

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" FACULDADE DE ENGENHARIA Câmpus de Ilha Solteira - SP

Aline Emy Takiy

USO DE ONDAS DE LAMB E SCHOLTE PARA CARACTERIZAÇÃO DE LÍQUIDOS

Ilha Solteira

2015

Aline Emy Takiy

USO DE ONDAS DE LAMB E SCHOLTE PARA CARACTERIZAÇÃO DE LÍQUIDOS

Trabalho apresentado como requisito para a obtenção do título de doutora no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira. Área: Automação

Cláudio Kitano Orientador

Luis Elvira Segura Coorientador

Ilha Solteira

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T136u	Takiy, Aline Emy. Uso das ondas de Lamb e Scholte para caracterização de líquidos / Aline Emy Takiy Ilha Solteira: [s.n.], 2015 123 f. : il.
	Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015
	Orientador: Cláudio Kitano Co-orientador: Luis Elvira Segura Inclui bibliografia
	1. Ondas de Lamb. 2. Modo quase Scholte. 3. Caracterização de líquidos. 4. Fluido viscoso.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: USO DE ONDAS DE LAMB E SCHOLTE PARA CARACTERIZAÇÃO DE LÍQUIDOS

AUTORA: ALINE EMY TAKIY ORIENTADOR: Prof. Dr. CLAUDIO KITANO CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIS ELVIRA SEGURA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LUIS ELVIBA-SEGURA

Instituto de Tecnologias Físicas y de la Informacion

A&Barroll.

Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

catter

Prof. Dr. RICARDO TOKIO HIGUTI Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

nor

Prof. Dr. FLÁVIO BUIOCHI Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos / Escola Politécnica da USP

Prof. Dr. NICOLÁS LEONARDO PÉREZ ALVAREZ Centro Universitário de Paysandú / Universidad de La Republica

N

Data da realização: 29 de maio de 2015.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Nelson e Kimiko

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade e capacidade dadas, permitindo que eu chegasse à etapa final e por todos os momentos vividos durante este doutorado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cláudio Kitano, que me ensinou, disciplinou, acreditou e confiou no meu potencial. Agradeço imensamente os ensinamentos, por todo apoio prestado e tempo dedicado ao nosso trabalho.

Ao Dr. Luis Elvira Segura, meu coorientador no Brasil e orientador no estágio sanduíche no ITEFI-CSIC-Espanha, que muito me ensinou e orientou para a realização deste trabalho. A sua criatividade, conhecimento e qualidade científica que me soube transmitir, contribuíram para meu crescimento intelectual e pessoal. Muito obrigada!

Ao Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela contribuição com sugestões, idéias e por disponibilizar o laboratório para a elaboração desta tese. Agradeço, também, a oportunidade de realizar o doutorado sanduíche.

Agradeço aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho, Prof. Dr. Flávio Buiochi e Dr. Nicolás Pérez por comporem a banca de minha defesa.

Agradeço aos meus pais, Nelson e Kimiko, meus irmãos Rodrigo e Stephanie por estarem ao meu lado em todos os momentos, incentivando e auxiliando em mais esta etapa de minha vida. Em especial, agradeço ao meu esposo Daniel pela compreensão, paciência e incentivo durante esta jornada. Obrigada por estar sempre ao meu lado, me apoiando mesmo quando a distância era tamanha e necessária.

Ao técnico Valdemir Chaves, que me auxiliou com a produção de peças para a realização dos experimentos.

Aos amigos do Laboratório de Ultrassom, Silvio César Granja Garcia, Vander Teixeira Prado, Marcelo Moreira Thiago, Fernando Cruz Pereira, José Herique Galeti, João Ricardo Lhullier Lugão, Andryos da Silva Lemes, Paula Lalucci Berton, Filipe Angeli Caniati, Marlon Garcia e todos os demais que em muitos momentos me ajudaram e apoiaram durante a pesquisa.

Aos amigos que me acolheram durante o doutorado sanduíche no ITEFI-CSIC Espanha, Dr. Luis Elvira Segura, Dr. Francisco Montero de Espinosa (Paco), Maria Antonia Garcia-Olias, Candelas Redondo, Dr. Pedro Castro, Dr. Shiva Kant Shukla, Dr. David Isaac Ibarra Zarate, Dr. Santiago Ortiz e Dra. Cristina Aparicio Peña, agradeço imensamente a acolhida, a amizade, o companherismo dentro do laboratório e nos momentos de descontração.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade de bolsa de doutorado e pelo suporte com a bolsa de doutorado sanduíche no exterior, permitindo o melhor desenvolvimento da pesquisa.

"O Destino embaralha as cartas, mas somos nós que jogamos." William Shakespeare

RESUMO

O estudo da interação de ondas elásticas em sólidos imersos em um fluido tem sido reconhecido como um meio viável para caracterização de líquidos. As ondas guiadas em estruturas tipo placa possuem a característica de serem multimodais e dispersivas. Estas características introduzem mais informação ao processo de medição, além de tornar a análise teórica e a interpretação física dos resultados experimentais mais envolventes. Quando a placa está em contato com o fluido, há uma forte atenuação devido às ondas de fuga e perdas viscosas no fluido. Esta característica pode ser explorada para a caracterização de líquidos, devido à alta sensibilidade associada à interação entre a onda e o fluido. Pensando nesta particularidade estudou-se o modo quase Scholte, que é um tipo de onda de interface cuja energia está confinada perto da região da superfície da placa. A análise deste modo propagante é uma alternativa atraente para se determinar a velocidade volumétrica longitudinal e a atenuação no líquido, o que proporciona valiosas informações sobre as propriedades do fluido. Neste trabalho, as ondas guiadas (modos de Lamb e quase Scholte) são teoricamente descritas por um sistema de equações obtido do modelamento de uma placa sólida homogênea em contato com um fluido viscoso, o qual é descrito usando a equação de Navier-Stokes. As curvas de dispersão e atenuação das ondas de Lamb e do modo quase Scholte são obtidos numericamente como soluções das equações características. Experimentos foram realizados visando mensurar a velocidade de fase e a atenuação para os modos de Lamb e quase Scholte, mostrando a existência de bandas de frequências de baixa atenuação. Estas medições foram obtidas usando transdutores longitudinais de banda larga acoplados a prismas de acrílico, excitados com pulsos senoidais e posteriormente analisados em tempo-frequência. Imagens por ultrassom foram realizadas para se avaliar a viabilidade do uso de bandas de baixa atenuação na detecção de defeitos em placas submersas. Para a caracterização de líquidos, desenvolveu-se o sensor de ondas quase Scholte composto de placa e transdutor shear, e, para a extração de informação elaborou-se o algoritmo de inversão de dados, o qual fornece a velocidade longitudinal e a densidade do fluido a partir da velocidade de fase experimental do modo quase Scholte para várias frequências. Foram mensuradas amostras de misturas de água e etanol em diversas concentrações e alguns líquidos puros, cujas propriedades são conhecidas na literatura. Os resutados obtidos estão em concordância com os valores conhecidos alcançando-se uma incerteza experimental inferior a 3 % e 0,5 % nas medições de densidade e velocidade de propagação do líquidos puros, respectivamente, e, inferior a 0,21 % nas medições de concentração de misturas.

Palavras-chave: Ondas de Lamb. Modo quase Scholte. Caracterização de líquidos. Fluido viscoso.

ABSTRACT

The study of the interaction of elastic waves in solids immersed in a fluid has been recognized as a suitable method for fluid characterization. Guided waves in plate-like structures, are multimodal and dispersive. These characteristics provides more information in the measurement process. In addition, the theoretical analysis and physical interpretation of the experimental results become more involved. When the plate is in contact with a fluid, there is strong attenuation due to Leaky waves and viscous losses in the fluid. This characteristic can be explored for the fluid characterization, due to the high sensitivity associated to the interaction between the wave and fluid. From this feature a study about the quasi-Scholte mode was done, which is a kind of interface wave and its wave energy in the fluid is confined in the region close to the surface of the plate. The analysis of this propagating mode is an attractive alternative to determine the bulk longitudinal velocity and attenuation in the liquid, which provide valuable information about the liquid properties. In this work, guided waves (Lamb and quasi-Scholte modes) are theoretically described by a system of equations obtained by modeling a homogenous solid plate in contact with a viscous fluid, which is modeled using the Navier-Stokes equation. The dispersion and attenuation curves of Lamb waves and quasi Scholte mode are numerically calculated from the characteristic equations. Experimental measurements were conducted in order to obtain the phase velocity and attenuation for the Lamb waves and quasi Scholte mode showing the existence of low attenuation frequencies bands. These measurements were obtained by using longitudinal wide band transducers coupled to acrylic wedges, excited with senoidal pulses and then time-frequency analysed. In order to evaluate the potential use of this result in NDT applications ultrasonic images were also experimentally obtained to analyze the feasibility of using the low attenuation frequency bands for defect detection in immersed plates. For the fluid characterization, a quasi-Scholte wave sensor, mainly composed of a stainless steel plate and a shear transducer, was developed. To obtain the fluid properties from the measurements of the quasi-Scholte waves, a data inversion algorithm was elaborated. This algorithm provides the longitudinal velocity and density of the fluid by using the experimental phase velocity of the quase-Scholte for several frequencies. The experimental results are in accordance with the known true values with an uncertainty below 3 % and 0.5 % for the density and the sound velocity of pure liquids, respectively, and below 0.21 % for the measurement of the mixture concentration.

