaries*, Ultrasonics 13, 171–175 (1975).

[57] DECLERCQ, N. F., VAN DEN ABEELE, F., DEGRIECK, J., LEROY, O.; *The Schoch Effect to Distinguish Between Different Liquids in Closed Containers*. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 51, no. 10, outubro 2004.

[58] DECLERCQ N. F., TEKLU, A., BREAZEALE, M.A., BRIERS, Rudy, LEROY, O., Degrieck, J., Shkerdin, G. N., *Study of the scattering of leaky Rayleigh waves at the extremity of a fluid-loaded thick plate*. Journal of Applied Physics-- Volume 96, (10) pp 5836-5840, Novembro, 2004.

[59] MAYER, W., *Detection of local inhomogeneities in solids by rayleigh angle reflection*, Ultrasonics, vol. 19, pp. 109-111, Maio 1981.

[60] Declercq L. N. F., Degrieck, J., Leroy, O.; *The double-sided ultrasonic beam displacement*. Applied Physics Letters -- November 1, 2004 -- Volume 85, (18), pp. 4234-4236.

[61] NEUBAUER, W. G.; *Ultrasonic reflection of a bounded beam at Rayleigh and critical angles for a plane liquid-solid interface*. Journal of Applied Physics, Volume 44, Issue 1, Pages 48-55, 1973.

- [62] BERTONI, H. L., Tamir, T. *Unified Theory of Rayleigh-Angle Phenomena for Acoustic Beams at Liquid-Solid Interfaces*. Applied Physics. 2, 157--172 (1973).
- [63] ROSA FILHO, J.C., *Modelagem Sísmica de Ondas Elásticas e Migração Reversa no Tempo em Meios Transversalmente Isotrópicos*; Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- [64] AULD, B. A.; *Acoustic Fields and Waves in Solids*, v. 1-2. 1 ed. New York, John Wiley & Sons, 1973.
- [65] KRAUTKRÄMER; *Ultrasonic Testing of Materials*. Translation of the Second Revised German Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1969.
- [66] MASON, W. P.; *Physical Acoustics: Principles and Methods*. I part A, 1 ed. New York, Academic Press Inc. 1964.
- [67] KRAUS, J. D.; *Electromagnetics*. Fourth Edition, McGraw-Hill, 1992.
- [68] SACHSE, W., PAO, Y. -H; *On the Determination of Phase and Group Velocities of Dispersive Waves in Solids*. Journal Applied Physics. 49 (8), August, 1978.
- [69] ACHENBACH, J. D.; *Wave Propagation in Elastic Solids*. Publishing Co. , North-Holland, 1973.
- [70] MEYER P. A., ROSE J. L.; *Guided Wave Applications of Piezocomposite Transducers*. <http://www.ndt.net/article/meyer2/meyer2.htm>.
- [71] CHAHBAZ, A., MUSTAFA, V., HAY, D.; *Corrosion Detection in Aircraft Structures Using Guided LambWaves*. NDT.net v.1, n. 11. <http://www.ndt.net/article/tektrend/tektrend.htm>, Nov., 1996.
- [72] SEALE, M. D., SMITH, B. T., PROSSER, W. H., MASTERS, J. E.; *Lamb Wave Response of Fatigued Composite Samples*. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation v. 13B, pp. 1261-1266, 1996.

[73] BALASUBRAMANIAM, K., WHITNEY, S. C.; *Ultrasonic Through-transmission Characterization of Thick Fiber-reinforced Composites*. NDT&E International v. 29, n. 4, pp. 225-236, Aug. 1996.

[74] KRUGER, S., *Caracterização Micro-estrutural de Ferros Fundidos por Ultra-som*. Tese de D. Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

[75] W J Staszewski¹, B C Lee, L Mallet and F Scarpa ,*Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing*. Smart Mater. Struct. 13 .pp251–260- (2004)

[76] SCRUBY, C. B., DRAIN, L. E., *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*. Adam Hilger, Bristol, 1990.

[77] *Manual Alcoa S/A*.

[78] BOUQUET, Pascal. *Critical analysis of the long-term behaviour of polymer matrix composites under a complex mechanical loading history*, Tese de Ph. D., Vrije Universiteit Brussel-2003.

[79] *Manual Fibredux®* - Ciba-Geigy.

APÊNDICE A

MAPEAMENTO DOS CORPOS DE PROVAS POR PULSO ECO

A.1 - ARRANJO EXPERIMENTAL

Os corpos de provas de LFMs foram inspecionados pela técnica ultra-sônica na configuração pulso-eco por varredura automática. Os resultados são mostrados na forma de imagens C-scan. Os parâmetros experimentais utilizados na varredura são mostrados na Tabela A1.

Tabela A1. Parâmetros de varredura pela técnica pulso-eco.