Keywords: Lamb waves. Quasi-Scholte mode. Fluid characterization. Viscous fluid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Sistema de coordenadas para o estudo das ondas de Lamb em uma placa	
	isotrópica em meio fluido	37
Figura 2 –	Onda de Lamb simétrica. a) Discretização fina. b) Funções v_x (par) e v_z	
	(ímpar)	46
Figura 3 –	Onda de Lamb antissimétrica. a) Discretização fina. b) Funções v_x (ímpar)	
	$e v_z$ (par)	47
Figura 4 –	Curvas de dispersão para a placa de alumínio imersa em água	50
Figura 5 –	Curvas de dispersão relacionando o número de onda k_R e o produto $(f \cdot 2d)$.	51
Figura 6 –	Curvas de velocidade de grupo para a placa de alumínio imersa em água	52
Figura 7 –	Curvas de atenuação para a placa de alumínio imersa em água. a) Modos de	
	Lamb. b) Vista em detalhe da curva de atenuação do modo QSCH	53
Figura 8 –	Perfis de vibração da velocidade de partícula <i>out-of-plane</i> (v_z) do modo S1	
	para frequências próximas do mínimo de atenuação. Dados normalizados	
	com o módulo da velocidade na origem.	54
Figura 9 –	Curvas de dispersão teóricas para o modo fundamental A0 (ar/água) antissi-	
	métrico e quase Scholte. a) Velocidade de fase em função da frequência; b)	
	Velocidade de grupo em função da frequência; c) Coeficiente de atenuação	
	em função da frequência.	57
Figura 10 –	Perfis de deslocamento e stress para os modos A0 (ar/água) e quase Scholte	
	na frequência de 0.22 MHz.mm. a) Velocidades out-of-plane e in-plane para	
	o modo A0 em sólido-ar, modo A0 em sólido-água e modo quase Scholte;	
	b) Componente Stress T_{zz} e T_{xz} para o modo A0 em sólido-ar, modo A0 em	
	sólido-água e modo quase Scholte	58
Figura 11 –	Estrutura de elementos e nós. a) Modelo 2D. b) Modelo 3D	62
Figura 12 –	Aplicação do método 2D-FFT	64
Figura 13 –	Esquema de simulação para se obter as curvas de dispersão na placa de alu-	
	mínio	65
Figura 14 –	2D-FFT da resposta ao aplicar um sinal impulso no sistema placa de alumí-	
	nio, de 1 mm de espessura, imersa em água.	66
Figura 15 –	Deslocamento do modo antissimétrico determinado ao longo da propagação	
	na placa imersa em água.	66
Figura 16 –	Esquema de simulação para a placa parcialmente imersa em água	68
Figura 17 –	2D-FFT da resposta dos 15 pontos de análise posicionados dentro da placa.	
	a) Região placa-ar. b) Região placa-água	69
Figura 18 –	2D-FFT da resposta dos 30 pontos de análise posicionados dentro da placa	
	parcialmente imersa em água.	69
Figura 19 –	Incidência de um feixe de onda na superfície entre dois meios: o raio inci-	
	dente é dividido em raio refletido e raio refratado	71

Figura 20 – S	Seleção de velocidade de propagação para o cálculo do ângulo de acopla-	
n	nento dos modos guiados, e, de frequência de excitação dos modos guiados.	
a) Velocidade de fase. b) Velocidade de grupo. c) Atenuação	73
Figura 21 – P	Prismas produzidos em acrílico utilizados para o acoplamento dos modos de	
L	Lamb	74
Figura 22 – T	Frilho em acrílico utilizado para fixação dos prismas. a) Trilho. b) Trilho	
С	com prismas fixados.	74
Figura 23 – E	Esquema da configuração experimental para mensurar as ondas de Lamb em	
u	ıma placa imersa em água.	75
Figura 24 – In	nstrumentação e processo de medição usando placa de alumínio imersa em	
á	gua e prismas de acrílico	76
Figura 25 – T	Cestes iniciais para desenvolvimento de sensor para caracterização de líquidos.	78
Figura 26 – M	Montagem do sensor com transdutor colado na placa de aço inox. a) Es-	
q	uema de montagem. b) Foto do sensor	79
Figura 27 – C	Condutância da piezocerâmica PZ27 de 3,4 MHz	80
Figura 28 – S	Sensor baseado no modo QSCH e recipiente em silicone para amostras	81
Figura 29 – E	Esquema da configuração experimental para mensurar o modo quase Scholte.	81
Figura 30 – S	Sensor utilizado em análise experimental para mensurar o modo quase Scholte.	82
Figura 31 – A	Aparato experimental com o sensor baseado no modo quase Scholte utili-	
Z	zado nas medições.	82
Figura 32 – S	Sinal temporal adquirido pelo sensor para caracterização de líquidos	83
Figura 33 – R	Resultados teórico e experimental para a velocidade de fase do modo quase	
S	Scholte obtidos para diferentes concentrações de etanol em água	90
Figura 34 – R	Resultados teórico (linhas) e experimental (símbolos) para a velocidade de	
fa	ase do modo quase Scholte obtidos para líquidos puros.	92
Figura 35 – G	Gráfico de velocidade longitudinal e densidade versus concentração.	94
Figura 36 – R	Resultados teórico e experimental para a velocidade de fase do modo quase	
S	Scholte obtidos para concentrações de etanol em água entre 90 e 100 %	95
Figura 37 – D	Dados experimentais com curvas de ajuste. a) Densidade versus Concentra-	
ç	ão. b) Velocidade longitudinal versus Concentração.	97
Figura 38 – T	Técnica <i>phased array</i> com elementos excitados em tempos diferentes. a)	
Р	Para angulação do feixe. b) Para focalizar o feixe. c) Para focalização e	
a	ngulação do feixe.	02
Figura 39 – P	Placa de alumínio com defeitos artificiais. Acima está um esquema com	
d	limensões em mm e abaixo está a foto do array linear com o prisma de	
a	crílico acoplado à placa	03
Figura 40 – P	Propagação de pulsos do modo S0 a 1 MHz em uma placa imersa de 1 mm	
d	le espessura. a) Transdutor receptor distante 15 mm do emissor. b) Para	
u	uma distância de 45 mm	04

Figura 41 –	Esquema do processamento de sinais para se obter velocidade de fase e ate-	
	nuação	105
Figura 42 –	Resultados teóricos e experimentais para a propagação dos modos de Lamb	
	na placa imersa em água. a) Velocidade de fase versus frequência. b) Ate-	
	nuação versus frequência. c) Número de onda versus frequência	106
Figura 43 –	Resposta em frequência do modo A1 (símbolo quadrado) e do modo S1	
	(circulo). Propagação em placa em ar (vermehlo e azul) e em água (preto e	
	verde)	107
Figura 44 –	Imagem para a detecção de defeito de placa em ar, usando o modo S1 com	
	velocidade de propagação de 4210 m/s.	108
Figura 45 –	Imagem para a detecção de defeito da placa imersa em água, usando o modo	
	S1 com velocidade de propagação de 3858 m/s	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	_	Análise de erro de velocidade longitudinal e densidade do fluido para varia-	
		ções de velocidade de fase na frequência de 2,2 MHz	88
Tabela 2	_	Análise de erro de densidade do fluido, mantendo a velocidade longitudi-	
		nal do fluido fixo em $c_f = 1500$ m/s. Variações de velocidade de fase na	
		frequência de 2,2 MHz	88
Tabela 3	_	Análise de erro de velocidade longitudinal do fluido, mantendo a densidade	
		fixa em $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$. Variações de velocidade de fase na frequência de	
		2,2 MHz	89
Tabela 4	_	Propriedades de líquidos puros a 25°C	91
Tabela 5	_	Resultados para velocidade longitudinal e densidade usando o algoritmo de	
		inversão de dados para líquidos puros	93
Tabela 6	_	Resultados para velocidade longitudinal e densidade usando o algoritmo de	
		inversão de dados para concentrações de etanol em água entre 10 % e 100 %.	93
Tabela 7	_	Resultados do cálculo de concentração de 10 % a 100 % usando o software	
		AlcoDens	94
Tabela 8	_	Resultados para velocidade longitudinal e densidade usando o algoritmo de	
		inversão de dados para concentrações de etanol em água entre 90 % e 100 %.	96
Tabela 9	_	Resultados do cálculo de concentração de 90 % a 100 % usando o software	
		AlcoDens	96
Tabela 10	_	Resultados do cálculo de concentração de 90 % a 100 % considerando a	
		velocidade longitudinal e a densidade	98
Tabela 11	_	Intensidade dos defeitos (em dB), provenientes da Figura 44 e da Figura 45.	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
 AID Algoritmo de inversão de dados
 CSIC Conselho Superior de Investigações Científicas (*Consejo Superior de In-*
- vestigaciones Científicas)
- 2D-FFT Transformada de Fourier bidimensional
- ENDUS Ensaio não-destrutivo por ultrassom
- FEIS Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
- FEM Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*)
- IFETI Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información
- NDT Teste não destrutivo (Non Destructive Test)
- QSCH Modo quase Scholte
- TF1, TF2 Transformada de Fourier temporal e espacial, respectivamente, da 2D-FFT
- SNR Relação sinal-ruído (Signal-to-noise ratio)
- UALB Grupo de Ultrassom para Análise de Líquidos e Bioengenharia Madrid/ES
- UNESP Universidade Estadual Paulista
- USP Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B, C, D	amplitudes de onda no sólido
E, F, G, H	amplitudes de onda no fluido
An, Sn	modos antissimétricos e simétricos, respectivamente, sendo $n = 0, 1, 2,$ a ordem dos modos
C _{ij}	constante elástica de rigidez do material
C_{ls}, C_{ts}	velocidades de ondas volumétricas longitudinal e transversal para o sólido, respectivamente.
C _{lf}	velocidade longitudinal da onda no fluido
d	semi-espessura da placa
δ_{ij}	delta de Kronecker
η, ζ	coeficientes de viscosidade de cisalhamento e volumétrico, respectivamente.
f	frequência da onda elástica.
<i>f</i> .2 <i>d</i>	produto frequência e espessura.
ϕ_s, ϕ_f	potencial escalar referente ao sólido e ao fluido, respectivamente
h	espessura da camada do fluido
k	número de onda complexo, em rad/m
k_{ls}, k_{ts}	número de onda longitudinal e transversal, respectivamente, referente ao sólido.
$k_{ m fluido}$	número de onda volumétrico do fluido.
k_{lf}, k_{ts}	número de onda longitudinal e transversal, respectivamente, referente ao fluido.
L(0,2)	segundo modo de compressão
λ, μ	constantes de Lamé
LiNbO ₃	niobato de lítio
γ_1, γ_2	ondas longitudinal e transversal que representam o fluido.