Gerador /Receptor	USIP 20 (Krautkramer/Alemanha)
Frequência do transdutor	5MHz
Taxa de amostragem	12000Ms/s
Número de pontos adquiridos	40000
Área de varredura	100mm X 100mm
Distância entre aquisições	0,5mm
Ganho	60dB

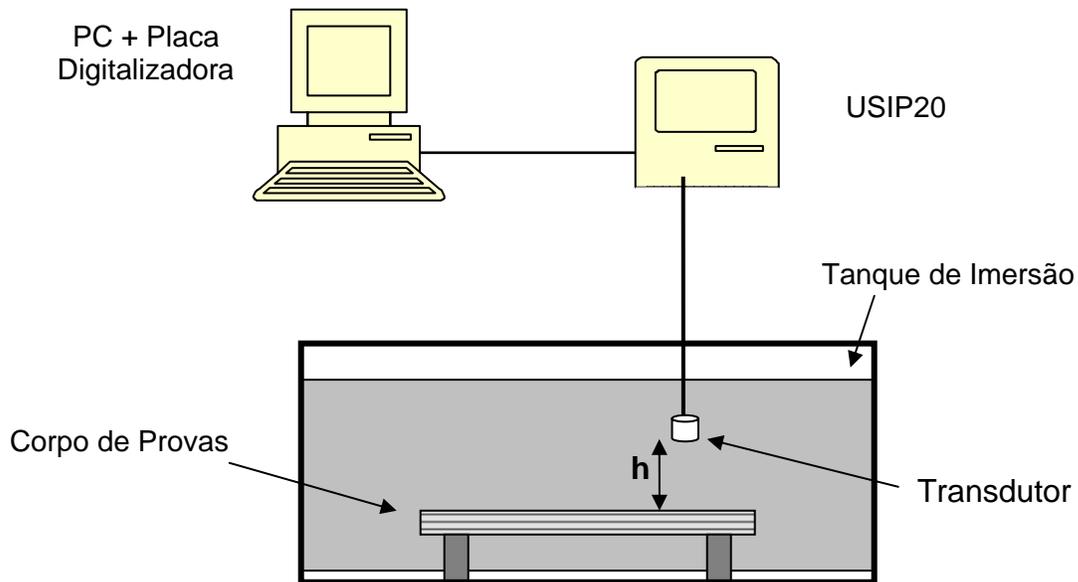


Figura A1. Arranjo experimental para varredura dos corpos de provas pela técnica pulso-eco.

A.2 - VARREDURA DOS CORPOS DE PROVAS

CP1_SD

A imagem C-scan do corpo de prova mostra áreas claras e escuras indicando diferentes intensidades do sinal ultra-sônico, provavelmente devido a heterogeneidade do material ocorrida, possivelmente, em função do processo de produção do corpo de prova, figura A2.

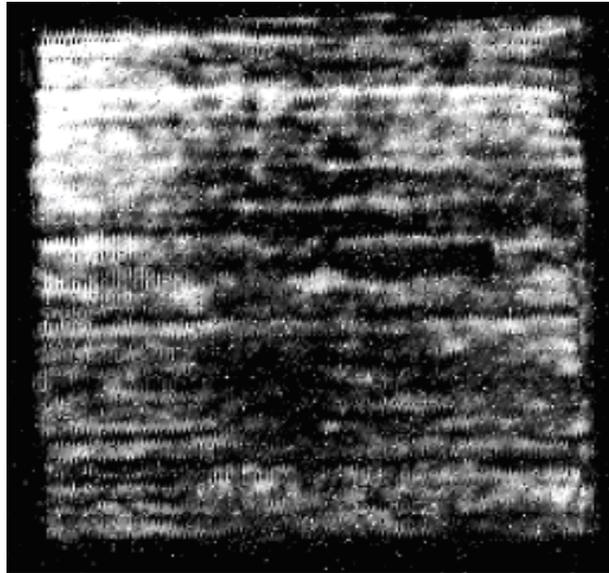


Figura A2 - Imagem C-scan do corpo de prova CP1_SD. Dimensões 100mm x 100mm x 1,34mm.

CP1_F

O defeito inserido é plenamente visível no centro da figura A3 na forma de um quadrado em tom escuro. O círculo escuro mostrado na imagem é possivelmente devido a tensões residuais surgidas durante o processo de cura.

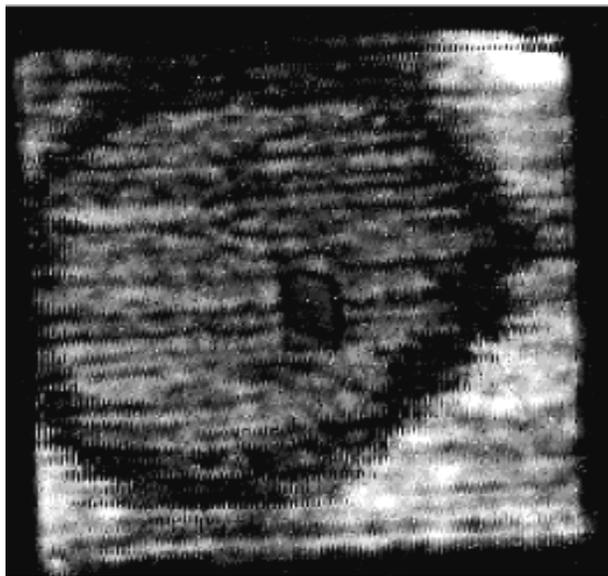


Figura A3 - Imagem C-scan do corpo de prova CP1_F. Dimensões 100mm x 100mm x 1,34mm com a ruptura de fibra de 10mm x 20mm detectada na região central.

CP1_D

A delaminação inserida no corpo de prova é visível no canto superior esquerdo da figura A4. A qualidade da imagem não é boa, já que observa-se a existência de áreas escuras na região central que poderiam também ser interpretadas como defeitos. A heterogeneidade mostrada na imagem é provavelmente devido a tensões residuais surgidas durante o processo de cura.

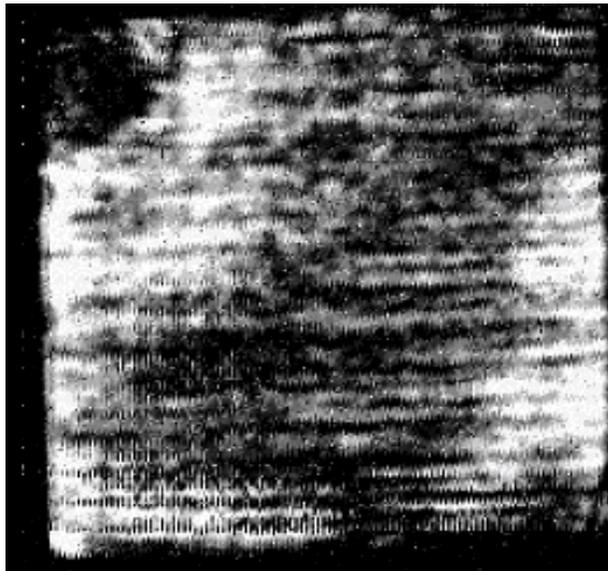


Figura A4 - Imagem C-scan do corpo de prova CP1_D. Dimensões 100mm x 100mm x 1,34mm e delaminação de 20mm x 20mm localizada no canto superior esquerdo.

CP3_F

A ruptura de fibras foi detectada, a exemplo do corpo de provas com delaminação. São observadas regiões circulares com diferentes níveis de amplitude da onda refletida, figura A5. A heterogeneidade mostrada na imagem é provavelmente devido a tensões residuais surgidas durante o processo de cura.

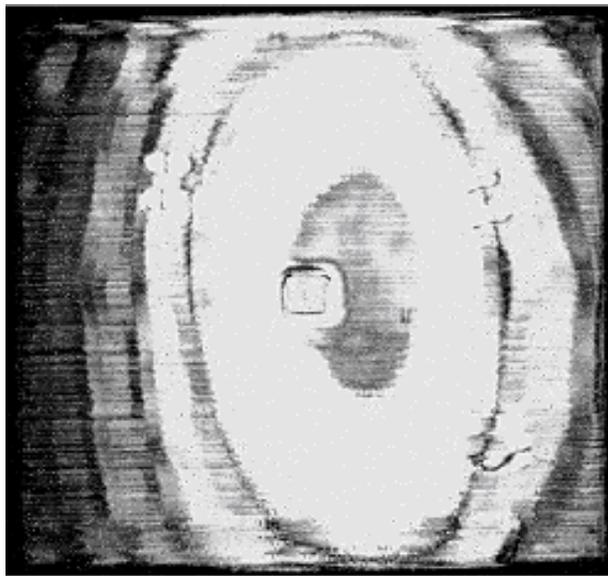


Figura A5 - Imagem C-scan do corpo de prova CP3_F. A ruptura de fibras inserida é visível no centro da imagem. As dimensões do corpo de prova.P. 300mm x 300mm x 1,34mm, com delaminação de 20mm x 20mm.

CP3_D

A delaminação pode ser parcialmente vista, em tom escuro, no centro do corpo de provas, figura A6. As manchas circulares indicam, provavelmente, diferentes níveis de tensões induzidas no corpo de prova durante o processo de cura. Também podem ser vistos quatro marcas dos suportes utilizados como apoio para o corpo de provas.