ω	frequência angular ou circular, em rad/s
p_f	pressão no fluido
Ψ_s, Ψ_f	potencial vetor referente ao sólido e ao fluido, respectivamente
<i>q</i> , <i>s</i>	ondas longitudinal e transversal que representam o sólido
$ ho_s, ho_f$	densidade volumétrica de massa do sólido e do fluido, respectivamente.
S	dilatação
SiO_2	quartzo
$T_{ij}, T_{ij}^{'}$	tensor (<i>stress</i>) na direção i sobre a face que tem normal em j para o sólido e fluido, respectivamente
$T_{ij}^{''}$	tensor (stress) viscosidade.
$ heta_c$	ângulo de incidência crítico
θ_I	ângulo de incidência
$ heta_T$	ângulo de transmissão
v_i, v_j	componente velocidade na direção <i>i</i> e <i>j</i>
v , v ′	vetor velocidade de partículas no sólido e no fluido, respectivamente.
c_p, c_g	velocidades de fase e grupo, respectivamente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Motivação e Justificativa	25
1.2	Revisão Bibliográfica	29
1.3	Objetivos	34
1.3.1	Objetivo geral	34
1.3.2	Objetivos específicos	34
1.4	Organização do texto	35
2	ANÁLISE TEÓRICA DAS ONDAS GUIADAS EM PLACAS IMER-	
	SAS EM FLUIDO	37
2.1	Propagação de Ondas Acústicas em Placas	37
2.2	Modelagem do Fluido Viscoso	40
2.3	Condições de Contorno	43
2.3.1	Modos Simétricos	45
2.3.2	Modos Antissimétricos	46
2.3.3	Curvas de Dispersão	47
2.4	Ondas de Lamb	49
2.5	A onda de Scholte	54
2.5.1	O modo quase Scholte	55
2.5.2	Propriedades do modo quase Scholte	56
2.6	Comentários	59
3	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA ANÁLISE DE	
	ONDAS EM PLACAS	61
3.1	Técnicas Numéricas por Elementos Finitos	61
3.1.1	Simulação de Ondas de Lamb Usando o PZFlex	63
3.1.2	O Método 2D-FFT	64
3.1.3	Placa Imersa em Água	65
3.2		67
	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	07
3.2.1	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	67
3.2.1 3.2.2	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	67 68
3.2.13.2.23.3	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	67 68 70
 3.2.1 3.2.2 3.3 3.3.1 	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	67 68 70 71
 3.2.1 3.2.2 3.3 3.3.1 3.3.1.1 	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	67 68 70 71 74
 3.2.1 3.2.2 3.3 3.3.1 3.3.1.1 3.4 	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	67 68 70 71 74 75
 3.2.1 3.2.2 3.3 3.3.1 3.3.1.1 3.4 4 	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	67 68 70 71 74 75 77
 3.2.1 3.2.2 3.3 3.3.1 3.3.1.1 3.4 4 4.1 	Técnicas Numéricas por Diferenças Finitas	67 68 70 71 74 75 77 77

O Algoritmo de Inversão de Dados
Análise teórica de erro
O Modo Quase Scholte na Caracterização de Líquidos
Resultados
Aplicação do Algoritmo de Inversão de Dados
Comentários
DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS IMERSAS
Sistema Experimental para Detecção de Defeitos em Placas Imersas 101
Aplicação de Bandas de Baixa Atenuação de Ondas de Lamb para Detecção
de Defeitos
Resultados das curvas de dispersão das ondas de Lamb
Resultados de ondas de Lamb para detecção de defeitos
Comentários
COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÃO
Propostas para trabalhos futuros
Publicações
REFERÊNCIAS

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Diariamente, grandes quantidades e tipos de líquidos são produzidos pelas indústrias de alimentos, bebidas, petroquímicas, farmacêuticas, entre outras. Um fator relevante durante os processos industriais e monitoramento destes líquidos é o controle de processo e a qualidade do material.

A aplicação de métodos de caracterização de líquidos tem demonstrado grande potencial em diversos setores produtivos e de pesquisa. Para cada tipo de propósito pode-se medir propriedades, tais como a densidade, a viscosidade e, até mesmo, as propriedades químicas, termodinâmicas, acústicas, ópticas e elétricas, que direta ou indiretamente podem ser utilizadas para caracterizar um líquido (MARTIN; WENZEL; WHITE, 1989).

Em particular, o uso de ondas acústicas como ferramenta para caracterizar materiais deve-se a diversas características favoráveis, como: não destrutiva, não invasiva, relativamente barata e não produz radiação ionizante. Além disso, estes tipos de ondas podem se propagar em diversos tipos de materiais (sólidos, líquidos, gasosos).

O estudo da interação de ondas elásticas propagando-se em sólidos com o fluido, no qual estão imersos, tem sido reconhecido como um meio viável para a obtenção de características desse fluido. Isto, porque o campo acústico refletido a partir de uma interface sólido-líquido tem uma riqueza de informações que, se explorada, pode ser utilizada para inferir sobre propriedades dos líquidos (LEE; CHENG, 2001).

Os métodos de caracterização de líquidos por ultrassom envolvem a utilização de ondas volumétricas, do tipo longitudinal ou de cisalhamento, ou ondas guiadas (ROSE, 1999). As ondas que se propagam em um sólido de espessura finita, como por exemplo uma placa, são constituídas a partir de ondas parciais, longitudinal e transversal (ou cisalhamento). Este par de ondas se propagam de forma independente no meio podendo sofrer reflexões e refrações devido as descontinuidades nas interfaces, e assim, gerarem outras ondas parciais longitudinais e transversais. Esta é a razão pelo qual são chamadas de ondas guiadas, pois propagam como se fossem guiadas pelos limites da placa.

Em uma placa de espessura finita as ondas acústicas são conhecidas como ondas de Lamb, as quais podem ser aplicadas em sensoriamento devido à sua alta sensibilidade às condições de contorno. Estas ondas se propagam com comprimento de onda da mesma ordem de grandeza que a espessura da placa e têm sido estudadas objetivando-se aplicações na área de inspeção não destrutiva por ultrassom, especialmente nas últimas duas décadas, devido às suas capacidades de se propagar a longas distâncias com baixa atenuação quando imersas em

ar (ZHU; WU, 1995; CAWLEY; ALLEYNE, 1996; LOWE; ALLEYNE; CAWLEY, 1998).

As ondas de Lamb formam uma família de modos de propagação cujo minucioso conhecimento se torna um ponto importante em todas as aplicações. Estes modos são apresentados por meio das curvas de dispersão, as quais trazem informações sobre a velocidade de fase ou de grupo em função de um parâmetro dado pelo produto entre a frequência de operação e a espessura da placa. Essas curvas de dispersão podem ser calculadas numericamente (ROSE, 1999), ou obtidas a partir de medidas experimentais, e, posteriormente, utilizam-se técnicas de análise de sinais tempo-frequência (NIETHAMMER et al., 2001; CAWLEY; ALLEYNE, 1996).

Um transdutor piezoelétrico quando em modo de emissão pode gerar diversos modos de propagação em uma placa, dependendo, principalmente, da sua geometria, das dimensões e propriedades da placa, e da frequência de operação (YU; GIURGIUTIU, 2009). A presença de mais de um modo de propagação pode trazer mais informações sobre o meio circunvizinho à placa, mas por outro lado dificulta a análise dos sinais, pois cada modo propaga-se com uma velocidade diferente, e apresenta diferentes características de dispersão. Por esse motivo, é pre-ferível a utilização de um único modo de propagação em particular. Em geral são escolhidos os modos fundamentais, simétrico (S0) ou o antissimétrico (A0), em regiões com baixa dispersão. Isto significa, em geral, operar em valores reduzidos do produto espessura da placa-frequência de operação.

Os transdutores piezoelétricos podem ser posicionados ao longo do guia de ondas, e, devem detectar qualquer variação na velocidade de propagação e na amplitude da onda guiada devido aos efeitos de inércia e viscosidade do líquido (ZHU; WU, 1995). No guia de ondas atuando como sensor, o transdutor pode ser fixado longe da área de teste, não havendo a necessidade de estar em contato com a amostra. Logo, pode ser aplicado em ambientes de risco como, por exemplo, com líquidos corrosivos e/ou em altas temperaturas.

Conhecendo-se as características de propagação do modo guiado, tais como a velocidade de fase e a atenuação, é possível relacionar a atenuação mensurada à propriedade do meio circunvizinho, como, por exemplo, a viscosidade do líquido (CEGLA, 2006). Há também o fato de que, quando uma porção longitudinal de um guia de onda na forma de haste é colocado em contato com o meio sob investigação, a onda guiada é espalhada no ponto de entrada no líquido devido à mudança na impedância de superfície. Desde que a magnitude da onda guiada refletida depende das propriedades do meio que o envolve, pode-se usá-lo, em princípio, para a caracterização de materiais.

Em sensores com guias de ondas planos, o estudo de ondas de interface tem atraído interesse na comunidade científica devido à sua importância e complexidade ao se propagarem nos diferentes tipos de interface. Por esta razão, uma variedade de ondas de interface tem sido discutida na literatura, com aplicações tanto em medições de propriedades de líquidos quanto na interpretação sismológica (ROSE, 1999; FAVRETTO-ANRÈS; RABAU, 1997; LINDNER, 2008).

Em sistemas sólido-líquido as ondas de interface presentes são as ondas de Scholte, as quais se propagam em estruturas compostas por um semi-espaço sólido em contato com um semi-espaço líquido. A onda de interface irá propagar energia ao longo do caminho descrito pela interface. A energia da onda de Scholte é distribuída sobre os dois materiais, o sólido e o líquido, dependendo das propriedades dos materiais dos dois semi-espaços (ROSE, 1999).