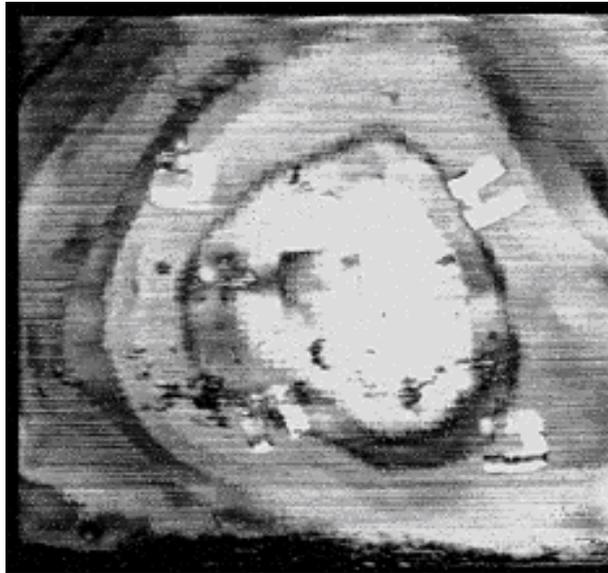


Figura A6 - Imagem C-scan do corpo de prova CP3_D. Delaminação inserida parcialmente visível no centro da imagem. As dimensões do corpo de prova são: 300mm x 300mm x 1,34mm, com delaminação de 40mm x 40mm.

CP4_SD

A figura A7 mostra o Cscan do corpo de provas com dupla camada de prepeg transversal a direção da laminação da chapa de alumínio. Este corpo de provas não possui defeitos inseridos, mas apresenta áreas circulares com diferentes comportamentos acústicos provavelmente devido ao processo de fabricação, o que comprova a heterogeneidade do material.

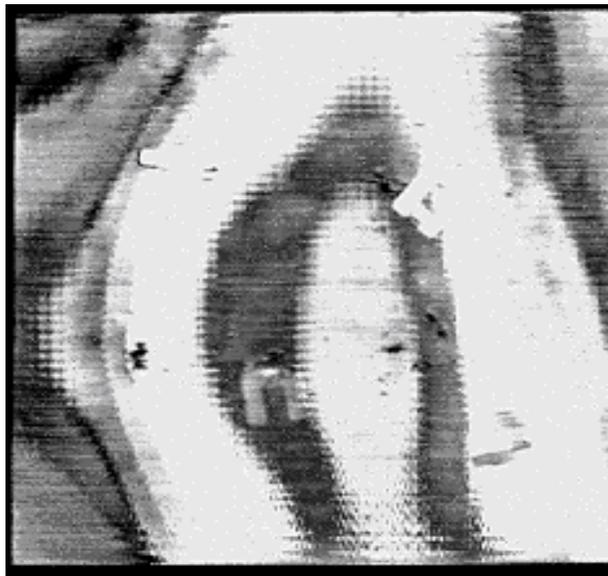


Figura A7. Imagem C-scan do corpo de prova CP4_SD. As dimensões do corpo de prova são: 300mm x 300mm x 1,34mm.

CP4_F

Na figura A8, a ruptura de fibras foi detectada aparecendo na forma de um quadrado escuro no centro da imagem. Áreas com diferentes tons de cinza indicam heterogeneidade do corpo de prova provavelmente devido ao processo de fabricação..

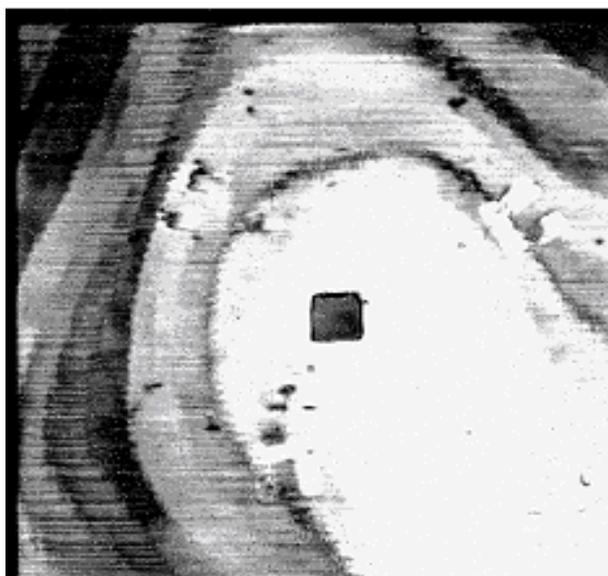


Figura A8 - Imagem C-scan do corpo de prova CP4_F. com ruptura de fibras visível no centro da imagem. As dimensões do corpo de prova são 300mm x 300mm e da ruptura de fibras de 20mm x 20mm.

CP4_D

Através da figura A9, não foi possível detectar a presença da delaminação. As áreas circulares com diferentes tons de cinza demonstram que o material apresenta heterogeneidade.

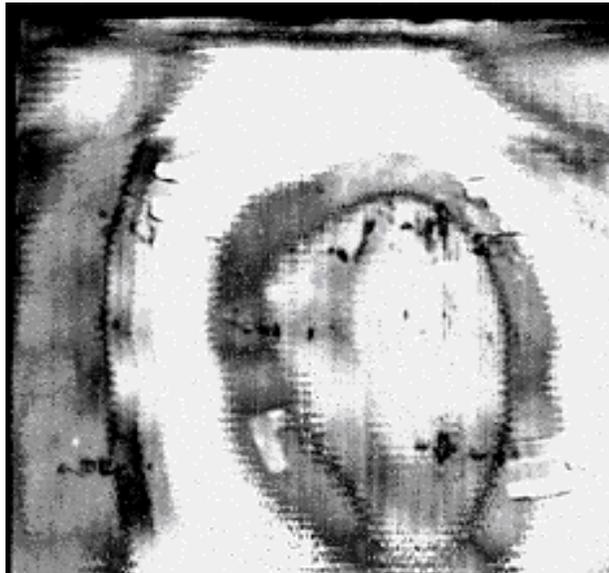


Figura A9. Imagem C-scan do corpo de prova CP4_D com delaminação inserida no centro da imagem, mas não detectada. As dimensões do corpo de prova são 300mm x 300mm, e delaminação de 40mm x 40mm.

ANEXO A

Tabela 1 – Atraso do pulso transmitido e frequência medida considerando a posição X1 do transmissor-receptor. A região hachurada corresponde a região do defeito.

ENSAIO CONTATO POR SAPATA DE PERSPEX								
Posições	CP3_F		CP3 D		CP4 CF		CP4 D	
(mm)	Freq. MHz	Tempo (seg.)						
2	0,650	7,96E-06	0,798	2,00E-05	0,712	1,86E-05	0,714	1,78E-05
4	0,660	1,04E-05	0,792	1,84E-05	0,704	1,85E-05	0,718	1,77E-05
6	0,660	1,05E-05	0,796	1,85E-05	0,706	1,68E-05	0,706	1,62E-05
8	0,660	9,16E-06	0,806	1,99E-05	0,706	1,67E-05	0,716	1,62E-05
10	0,670	7,86E-06	0,802	1,97E-05	0,706	1,67E-05	0,716	1,76E-05
12	0,660	7,76E-06	0,824	1,97E-05	0,726	1,67E-05	0,716	1,77E-05
14	0,660	7,86E-06	0,824	1,97E-05	0,728	1,97E-05	0,706	1,77E-05
16	0,650	7,96E-06	0,810	1,98E-05	0,736	1,98E-05	0,704	1,77E-05
18	0,660	7,96E-06	0,802	1,97E-05	0,734	1,68E-05	0,704	1,62E-05
20	0,660	7,96E-06	0,792	1,86E-05	0,708	1,68E-05	0,704	1,62E-05
22	0,650	8,16E-06	0,806	1,98E-05	0,706	1,68E-05	0,702	1,62E-05
24	0,650	8,26E-06	0,826	1,96E-05	0,706	1,67E-05	0,702	1,62E-05
26	0,650	8,26E-06	0,812	1,97E-05	0,706	1,68E-05	0,712	1,78E-05
28	0,650	7,96E-06	0,808	1,97E-05	0,706	1,68E-05	0,712	1,78E-05
30	0,660	9,36E-06	0,800	1,96E-05	0,714	1,67E-05	0,712	1,78E-05
32	0,660	8,76E-06	0,806	1,96E-05	0,718	1,61E-05	0,710	1,78E-05
34	0,660	8,26E-06	0,824	1,96E-05	0,746	1,61E-05	0,710	1,78E-05
36	0,650	8,16E-06	0,802	1,96E-05	0,760	1,61E-05	0,710	1,78E-05
38	0,660	8,16E-06	0,806	1,96E-05	0,744	1,61E-05	0,710	1,78E-05
40	0,660	8,16E-06	0,820	1,95E-05	0,720	1,61E-05	0,710	1,78E-05
42	0,650	8,06E-06	0,824	1,96E-05	0,722	1,68E-05	0,710	1,78E-05
44	0,660	8,06E-06	0,810	1,97E-05	0,706	1,68E-05	0,710	1,78E-05
46	0,700	8,06E-06	0,808	1,97E-05	0,700	1,67E-05	0,712	1,79E-05
48	0,650	7,96E-06	0,804	1,98E-05	0,702	1,67E-05	0,712	1,78E-05
50	0,660	7,96E-06	0,804	1,98E-05	0,702	1,68E-05	0,702	1,78E-05
52	0,660	9,26E-06	0,802	1,99E-05	0,702	1,68E-05	0,712	1,78E-05
54	0,660	7,96E-06	0,804	1,99E-05	0,702	1,68E-05	0,702	1,78E-05
56	0,680	7,86E-06	0,804	1,86E-05	0,700	1,69E-05	0,712	1,78E-05
58	0,660	7,86E-06	0,804	1,86E-05	0,700	1,69E-05	0,702	1,78E-05
60	0,680	7,76E-06	0,822	1,98E-05	0,698	1,68E-05	0,714	1,78E-05
62	0,660	7,76E-06	0,824	1,99E-05	0,718	1,69E-05	0,714	1,78E-05
64	0,670	7,76E-06	0,804	1,99E-05	0,698	1,69E-05	0,714	1,77E-05
66	0,660	7,76E-06	0,812	1,99E-05	0,696	1,70E-05	0,704	1,78E-05
68	0,660	7,76E-06	0,812	1,98E-05	0,694	1,70E-05	0,714	1,78E-05
70	0,670	7,86E-06	0,802	1,98E-05	0,694	1,71E-05	0,712	1,78E-05
72	0,660	7,96E-06	0,796	1,97E-05	0,704	1,85E-05	0,714	1,78E-05
74	0,680	7,96E-06	0,802	1,97E-05	0,704	1,85E-05	0,704	1,78E-05
76	0,660	7,86E-06	0,794	1,84E-05	0,704	1,85E-05	0,714	1,78E-05
78	0,660	7,86E-06	0,820	1,98E-05	0,706	1,86E-05	0,714	1,78E-05
80	0,650	7,76E-06	0,806	1,99E-05	0,706	1,85E-05	0,714	1,78E-05