Na prática, é difícil encontrar um semi-espaço semi-infinito; uma peça muito espessa de material sólido teria que ser usada, o que seria inconveniente de se manipular. Portanto, introduz-se um limite no sistema, ou seja, uma placa de espessura finita é imersa num espaço infinito (largo, na prática) de líquido. Neste novo sistema placa-líquido existe um modo que é muito similar à onda de Scholte. Este é denominado de modo quase Scholte (QSCH), porque aproxima-se assintoticamente da velocidade da onda de Scholte em altas frequências (CEGLA; CAWLEY; LOWE, 2005).

O modo quase Scholte é uma onda transversal e, assim, exibe principalmente deslocamento *out-of-plane* na placa. Este modo de onda pode ser modelado para líquidos ideais ou viscosos usando a técnica de ondas parciais com a aplicação de condições de contorno apropriadas, como descrito por Rose (1999), o que resulta numa relação entre número de onda e frequência, ou equação de dispersão, que define o modo.

O modo quase Scholte é tratado como uma onda guiada "*nonleaky*", ou seja, a energia da onda no fluido está confinada na região próxima à superfície da placa. Qualquer atenuação será devido à dissipação de energia no fluido viscoso em vez de fuga de energia ou radiação modal para longe da placa. Isto constitui uma alternativa atraente para se determinar a velocidade volumétrica longitudinal e a atenuação do fluido prático.

A acurácia da caracterização de propriedades de um componente permite o controle eficiente de qualidade e maximiza o uso dos recursos. Uma aplicação prática de uso de ondas acústicas seria na identificação de possível adulteração de etanol (álcool etílico hidratado), por meio de medições de atenuação e alteração de velocidade de propagação das ondas acústicas.

No cenário brasileiro o uso do etanol (álcool etílico hidratado) tem sido crescente devido à expansão da tecnologia para combustíveis alternativos (*flex-fuel*) em veículos automotivos. No entanto, a presença de quantidades de água acima de um certo limite provoca alteração nas propriedades físicas e químicas do combustível. Como resultado há o aumento de consumo de combustível, perda de eficiência e danos nos motores dos veículos (FIGUEIREDO et al., 2012).

O etanol possui a vantagem de ser produzido através de fontes renováveis de energia (cana de açúcar, milho, beterraba), o que proporciona menor agressão ao meio ambiente no que se refere à emissão de poluentes. No entanto, possui propriedades que o torna facilmente miscível à água, podendo, até mesmo, absorvê-la do ar atmosférico, o que facilita a sua adulteração (FIGUEIREDO et al., 2012; BRASIL, 2008).

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) estabelece que

a quantidade de água permitida no combustível etanol não deve ultrapassar 4,9% em volume (v/v) ou 7,4 % em massa (m/m) (BRASIL, 2011). No entanto, o monitoramento de presença de água no etanol ainda é considerado crítico, pois o custo do produto e seu propósito dependem do grau de pureza do etanol.

No Brasil, o Karl Fisher é um método padrão muito utilizado para a verificação de teor de água no etanol. Esta técnica requer um preparo da amostra o que dificulta a análise em tempo real, pois é necessário que se faça o tratamento químico da mistura, e, consequentemente, exige mão de obra especializada (BUENO; PAIXÃO, 2011).

Em meio às dificuldades impostas por esta metodologia padrão, procurou-se, neste trabalho, utilizar o ultrassom para o desenvolvimento de um sensor versátil e de configuração simples para a caracterização e monitoramento do etanol combustível. Para se explorar a característica multimodal das ondas guiadas, escolheu-se trabalhar com o guia de ondas, pois, conforme mencionado anteriormente, existem modos de propagação que são sensíveis às propriedades do fluido. Assim, procurou-se elaborar um sensor guia de ondas que, no futuro, possa ser utilizado fora do laboratório, sem a necessidade de processos químicos e grande quantidade de amostra, o que facilita na estabilização e controle da temperatura.

A utilização de um sensor guia de ondas é uma alternativa ao método de ondas volumétricas, e, conforme será discutido na próxima seção, apresenta algumas vantagens que merecem ser destacadas: não requer o perfeito alinhamento entre os transdutores quando em modo emissão-recepção, não depende da geometria do recipiente da amostra, logo, possui a facilidade de ser inserido em qualquer recipiente para a aferição das propriedades, fácil de ser limpo durante ou depois do seu uso e pode ser aplicado em corrosivos sem que seja danificado.

É neste contexto que se propõe o desenvolvimento desta pesquisa, investigando-se, através de modelos analíticos ou simulações numéricas, a natureza dos modos de propagação nos diversos materiais e dos transdutores a serem usados para a geração da onda guiada, dandose subsídios para a realização das montagens experimentais e interpretação dos resultados. Pretende-se, ainda, realizar a otimização de um método analítico adequado para modelamento de ondas ultrassônicas com aplicação na determinação de características de líquidos.

Como parte de aplicação usando ondas guiadas, também são abordadas as bandas de frequência de baixa atenuação dos modos de Lamb quando a placa está imersa em fluido. Essa característica constitui uma vantagem para a detecção de defeitos através de técnica de imagem em placas submersas, uma vez que é selecionado o modo de propagação nas frequências de baixa atenuação.

Este trabalho de pesquisa de doutorado está relacionado ao projeto de cooperação internacional CNPq/MICINN (Espanha) número 560825/2010-2, envolvendo a UNESP – Campus de Ilha Solteira e o grupo de Ultrassom para Análise de Líquidos e Bioengenharia (UALB) do Departamento de Acústica y Evaluación No Destructiva, Instituto de Tecnologías Físicas y de

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A arte de inspecionar sem destruir evoluiu, principalmente a partir da década de 50, de simples curiosidade de laboratório até se tornar uma ferramenta indispensável na produção industrial. Nestas aplicações, as técnicas de ensaios não-destrutivos por ultrassom (ENDUS) são geralmente preferidas ou até mesmo necessárias, pois tratam-se de técnicas bem estabelecidas teoricamente e efetivas nas aplicações (LUANGVILAI, 2007).

O método de onda ultrassônica é muito versátil devido a disponibilidade de vários tipos de ondas acústicas, tais como ondas volumétricas, de superfície, de interface, ondas guiadas com ressonância transversal, permitindo-se uma variedade de aplicações. Citam-se algumas delas como exemplo: a avaliação da qualidade e detecção de variações de características em estruturas, pequenas falhas superficiais, presença de trincas e outros defeitos físicos (CAWLEY; ALLEYNE, 1996; GHOSH; KUNDU; KARPUR, 1998; MAŽEIKA et al., 2006), e até mesmo mensurar propriedades de materiais e revestimentos como os fluidos (CHIMENTI, 1997; NAY-FEH; NAGY, 1997; WU; ZHU, 1996).

As ondas de Rayleigh se referem aos distúrbios na interface sólido-líquido, considerando o sólido como um meio elástico homogêneo e isotrópico. Viktorov et al [1963 apud (WU; ZHU, 1992)] estudou estas ondas em estruturas do tipo placa revestida ou imersa em líquido nos seguintes casos: um sólido semi-infinito com uma camada finita de líquido homogêneo; e um sólido do mesmo tipo com uma camada de líquido de espessura semi-infinita e plana.

A diferença fundamental entre ondas de Rayleigh sobre uma superfície livre e a onda de Lamb numa placa é que, no último caso, existe uma escala de comprimento finito, a espessura da placa. Quando as partes superior e inferior de uma placa de espessura finita está em contato com uma camada de fluido viscoso, uma certa quantidade de energia das ondas de Lamb é acoplada no fluido ocorrendo atenuação da onda. Neste caso, este tipo de distúrbio é chamado de ondas de Lamb de fuga, do termo inglês *leaky Lamb waves*, o qual também é amplamente utilizado em análise não destrutiva e caracterização de líquidos (DAYAL; KINRA, 1989).

Em relação à inspeção em estruturas, Chen, Su e Cheng (2010) usaram o modo A0 para analisar a corrosão em placas submersas. Por meio de dois transdutores operando no modo emissão-recepção, verificou-se que as camadas de líquido e as mudanças de propriedade na placa exerciam siginificativa influência na propagação do modo A0 pela estrutura. Rizzo, Han e Ni (2010) usaram um sistema híbrido composto de laser e transdutores de ultrassom para a detecção de defeitos em placas submersas. O laser excitava os modos A0, S0 e quase Scholte e dois transdutores de imersão foram dispostos para a recepção do sinal.

Chimenti e Martin (1991) apresentaram uma análise de placas de fibra de carbono imersas usando as ondas de Lamb de fuga para a inspeção da estrutura. A detecção de defeitos foi realizada por meio de dois transdutores de imersão e pelo método C-scan para a geração de imagem. Em relação à estrutura tipo tubo, Djili et al. (2013) analisaram tubos de cobre imersos usando o método pulso-eco. Neste caso, escolheu-se trabalhar com o segundo modo de compressão L(0,2), o qual tem se mostrado mais eficiente na detecção de defeitos, pois apresenta pouca fuga de energia para o meio fluido.

No que se refere a caracterização de fluidos, grande parte das aplicações implicam em mensurar propriedades acústicas, como a velocidade de propagação e a atenuação, em função da frequência. Estas particularidades estão relacionadas às propriedades viscoelásticas do material e, para obtê-las, dispõe-se na literatura de diversas técnicas. A escolha do método depende do tipo de material a ser testado e dos requisitos da aplicação, podendo ser utilizadas na elaboração e construção de dispositivos (sensores) que usam ondas acústicas para a caracterização de materiais (CHEN et al., 2006).

A determinação de propriedades de um material por ultrassom pode ser realizada por meio de ondas volumétricas ou guiadas. Em células de medição, em que são utilizadas ondas volumétricas, a amostra para teste é introduzida numa cavidade, na qual métodos por ultrassom são usados para se mensurar velocidade acústica, atenuação e/ou impedância mecânica. As medições podem ser baseadas em métodos pulsados, o qual constitui de duas configurações: emissão-recepção e pulso-eco. Estas técnicas consistem em se mensurar o tempo de trânsito e a amplitude do pulso ultrassônico que se propaga pelo meio, através dos quais pode-se obter a velocidade de propagação e a atenuação.

Embora não possuem restrições quanto à geometria e tamanho do meio para ser aplicado, algumas particularidades podem influenciar nas medições. Um exemplo está no método de emissão-recepção, em que uma cavidade separa o transdutor emissor e o receptor, dispostos um de frente para o outro, e que utiliza sinais de eco para se mensurar as velocidade de propagação e atenuação, as quais são relacionadas com as características do material sob teste. Neste método, a manufatura da célula de medição requer o perfeito alinhamento entre os transdutores para se obter precisão nos resultados (POVEY, 1997; DEBLOCK; CAMPISTRON; NONGAILLARD, 2005).

No método por ultrasom baseado em ondas contínuas, o tempo de trânsito da onda ultrassônica pelo meio é menor que a duração do sinal de excitação, ocorrem interferências devido às reflexões e transmissões nas interfaces do material. Estas interferências fornecem uma resposta dependente da frequência do sistema, por isso, esta técnica de medição é denominada método de ressonância, em que a frequência de ressonância e a largura de banda são os parâmetros analisados. Os dispositivos de medição por ressonância consistem em materiais piezoelétricos com baixa perda mecânica, como o quartzo (SiO₂) e o niobato de lítio (LiNbO₃). Embora este sistema permite trabalhar como pequena quantidade de amostra e possui acurá-

cia para a caracterização de materiais, os resultados podem ser afetados pela geometria dos elementos ressonantes.

Os sensores em guia de ondas não apresentam particularidades como as que foram apresentadas para as técnicas de ondas volumétricas. Estes dispositivos sensores baseados em ondas guiadas podem ser compostos por placas, membranas (nitreto de silício, óxido zinco) ou metal (alumínio, aço), hastes e tubos. No que se refere a sensoriamento com ondas guiadas, existem diversas técnicas e métodos com aplicação em caracterização de líquidos (WHITE; WENZEL, 1988; WILKIE-CHANCELLIER et al., 2009).

A interação de ondas elásticas em estruturas do tipo placa ou tubo recobertos com fluido tem sido amplamente estudada nas últimas duas décadas. A grande motivação para isto veio da observação de que importantes informações sobre o sólido poderiam ser obtidas a partir do sinal oriundo de uma reflexão do feixe de um transdutor na interface sólido-fluido (NAYFEH, 1995).

A maioria das publicações adota a hipótese de fluido ideal e, portanto, não se leva em conta o aumento das atenuações das ondas de fuga devido a presença de líquido viscoso (WU; ZHU, 1992). O efeito de um fluido ideal (sem viscosidade) na propagação das ondas de Lamb foi primeiramente investigado por Schoch (1952 apud WU; ZHU, 1992), o qual verificou que, quando um sólido isotrópico de espessura finita é revestido com camadas espessas de líquido em ambos os lados, parte da energia da onda de Lamb na placa é acoplada no líquido, porém, a maior parte da energia ainda permanece no sólido.

No caso de guia de ondas cilíndrico, cita-se, como exemplo, o método de determinação das propriedades de cisalhamento do líquido descrito por Vogt (2002), o qual usou uma onda torcional em uma haste imersa em um fluido viscoso. Pela análise da atenuação da onda foram determinadas a fuga por cisalhamento e as propriedades do fluido. Relacionando a fuga de energia com as propriedades do material do guia de onda e do meio em que está coberto, observou-se que uma pequena diferença de impedância acústica dos materiais ocasiona uma grande atenuação. Isto ocorre devido ao grande valor do coeficiente de transmissão das ondas volumétricas parciais através da interface. Por outro lado, uma grande diferença de impedância acústica proporciona uma pequena atenuação.

O uso de uma onda torcional em uma haste é fisicamente análogo ao uso da onda SH (*shear horizontal*) em uma placa. Esta onda constituiu outra forma de propagação em placa podendo também ser usada para se mensurar atenuações e propriedades do fluido. Baseando-se no modo guiado SH_0 , Kazys et al. (2013) desenvolveram um sensor em guia de onda plano de material alumínio para se mensurar a viscosidade de líquidos altamente viscosos.

Qi (1994) também estudou a influência do fluido viscoso, porém, na propagação de ondas de Rayleigh de fuga na presença de efeitos de condução de calor. O autor não considera importante a viscosidade no fluido como um todo, exceto em uma fina camada viscosa próxima

da interface. Mostra ainda que, juntamente com a radiação, a viscosidade e a condução de calor na camada de contorno também afetam a atenuação das ondas de Rayleigh de fuga, ou seja, a velocidade destas ondas são menores se comparadas com as ondas de Rayleigh em placa onde o meio externo é o vácuo.

White e Wenzel (1988) usaram a propagação das ondas de Lamb em membranas de nitreto de silício, as quais foram carregadas com água de-ionizada e metanol. A massa do fluido em contato com a placa altera a velocidade de fase e pode-se mensurar a atenuação devido a viscosidade. O efeito do fluido no sistema fez com que os autores sugerissem o uso do dispositivo como um sensor de densidade.

Já Chen et al. (2006) utilizaram transdutores interdigitais na excitação de ondas de Lamb em uma placa piezolétrica com camadas de líquido. Neste tipo de sensor as propriedades mecânicas e elétricas do fluido em contato permitem realizar o sensoriamento de fluido. Os autores usaram o conceito de permissividade efetiva para mensurar a densidade e a constante dielétrica do líquido.

Com a intenção de se mensurar a viscosidade, Wilkie-Chancellier et al. (2009) propuseram um sensor composto de uma placa de aço inox em contato com fluido viscoso, em que usaram um método de reflexão das ondas de Lamb. Com isso, investigações sobre a influência do fluido na propagação dos modos foram realizadas e relacionadas com a impedância mecânica e viscosidade.

Deve ser lembrado que, dentre os modos de Lamb, há o modo antissimétrico fundamental (A0), o qual também é chamado de onda flexural ou de flexão. Kurtze e Bolt [1959 apud (WU; ZHU, 1995)] derivaram a equação de dispersão para este tipo de onda quando a placa está em contato com fluido não viscoso baseando-se no conceito de impedância acústica.

Ondas flexurais têm demonstrado maior sensibilidade na medição de grandezas e possibilitam trabalhar em baixas frequências (WENZEL; WHITE, 1989; WU; ZHU, 1996). Por conveniência, os dispositivos baseados em ondas de Lamb normalmente são projetados para trabalhar em baixos valores de frequência-espessura da placa, o que possibilita usar o modo A0, com velocidade de fase menor que a velocidade do som no fluido. Isso torna-se interessante, pois a perda por radiação do modo A0 pode ser minimizada (WATKINS et al., 1982; ZHU et al., 1995).

A propagação de ondas acústicas de superfície ao longo de interfaces sólido-fluido, depende do tipo de fluido em contato com o sólido. A vantagem de se usar ondas de superfície do tipo flexural se deve à interação entre a amplitude e a polarização de vibração do deslocamento de partículas da onda na interface. Os modos flexurais de superfície, os quais podem apresentar deslocamento de partículas *out-of-plane* ou *in-plane*, são considerados mais sensíveis às propriedades do fluido (WU; ZHU, 1996; LINDNER, 2008; SIMONETTI; CAWLEY, 2004).

Embora as ondas de superfície tenham sido amplamente empregadas em sismologia, há
algumas décadas têm se tornado ferramentas úteis para se obter as propriedades do fluido e para testes não-destrutivos. O contato com o meio fluido provoca uma diminuição na velocidade de propagação e da amplitude da onda devido a perda de energia para as ondas de compressão no fluido. Com as apropriadas condições de contorno, Scholte, em 1941, encontrou um outro tipo de solução para as equações dinâmicas considerada uma particularidade das ondas de Stoneley, as quais se propagam entre semi-espaços sólidos. Denominada onda de Stoneley-Scholte ou Pseudo-Stoneley, também é referida por alguns autores simplesmente por onda de Scholte entre meios semi-infinitos (ROSE, 1999).

Ao considerar a propagação destas ondas em um meio limitado, de espessura determinada, passam a ser chamadas de modo quase Scholte e que apresentam sensibilidade às características dos meios em que propaga (CEGLA; CAWLEY; LOWE, 2005). Tal descoberta se deve a Schoch que em 1952, durante uma investigação dos efeitos do líquido na propagação das ondas de Lamb, observou que as equações de dispersão também apresentam uma solução de onda de interface, cuja velocidade é relativamente menor que a velocidade do som no líquido, sendo chamada simplesmente de onda de Scholte em placa (WU; ZHU, 1992).

Billy e Quentin (1983) investigaram as influências nas propriedades do modo quase Scholte quanto ao ângulo de imersão da placa. O modo quase Scholte foi excitado através de um transdutor acoplado a prismas, e, determinados ângulos de inclinação da placa foram testados, evidenciando uma grande influencia na amplitude, somado aos efeitos de atenuação.

Num trabalho mais qualitativo, Favretto-Anrès e Rabau (1997) verificaram, experimentalmente, que a energia do modo quase Scholte diminui com a distância a partir da interface e ao longo da propagação. Para a excitação deste modo usaram um transdutor *shear* e um prisma sólido acoplado em uma placa viscoelástica imersa em água.

Cegla, Cawley e Lowe (2005) estudaram a propagação do modo quase Scholte e testaram a sua viabilidade para se mensurar velocidade e atenuação da onda quando a placa está imersa em fluido viscoso. O sensor utilizado consiste basicamente de um transdutor *shear* acoplado em uma placa de alumínio. O modo flexural que se propaga é sensível às propriedades volumétricas do fluido, devido à grande quantidade de energia no líquido, e contém informações sobre o fluido.

Embora Cegla, Cawley e Lowe (2005) já tenham usado um sensor em guia de onda com o modo quase Scholte, percebe-se que ainda não se explorou todo o seu potencial para a caracterização de fluidos. Em seus trabalhos, os autores usaram um sensor de geometria relativamente grande (placa com dimensões 150 mm x 100 mm) sendo necessário grande volume de amostra. Destaca-se, também, que foram mensuradas apenas a velocidade longitudinal e a atenuação no fluido, não havendo nenhuma correlação com densidade e concentração das amostras.