Tabela 2A – Atraso do pulso transmitido e frequência medida considerando a posição X1 do transmissor-receptor. A região hachurada corresponde a região do defeito. Posições consideradas: varredura de 2 a 50 mm.

ENSAIO POR IMERSÃO										
Posições	CP3_F		CP3 D		CP4 CF		CP4 D		Alumínio	
(mm)	Freq. MHz	Tempo (seg.)								
2	0,660	8,22E-06	0,670	9,34E-06	0,575	8,50E-06	0,570	9,26E-06	0,795	1,17E-05
4	0,660	8,22E-06	0,670	9,26E-06	0,570	9,50E-06	0,570	9,10E-06	0,775	1,11E-05
6	0,660	8,26E-06	0,670	9,34E-06	0,570	8,58E-06	0,570	9,10E-06	0,775	1,11E-05
8	0,660	8,02E-06	0,660	9,34E-06	0,570	8,74E-06	0,570	9,10E-06	0,775	1,11E-05
10	0,660	8,22E-06	0,660	9,38E-06	0,570	8,58E-06	0,570	9,06E-06	0,780	1,11E-05
12	0,660	7,98E-06	0,680	9,38E-06	0,570	8,58E-06	0,570	9,02E-06	0,780	1,11E-05
14	0,660	8,42E-06	0,680	9,30E-06	0,570	8,50E-06	0,570	9,10E-06	0,780	1,11E-05
16	0,660	8,38E-06	0,680	9,30E-06	0,575	8,50E-06	0,570	8,98E-06	0,785	1,13E-05
18	0,660	8,50E-06	0,680	9,30E-06	0,575	8,50E-06	0,570	9,02E-06	0,785	1,12E-05
20	0,650	8,50E-06	0,680	9,18E-06	0,575	8,34E-06	0,570	9,02E-06	0,785	1,12E-05
22	0,650	8,54E-06	0,660	9,22E-06	0,575	8,42E-06	0,570	9,02E-06	0,785	1,12E-05
24	0,670	8,50E-06	0,660	9,14E-06	0,575	8,42E-06	0,570	8,98E-06	0,785	1,13E-05
26	0,670	8,50E-06	0,660	9,02E-06	0,575	8,38E-06	0,570	9,02E-06	0,785	1,13E-05
28	0,660	8,46E-06	0,660	8,94E-06	0,575	8,34E-06	0,565	9,02E-06	0,790	1,13E-05
30	0,660	8,26E-06	0,690	8,98E-06	0,575	8,30E-06	0,565	9,10E-06	0,790	1,14E-05
32	0,660	8,34E-06	0,690	9,06E-06	0,575	8,42E-06	0,565	9,10E-06	0,785	1,14E-05
34	0,660	8,34E-06	0,690	9,14E-06	0,580	7,74E-06	0,565	9,02E-06	0,785	1,15E-05
36	0,660	8,18E-06	0,690	9,06E-06	0,580	7,78E-06	0,565	9,02E-06	0,785	1,15E-05
38	0,670	8,26E-06	0,690	9,50E-06	0,585	7,90E-06	0,565	8,98E-06	0,785	1,15E-05
40	0,680	8,30E-06	0,670	9,42E-06	0,585	7,82E-06	0,570	9,06E-06	0,790	1,15E-05
42	0,680	8,38E-06	0,670	9,46E-06	0,590	7,74E-06	0,565	9,10E-06	0,790	1,15E-05
44	0,680	8,30E-06	0,660	9,54E-06	0,590	7,82E-06	0,565	9,06E-06	0,790	1,15E-05
46	0,680	8,22E-06	0,660	9,34E-06	0,590	7,66E-06	0,570	9,02E-06	0,790	1,16E-05
48	0,660	8,34E-06	0,660	9,30E-06	0,585	7,70E-06	0,570	8,98E-06	0,795	1,15E-05
50	0,660	8,26E-06	0,660	9,26E-06	0,585	7,62E-06	0,570	9,10E-06	0,795	1,15E-05