Neste trabalho, também serão abordados os aspectos teóricos, os de construção de sensores e investigada a aplicação do modo QSCH para a caracterização de líquidos. Além disso, diante dos resultados que serão relatados nos próximos capítulos, desenvolveu-se um método que forneça simultaneamente várias propriedades do fluido, como concetração, velocidade longitudinal e densidade, a partir apenas da velocidade de fase mensurada experimentalmente. Este método, denominado algoritmo de inversão de dados, se estende além do desenvolvimento do trabalho inicial de Cegla, Cawley e Lowe (2005), já que os mesmos calcularam apenas a velocidade volumétrica e a atenuação de fluidos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Esta pesquisa teve por objetivo o desenvolvimento de um sensor para a caracterização de líquidos utilizando guia de ondas do tipo placa. Elaborou-se, também, o algoritmo de inversão de dados para a determinação de propriedades do líquido, como a densidade e velocidade longitudinal, a partir dos quais pôde-se obter a concentração de misturas de etanol e água.

Para isso, foram explorados aspectos de construção de um sensor para determinação de propriedades do líquido, bem como uma investigação sobre as dimensões de placa e volume de amostras de líquido para uma análise precisa. Além disso, técnicas de processamento de sinais foram aplicadas para análise da correlação entre os parâmetros das ondas guiadas e as características do líquido.

1.3.2 Objetivos específicos

- Modelagem teórica da propagação de ondas guiadas em sistemas com camadas do tipo sólido-fluido.
- Implementação de técnicas numéricas para a obtenção de curvas de dispersão de velocidade de fase, de grupo e atenuação das ondas guiadas, e, para o pós-processamento de dados experimentias.
- Desenvolvimento de dispositivos de medição baseando-se em técnicas experimentais para a investigação de bandas de baixa atenuação dos modos guiados, e, para a caracterização de líquidos.
- Análise dos resultados do algoritmo de inversão de dados para se conhecer a sua sensibilidade e posterior correlação entre densidade e velocidade longitudinal com a concentração da amostra.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este texto é dividido em cinco capítulos, incluindo esta Introdução. No capítulo 2 abordam-se os conceitos fundamentais de propagação de ondas guiadas em sólidos imersos em fluido. O fluido é modelado através da equação de Navier-Stokes, e, aplicando as condições de contorno são desenvolvidas as equações de dispersão para o sistema placa imersa, e que também podem ser utilizadas para placa recoberta por fluido viscoso. Ainda sob o ponto de vista teórico, é realizado um estudo da onda de interface ou onda de Scholte. Apresentam-se as relações para o levantamento da característica de dispersão para este modo de propagação e faz-se, também, uma análise detalhada do comportamento dos perfis dos modos A0 e Scholte, na região da placa e do fluido.

No capítulo 3 são abordadas técnicas numéricas e experimentais para o desenvolvimento do dispositivo para se mensurar ondas de Lamb em placas submersas. Simulações são realizadas com o intuito de se verificar a viabilidade e os efeitos ocasionados pela geometria e faixa de frequência escolhida. A análise por elementos finitos é realizada usando o software *PZFlex*, fazendo-se o modelamento do transdutor e da placa de alumínio imersa em água para a propagação das ondas de Lamb. Realiza-se também o modelamento da placa parcialmente imersa em água para análise dos modos A0 e quase Scholte.

Para o processamento dos dados utiliza-se a técnica da Transformada de Fourier Bidimensional, obtendo-se as curvas de dispersão. As técnicas experimentais abordadas são as de incidência oblíqua, para a obtenção das curvas de dispersão das ondas de Lamb, e a de pulso-eco, para a elaboração do sensor com aplicação em caracterização de líquido.

O capítulo 4 é dedicado ao sensor para caracterização de líquidos. São abordados aspectos sobre o desenvolvimento do sensor em guia de onda e o processamento de sinais para o cálculo da velocidade de fase do modo quase Scholte. Descreve-se, também, o desenvolvimento do algoritmo de inversão de dados, o qual fornece uma propriedade do fluido a partir da valocidade de fase experimental, e as análises teóricas quanto à sua viabilidade de implementação.

Ainda neste capítulo, para a caracterização de líquidos foram conduzidos experimentos envolvendo ondas de Scholte com misturas de água e etanol. Nesta etapa, os resultados obtidos com o sensor são usados no algoritmo de inversão de dados para se obter propriedades de interesse do fluido, como, por exemplo, a densidade e velocidade longitudinal do fluido.

No capítulo 5, validações experimentais serão apresentadas usando ondas de Lamb. Aspectos como a construção de dispositivos para medições de velocidade de fase e atenuação foram discutidos, objetivando-se operar em regiões de baixa atenuação dos modos de Lamb. Para explorar tais bandas de baixa atenuação, modos de propagação de ordens superiores, e suas respectivas faixas de frequências, foram selecionados para a aplicação em detecção de defeitos em placas submersas por meio de técnicas de imagem. Por fim, no capítulo 6, faz-se algumas considerações finais, bem como uma apresentação de propostas para melhoria do sensor em guia de onda e do algoritmo de inversão de dados destinados à caracterização de líquidos. São apresentados também os trabalhos resultantes das investigações deste doutoramento e que foram apresentados em congressos internacionais.

2 ANÁLISE TEÓRICA DAS ONDAS GUIADAS EM PLACAS IMER-SAS EM FLUIDO

Neste capítulo apresentam-se as equações que regem a elastodinâmica de ondas em placas fazendo o uso do método dos potenciais de deslocamento para se obter as soluções modais e que poderão ser aplicadas na propagação em placa imersa ou com camada de fluido.

Para avaliar o efeito de contato de líquido viscoso na propagação de ondas guiadas, como as de Rayleigh e de Lamb quando sólidos são recobertos por fluido, modelou-se o fluido usando a equação de Navier-Stokes. Para facilitar as análises e discussões subsequentes, primeiramente é feito um estudo das equações de campo para um sólido isotrópico apresentando suas soluções formais, as quais poderão ser utilizadas para o modelamento de fluidos viscosos realizando a identificação de parâmetros.

2.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS EM PLACAS

Ao contrário das ondas eletromagnéticas, que são eminentemente transversais, as ondas elásticas podem apresentar polarização transversal e longitudinal. Os deslocamentos ocorrem tanto na direção de propagação quanto na direção perpendicular ao plano da lâmina. Além disso, em um material sólido do tipo placa, com bordas paralelas, pode se acoplar ondas guiadas que serão abordadas neste trabalho.

Considera-se neste trabalho uma placa com espessura 2d em meio fluido, conforme ilustrado na Figura 1. As camadas superior e inferior de fluido se extendem de z = -d a $-\infty$ e de z = +d a $+\infty$, respectivamente. Uma superposição de ondas planas se propaga no plano xz com estrutura ilimitada ao longo do eixo y. Essas ondas exibem componentes de deslocamento longitudinal na direção x e de cisalhamento (*shear*) na direção z.

Figura 1 – Sistema de coordenadas para o estudo das ondas de Lamb em uma placa isotrópica em meio fluido.



A equação de movimento de Cauchy para o meio sólido isotrópico pode ser expressa

em termos do vetor velocidade de partícula v, de acordo com (AULD, 1990):

$$\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = (c_{11} - c_{44}) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + c_{44} \nabla^2 \mathbf{v}, \tag{1}$$

sendo ρ_s a densidade volumétrica de massa do sólido, enquanto c_{11} e c_{44} são as constantes elásticas de rigidez do sólido. Considera-se nesta análise uma lâmina de material elasticamente isotrópico, o que permite escrever as componentes elásticas de rigidez em termos de coeficientes de Lamé λ e μ , como (KINO, 1987): $c_{11} = \lambda + 2\mu$ e $c_{44} = \mu$. O valor de λ também pode ser obtido a partir de: $c_{13} = c_{11} - 2c_{44} = \lambda$.

O teorema de decomposição de Helmholtz estabelece que qualquer vetor (por exemplo, o vetor velocidade de partículas **v**) pode ser escrito em termos de um potencial vetorial, Ψ_s , e de um potencial escalar, ϕ_s , tal que (KINO, 1987):

$$\mathbf{v}(x,z,t) = \nabla \times \mathbf{\Psi}_{\mathbf{s}} + \nabla \phi_s. \tag{2}$$

Nesta análise, considera-se a propagação de onda guiada ao longo do eixo x e a dependência temporal harmônica, de acordo com $e^{j(kx-\omega t)}$, sendo k o número de onda complexo do modo guiado e ω a frequência angular. Portanto, a partir de (1), tem-se que:

$$\mathbf{v}(x,z,t) = -\frac{1}{\rho_s \omega^2} \left[(c_{11} - c_{44}) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + c_{44} \nabla^2 \mathbf{v} \right].$$
(3)