Tabela 2B – Atraso do pulso transmitido e frequência medida considerando a posição X1 do transmissor-receptor. A região hachurada corresponde a região do defeito. Posições consideradas: varredura de 52 a 102 mm.

Posições (mm)	CP3_F		CP3 D		CP4 CF		CP4 D		Alumínio	
	Freq. MHz	Tempo (seg.)	Freq. MHz	Tempo (seg.)	Freq. MHz	(mm)	Freq. MHz	Tempo (seg.)	Freq. MHz	Tempo (seg.)
52	0,660	8,38E-06	0,660	9,42E-06	0,580	7,74E-06	0,570	8,98E-06	0,790	1,15E-05
54	0,660	8,38E-06	0,690	9,26E-06	0,580	7,62E-06	0,570	8,98E-06	0,790	1,16E-05
56	0,660	8,38E-06	0,690	9,50E-06	0,575	7,66E-06	0,570	8,98E-06	0,790	1,16E-05
58	0,660	8,38E-06	0,690	9,30E-06	0,575	8,30E-06	0,570	8,98E-06	0,795	1,17E-05
60	0,650	8,30E-06	0,690	9,38E-06	0,575	8,34E-06	0,570	8,94E-06	0,795	1,17E-05
62	0,660	8,34E-06	0,670	9,30E-06	0,570	8,34E-06	0,570	8,98E-06	0,795	1,16E-05
64	0,660	8,42E-06	0,660	9,34E-06	0,570	8,38E-06	0,570	8,90E-06	0,795	1,16E-05
66	0,660	8,46E-06	0,660	9,22E-06	0,570	8,42E-06	0,570	8,98E-06	0,800	1,13E-05
68	0,660	8,46E-06	0,660	9,30E-06	0,580	8,46E-06	0,570	8,98E-06	0,785	1,12E-05
70	0,660	8,42E-06	0,660	8,98E-06	0,570	8,50E-06	0,570	8,90E-06	0,780	1,11E-05
72	0,660	8,54E-06	0,660	9,18E-06	0,570	8,50E-06	0,570	8,86E-06	0,775	1,14E-05
74	0,660	8,50E-06	0,690	8,94E-06	0,565	8,50E-06	0,580	8,94E-06	0,775	1,16E-05
76	0,650	8,50E-06	0,690	9,26E-06	0,565	8,50E-06	0,580	8,98E-06	0,780	1,20E-05
78	0,650	8,62E-06	0,690	9,10E-06	0,565	8,54E-06	0,570	8,90E-06	0,780	1,17E-05
80	0,660	8,62E-06	0,690	9,22E-06	0,565	8,54E-06	0,570	8,94E-06	0,780	1,17E-05
82	----	----	----	----	----	----	----	----	0,780	1,16E-05
84	----	----	----	----	----	----	----	----	0,800	1,13E-05
86	----	----	----	----	----	----	----	----	0,800	1,18E-05
88	----	----	----	----	----	----	----	----	0,800	1,17E-05
90	----	----	----	----	----	----	----	----	0,795	1,17E-05
92	----	----	----	----	----	----	----	----	0,795	1,17E-05
94	----	----	----	----	----	----	----	----	0,795	1,17E-05
96	----	----	----	----	----	----	----	----	0,795	1,18E-05
98	----	----	----	----	----	----	----	----	0,795	1,17E-05
100	----	----	----	----	----	----	----	----	0,795	1,17E-05
102	----	----	----	----	----	----	----	----	0,795	1,17E-05

Tabela 2C – Atraso do pulso transmitido e frequência medida considerando a posição X1 do transmissor-receptor. Posições consideradas: varredura de 104 a 156 mm.