A partir de (2), $\nabla(\nabla \cdot \mathbf{v})$ and $\nabla^2 \mathbf{v}$ são calculados, os quais são substituídos em (3), resultando nas seguintes equações de onda longitudinal e transversal (KINO, 1987):

$$\nabla^2 \phi_s + k_{ls}^2 \phi_s = 0, \tag{4}$$

$$\nabla^2 \Psi_s + k_{ts}^2 \Psi_s = 0, \tag{5}$$

respectivamente, em que os números de onda k_{ls} e k_{ts} são tais que:

$$k_{ts}^2 = \frac{\omega^2}{c_{ts}^2},\tag{6}$$

$$k_{ls}^2 = \frac{\omega^2}{c_{ls}^2},\tag{7}$$

sendo $c_{ts}^2 = c_{44}/\rho_s e c_{ls}^2 = c_{11}/\rho_s$ as velocidades de ondas volumétricas transversal e longitudinal para o sólido, respectivamente. Conforme discutido antes, a propagação de onda ocorre ao longo da direção x e a placa possui dimensão ilimitada ao longo da direção y. Portanto, devido à simetria do problema, as seguintes condições resultam em: $v_y = 0 e \partial/\partial y = 0$. Consequentemente, para que as componentes de velocidade de partículas satisfaçam (2) é necessário que o potencial vetor Ψ_s exiba somente componente na direção y. Como o material é não homogêneo na direção z, escreve-se que:

$$\phi_s = Q_s(z)e^{j(kx-\omega t)},\tag{8}$$

41

e

$$\Psi_s = S_s(z)e^{j(kx-\omega t)}\hat{y} \tag{9}$$

Com isso, assumindo a hipótese de que só existe descontinuidade de meios na direção z e que $\partial^2/\partial x^2 = (jk)^2 = -k^2$, e, substituindo (8) e (9) em (4) e (5), respectivamente, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 Q_s(z)}{\partial z^2} - \left(k^2 - k_{ls}^2\right) Q_s(z) = 0,$$
(10)

$$\frac{\partial^2 S_s(z)}{\partial z^2} - \left(k^2 - k_{ts}^2\right) S_s(z) = 0, \tag{11}$$

sendo $k_{ls}^2 = \omega^2 / c_{ls}^2 = \omega^2 \rho_s / c_{11}$ e $k_{ts}^2 = \omega^2 / c_{ts}^2 = \omega^2 \rho_s / c_{44}$. Rearranjando os termos que multiplicam as amplitudes dos potenciais Q_s e S_s em (10) em novas variáveis, tem-se que:

$$q^2 = k^2 - k_{ls}^2, (12)$$

$$s^2 = k^2 - k_{ts}^2,\tag{13}$$

Logo, tem-se que (10) e (11) podem ser reescritas como:

$$\frac{\partial^2 Q_s(z)}{\partial z^2} - q^2 Q_s(z) = 0, \tag{14}$$

$$\frac{\partial^2 S_s(z)}{\partial z^2} - s^2 S_s(z) = 0, \tag{15}$$

Conhecendo-se os potenciais escalar e vetorial, pode-se determinar as componentes de velocidade das partículas e de tensor *stress* (tensão mecânica). Assim, a partir de (2), (8) e (9), obtem-se que:

$$v_x(x,z,t) = \left[jkQ_s(z) - \frac{\partial S_s(z)}{\partial z}\right]e^{j(kx-\omega t),}$$
(16)

$$v_z(x,z,t) = \left[\frac{\partial Q_s(z)}{\partial z} + jkS_s(z)\right] e^{j(kx-\omega t)}.$$
(17)

Por sua vez, as expressões das componentes *stress* para sólidos isotrópicos são obtidas através da lei de Hooke, e, são bem conhecidas da literatura (KINO, 1987). Assim, as componentes T_{zz} e T_{xz} , escritas em termos das componentes de velocidade de partícula, são dadas por:

$$\frac{\partial T_{zz}}{\partial t} = c_{11} \frac{\partial v_z}{\partial z} + c_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x},\tag{18}$$

$$\frac{\partial T_{xz}}{\partial t} = c_{44} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right). \tag{19}$$

A fim de se comparar com outras formulações de propagação de ondas em sólido, sabese que $c_{11} = \lambda + 2\mu$, $c_{13} = \lambda$, $c_{11} - c_{13} = 2c_{44}$ e $c_{44} = \mu$, assim, os tensores *stress* (18) e (19) podem ser escritos como:

$$\frac{\partial T_{zz}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 \phi_s}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial x^2} \right) - 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi_s}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi_s}{\partial z \partial x} \right)$$
(20)

e

$$\frac{\partial T_{xz}}{\partial t} = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial z \partial x} - \frac{\partial^2 \Psi_s}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Psi_s}{\partial x^2} \right). \tag{21}$$

Substituindo (8) e (9), as quais apresentam dependência temporal harmônica $e^{(kx-j\omega t)} \rightarrow \partial/\partial t = j\omega$, nestas equações, pode-se mostrar que:

$$T_{zz} = \frac{j\omega\rho_s}{k_{ts}^2}(k^2 + s^2)Q_s - \frac{2\omega\rho_s k}{k_{ts}^2}\frac{\partial S_s}{\partial z},$$
(22)

$$T_{xz} = -\frac{2\omega\rho_s k}{k_{ts}^2} \frac{\partial Q_s}{\partial z} - \frac{j\omega\rho_s}{k_{ts}^2} (k^2 + s^2) S_s.$$
(23)

2.2 MODELAGEM DO FLUIDO VISCOSO

Na modelagem de um fluido viscoso e compressível torna-se conveniente representar grandezas como a pressão (p_{fluido}) e densidade de massa (ρ_{fluido}) como: $p_{\text{fluido}} = p_f + \delta p_f$ e $\rho_{\text{fluido}} = \rho_f + \delta \rho_f$, sendo $p_f e \rho_f$ as pressão e densidade de equilíbrio (constantes), e, $\delta p_f e \delta \rho_f$ são as correspondentes variações no fluido. Neste trabalho, considera-se $\delta \rho_f \ll \rho_f, \delta p_f \ll p_f$, e, o subscrito f ou o sobrescrito ' referem-se às propriedades do fluido. Com isto, a equação de movimento para o fluido viscoelástico newtoniano pode ser escrita através da equação de Navier-Stokes, conforme estabelecida por Landau e Lifshitz (1966):

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} = -\nabla(\delta p_f) + \eta \nabla^2 \mathbf{v}' + \left(\zeta + \frac{1}{3}\eta\right) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}') - \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v}', \tag{24}$$

sendo $\eta \in \zeta$ os coeficientes de viscosidade de cisalhamento (*shear*) e volumétrico (*bulk*, ou então, segunda viscosidade), respectivamente. No entanto, o termo convectivo $\rho(\mathbf{v}' \cdot \nabla)\mathbf{v}'$ pode ser desprezado para pequenas oscilações e velocidades de partículas, simplificando significativamente (24).

Por sua vez, a variação de pressão no fluido obedece a lei de Hooke para fluido compressível (KINO, 1987):

$$\delta p_f = -\rho_f c_{lf}^2 S,\tag{25}$$

sendo c_{lf} a velocidade de fase (longitudinal) da onda no fluido e *S* é a dilatação, dada por $S = -\delta \rho_f / \rho_f$. Por outro lado, desprezando-se os termos de segunda ordem na equação de continuidade do fluido (LANDAU; LIFSHITZ, 1966), pode-se deduzir que:

$$\frac{\partial(\delta\rho_f)}{\partial t} + \rho_f(\nabla \cdot \mathbf{v}') = 0, \qquad (26)$$

o qual, em conjunto com (25), conduzem à:

$$\frac{\partial(\delta p_f)}{\partial t} = -c_{lf}^2 \rho_f \nabla \cdot \mathbf{v}'.$$
(27)

Assim, derivando-se (24) em relação ao tempo e substituindo-se (27), obtém-se:

$$\rho_f \frac{\partial^2 \mathbf{v}'}{\partial t^2} = c_{lf}^2 \rho_f \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}') + \eta \nabla^2 \left(\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t}\right) + \left(\zeta + \frac{1}{3}\eta\right) \nabla \left(\nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t}\right).$$
(28)

Lembrando que a propagação da onda guiada exibe dependência com x e t conforme $e^{j(kx-\omega t)}$, tem-se que (28) torna-se:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x},\mathbf{z},\mathbf{t})' = -\frac{1}{\rho_f \omega^2} \left[(c_{11}' - c_{44}') \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}') + c_{44}' \nabla^2 \mathbf{v}' \right],$$
(29)

sendo:

$$c'_{11} - c'_{44} = \frac{\rho_f \omega^2}{k_{\text{fluido}}^2} - j\omega \left(\zeta + \frac{1}{3}\eta\right),\tag{30}$$

$$c'_{44} = -j\omega\eta, \tag{31}$$

e $k_{\text{fluido}} = \omega/c_{lf}$ é o número de onda (volumétrico) no fluido.

O procedimento para resolver (29) é análogo à solução de (3) para o sólido, devido as similaridades entre estas equações. Usando o teorema de decomposição de Helmholtz e calculando-se $\nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}')$ e $\nabla^2 \mathbf{v}'$ a partir de (2), os quais são substituídos em (29), resulta nas equações de onda dadas por:

$$\nabla^2 \phi_f + k_{lf}^2 \phi_f = 0, \tag{32}$$

$$\nabla^2 \Psi_f + k_{tf}^2 \Psi_f = 0, \tag{33}$$

sendo:

$$k_{tf}^2 = \frac{j\omega\rho_f}{\eta},\tag{34}$$

$$k_{lf}^{2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{fluido}^{2}} + \frac{1}{j\omega\rho_{f}}\left(\zeta + \frac{4}{3}\eta\right)},$$
(35)

os números de onda tranversal e longitudinal do fluido, respectivamente.