Posições (mm)	CP3_F		CP3 D		CP4 CF		CP4 D		Alumínio	
	Freq. MHz	Tempo (seg.)	Freq. MHz	Tempo (seg.)	Freq. MHz	Tempo (seg.)	Freq. MHz	Tempo (seg.)	Freq. MHz	Tempo (seg.)
104	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,18E-05
106	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
108	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
110	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
112	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
114	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
116	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,17E-05
118	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,17E-05
120	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,17E-05
122	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,17E-05
124	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,18E-05
126	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,17E-05
128	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,17E-05
130	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,17E-05
132	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,18E-05
134	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
136	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
138	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
140	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
142	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,17E-05
144	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,18E-05
146	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,17E-05
148	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,17E-05
150	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,17E-05
152	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,795	1,18E-05
154	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
156	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
158	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05
160	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,790	1,18E-05

Tabela 3 – Valores do ângulo de incidência, frequências simulada e experimental, velocidades de fase e grupo, diferenças experimental-simulada para frequências e velocidades

ENSAIO: IMERSÃO										
Corpo de Prova	Ângulo	Freq Simulada	Freq Exp.	Δ Freq	Vel. Fase Sim.	Vel. Fase Exp.	Δ VF _{ms}	Vel. Grupo S im.	Vel. Grupo Exp.	Δ VG _{ms}
CP3 F	10,5°	0,850	0,675	0,175	7821,00	6135,40	1685,60	3890,00	5429,70	1539,70
CP3 D	10,5°	0,850	0,670	0,180	7821,00	6403,65	1417,35	3890,00	5681,80	1791,80
CP4 CF	17,5°	0,800	0,570	0,230	4953,00	5286,10	333,10	4702,00	4807,70	105,70
CP4 D	17,5°	0,800	0,682	0,118	4953,00	5522,30	569,30	4702,00	5000,00	298,00
Alumínio	16°	1,000	0,790	0,210	5418,00	5707,30	289,30	5377,00	5435,10	58,10

ENSAIO: CONTATO										
Corpo de Prova	Ângulo	Freq Simulada	Freq Exp.	Δ Freq	Vel. Fase Sim.	Vel. Fase Exp.	Δ VF _{ms}	Vel. Grupo Sim.	Vel. Grupo Exp.	Δ VG _{ms}
CP3 CF	27,5°	0,750	0,770	0,020	5934,00	6131,50	197,50	5616,00	6181,10	565,10
CP3 D	27,5°	0,750	0,806	0,056	5934,00	6341,55	407,55	5616,00	5000,00	616,00
CP4 CF	34°	0,950	0,706	0,244	4906,00	5072,25	166,25	4541,00	4807,00	266,00
CP4 D	34°	0,950	0,712	0,238	4906,00	5066,80	160,80	4541,00	5082,10	541,10

Obs.: os dados experimentais acima, estão em forma de MEDIANA, e os deltas estão em módulo
 Unidades: Frequência(MHz) e Velocidade(m/s)

Tabela 4. Resultados para as velocidades de fase e de grupo utilizando a frequência experimental do ensaio.

ENSAIO: IMERSÃO (de acordo com a Frequência Experimental)										
Corpo de Prova	Ângulo	Freq Simulada	Freq Exp.	Δ Freq	Vel. Fase Sim.	Vel. Fase Exp.	Δ VF _{ms}	Vel. Grupo S im.	Vel. Grupo Exp.	Δ VG _{ms}
CP3 F	10,5°	0,850	0,675	0,175	7821,00	6135,40	1685,60	3890,00	5429,70	1539,70
CP3 D	10,5°	0,850	0,670	0,180	7821,00	6403,65	1417,35	3890,00	5681,80	1791,80
CP4 CF	17,5°	0,800	0,570	0,230	4953,00	5286,10	333,10	4702,00	4807,70	105,70
CP4 D	17,5°	0,800	0,682	0,118	4953,00	5522,30	569,30	4702,00	5000,00	298,00
Alumínio	16°	1,000	0,790	0,210	5418,00	5707,30	289,30	5377,00	5435,10	58,10

ENSAIO: CONTATO (de acordo com a Frequência Experimental)										
Corpo de Prova	Ângulo	Freq Simulada	Freq Exp.	Δ Freq	Vel. Fase Sim.	Vel. Fase Exp.	Δ VF _{ms}	Vel. Grupo Sim.	Vel. Grupo Exp.	Δ VG _{ms}
CP3 CF	27,5°	0,750	0,770	0,020	5934,00	6131,50	197,50	5616,00	6181,10	565,10
CP3 D	27,5°	0,750	0,806	0,056	5934,00	6341,55	407,55	5616,00	5000,00	616,00
CP4 CF	34°	0,950	0,706	0,244	4906,00	5072,25	166,25	4541,00	4807,00	266,00
CP4 D	34°	0,950	0,712	0,238	4906,00	5066,80	160,80	4541,00	5082,10	541,10

Obs.: os dados experimentais acima, estão em forma de MEDIANA, e os deltas estão em módulo
 Unidades: Frequência(MHz) e Velocidade(m/s)