Admitindo-se que ϕ_f e Ψ_f propagam-se de modo similar a (8) e (9), as equações (32) e (33) podem ser escritas como:

$$\frac{\partial^2 Q_f(z)}{\partial z^2} - (k^2 - k_{lf}^2) Q_f(z) = 0,$$
(36)

$$\frac{\partial^2 S_f(z)}{\partial z^2} - (k^2 - k_{tf}^2) S_f(z) = 0,$$
(37)

Definindo os parâmetros γ_1 e γ_2 , associados às ondas longitudinal e transversal que representam o fluido como:

$$\gamma_1^2 = k^2 - k_{lf}^2, \tag{38}$$

$$\gamma_2^2 = k^2 - k_{tf}^2, \tag{39}$$

verifica-se que as equações (36) e (37) podem ser reescritas como:

$$\frac{\partial^2 Q_f(z)}{\partial z^2} - \gamma_1^2 Q_f(z) = 0, \tag{40}$$

$$\frac{\partial^2 S_f(z)}{\partial z^2} - \gamma_2^2 S_f(z) = 0, \tag{41}$$

as quais são similares às equações (14) e (15) que descrevem a propagação de onda no sólido no plano *xz*. Usando a decomposição em ondas parciais para o fluido, $\phi_f \in \Psi_f$ são dados mais especificamente por (NAYFEH; NAGY, 1997):

$$\phi_f = Q_f(z)e^{j(kx-\omega t)} \tag{42}$$

$$\Psi_f = S_f(z)e^{j(kx-\omega t)}\hat{y}.$$
(43)

Usando (42) e (43), e, assumindo que o vetor velocidade v' tenha a mesma forma que (2), tem-se que:

$$v'_{x}(x,z,t) = \left[jkQ_{f}(z) - \frac{\partial S_{f}(z)}{\partial z}\right]e^{j(kx-\omega t)},$$
(44)

$$v'_{z}(x,z,t) = \left[\frac{\partial Q_{f}(z)}{\partial z} + jkS_{f}(z)\right]e^{j(kx-\omega t)}.$$
(45)

O tensor *stress* para um fluido viscoso e compressível é dado por (LANDAU; LIFSHITZ, 1966):

$$T'_{ij} = -p_{\text{fluido}}\delta_{ij} + T''_{ij} \tag{46}$$

sendo *i*, *j* = 1,2,3, *l* = 1,3, δ_{ij} o delta de Kronecker, p_{fluido} a pressão atuante em um ponto da superfície e T''_{ij} o tensor *stress* viscosidade, o qual está relacionado com fricções internas no fluido, dado por:

$$T_{ij}^{''} = \eta \left(\frac{\partial v_i^{'}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j^{'}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_l^{'}}{\partial x_l} \right) + \zeta \delta_{ij} \frac{\partial v_l^{'}}{\partial x_l}, \tag{47}$$

Substituindo (47) em (46), tem-se o tensor *stress* total, como sendo a soma da pressão e do *stress* viscosidade na forma tensorial:

$$T_{ij}^{'} = -p_{\text{fluido}}\delta_{ij} + \left[\eta \left(\frac{\partial v_i^{'}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j^{'}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial v_l^{'}}{\partial x_l}\right) + \zeta\delta_{ij}\frac{\partial v_l^{'}}{\partial x_l}\right],\tag{48}$$

Fazendo-se l = i = j = 3, e, i = 1 e j = 3 em (48) (com os correspondentes x = 1 e z = 3), em conjunto com a condição $\partial/\partial y = 0$, se obtém:

$$T_{zz}^{'} = -p_{\text{fluido}} + 2\eta \frac{\partial v_{z}^{'}}{\partial z} - \left(\frac{\partial v_{x}^{'}}{\partial x} + \frac{\partial v_{z}^{'}}{\partial z}\right) \left(\frac{2}{3}\eta - \zeta\right),\tag{49}$$

$$T_{xz}^{'} = \eta \left(\frac{\partial v_x^{'}}{\partial z} + \frac{\partial v_z^{'}}{\partial x} \right), \tag{50}$$

respectivamente. Derivando-se (49) com relação ao tempo, substituindo-se $\partial(\delta p_f)/\partial t$ dada em (27), e, as expressões para v'_x e v'_z dadas em (44) e (45) ao resultado, se obtém:

$$T'_{zz} = \left[2\eta k^2 - k_{lf}^2 \left(\zeta + \frac{4}{3}\eta + \frac{j\omega\rho_f}{k_{\rm fluido}^2}\right)\right] Q_f + j2\eta k \frac{\partial S_f}{\partial z}.$$
(51)

Manipulando (51) com o auxílio de (35), e usando (34) e (39), tem-se que:

$$T'_{zz} = \frac{j\omega\rho_f}{k_{tf}^2} (k^2 + \gamma_2^2) Q_f - \frac{2\omega\rho_f k}{k_{tf}^2} \frac{\partial S_f}{\partial z},$$
(52)

o qual é análogo a (22). Por sua vez, substituindo (44) e (45) em (50):

$$T'_{xz} = -\frac{2\omega\rho_f k}{k_{tf}^2} \frac{\partial Q_f}{\partial z} - \frac{j\omega\rho_f}{k_{tf}^2} (k^2 + \gamma_2^2) S_f,$$
(53)

o qual é similar a (23). De forma análoga ao que foi usado no sólido, para se fazer uma comparação com outras formulações, estes coeficientes podem ser escritos estabelecendo-se os coeficientes equivalentes de Lamé para o fluido: $c'_{44} = \mu'$ e $c'_{13} = c'_{11} - 2c'_{44} = \lambda'$. Portanto:

$$c_{11}^{'} = -j\omega\left(\zeta + \frac{j\omega\rho_f}{k_f^2}\right) - \frac{4}{3}j\omega\eta = \lambda^{'} + 2\mu^{'},\tag{54}$$

$$c'_{13} = c'_{11} - 2c'_{44} = -j\omega \left(\zeta + \frac{j\omega\rho_f}{k_f^2}\right) + \frac{2}{3}j\omega\eta = \lambda'.$$
(55)

Recorrendo-se ao conceito de módulo elástico volumétrico empregado por Nayfeh e Nagy (1997), $\lambda_f = \rho_f c_f^2$, (54) e (55) podem ser reescritos como $c'_{11} = -j\omega\zeta + \lambda_f - \frac{4}{3}j\omega\eta = \lambda' + 2\mu'$ e $c'_{13} = -j\omega\zeta + \lambda_f + \frac{2}{3}j\omega\eta = \lambda'$, respectivamente (NAYFEH; NAGY, 1997). Se a segunda viscosidade (ζ) é desconsiderada, estas relações correpondem ao modelo de Stokes para fluido viscoso, conforme empregado por Nayfeh e Nagy (1997).

2.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nesta seção são encontradas as relações que determinam as características de dispersão para sistemas com várias camadas. Aplicou-se uma técnica robusta e de implementação simples, que consiste em relacionar as componentes de velocidade e *stress* da superfície inferior da última camada com as da superfície superior da primeira camada em uma única matriz.

Trata-se de uma diferente formulação para meios multicamadas, pois evita o problema de altos valores de $(f \cdot 2d)$, onde numericamente não se encontra as soluções, pois se trabalha com exponenciais. A desvantagem é que a matriz resultante pode se tornar muito grande, dependendo do número de camadas, provocando uma lentidão na busca de soluções (LOWE, 1995). No caso deste trabalho, considera-se um sistema tricamada (fluido-sólido-fuido), o que resulta em um número de equações adequado para processamento computacional.

Nesse método a matriz é composta por 4(n - 1) equações, sendo *n* o número de camadas do sistema. Estas equações satisfazem as condições de contorno de cada camada e são influenciadas, numa interface particular, pelas ondas que chegam da interface inferior.

As soluções formais descritas anteriormente são aplicadas nas deduções das relações para o cálculo das características de dispersão para ondas de fuga de Lamb. Lembrando-se que nesta análise considera-se o sistema constituído por uma placa sólida isotrópica de espessura 2*d*, e, totalmente imersa em fluido viscoso, conforme ilustrado esquematicamente na figura Figura 1.

As condições de continuidade de velocidade (v_x, v'_x, v_z, v'_z) e *stress* $(T_{zz}, T'_{zz}, T_{xz}, T'_{xz})$ devem ser aplicadas nas interfaces sólido-fluido $z = \pm d$. Porém, primeiramente é necessário encontrar as soluções para (14), (15), (40) e (41). Para a placa sólida as soluções são ondas estacionárias na direção z, e, portanto, as soluções para (14) e (15) são do tipo:

$$Q_s = [A\cosh(qz) + B\sinh(qz)]$$
(56)

e

$$S_s = [C\cosh(sz) + D\sinh(sz)], \tag{57}$$

as quais correspondem ao par de ondas parciais propagando na direções positiva e negativa da direção *z*, respectivamente. Os coeficientes *A*, *B*, *C* e *D* são as amplitudes de onda a serem determinados. Substituindo (56) e (57) em (16), (17), (22) e (23), tem-se que as componentes de velocidade são:

$$v_x = jk[A\cosh(qz) + B\sinh(qz)] - s[C\sinh(sz) + D\cosh(sz)],$$
(58)

$$v_z = q[A\sinh(qz) + B\cosh(qz)] + jk[C\cosh(sz) + D\sinh(sz)],$$
(59)

e as componentes de tensor stress são:

$$T_{zz} = \frac{j\omega\rho_s}{k_{ts}^2} (k^2 + s^2) [A\cosh(qz) + B\sinh(qz)] - \frac{2\omega\rho_s k}{k_{ts}^2} s[C\sinh(sz) + D\cosh(sz)], \quad (60)$$

$$T_{xz} = -\frac{2\omega\rho_s k}{k_{ts}^2} q[A\sinh(qz) + B\cosh(qz)] - \frac{j\omega\rho_s}{k_{ts}^2} (k^2 + s^2) [C\cosh(sz) + D\sinh(sz)].$$
(61)

Por outro lado, as soluções de (40) e (41) correspondem às ondas que se propagam pela interface sólido-fluido e são dadas por:

$$Q_f = E e^{\gamma_1 z} + F e^{-\gamma_1 z}, (62)$$

$$S_f = G e^{\gamma_2 z} + H e^{-\gamma_2 z},$$
 (63)

em que *E*, *F*, *G* e *H* são constantes a serem determinadas. Substituindo (62) e (63) em (44), (45), (51) e (53), tem-se as componentes de velocidade dadas por:

$$v'_{x} = jk[Ee^{\gamma_{1}z} + Fe^{-\gamma_{1}z}] - \gamma_{1}[Ge^{\gamma_{2}z} - He^{-\gamma_{2}z}],$$
(64)

$$v'_{z} = \gamma_{1} [Ee^{\gamma_{1}z} - Fe^{-\gamma_{1}z}] + jk [Ge^{\gamma_{2}z} + He^{-\gamma_{2}z}],$$
(65)

e as componentes de tensor stress:

$$T_{zz}' = \frac{j\omega\rho_f}{k_{tf}^2} (k^2 + \gamma_2^2) [Ee^{\gamma_1 z} + Fe^{-\gamma_1 z}] - \frac{2\omega\rho_f k}{k_{tf}^2} \gamma_2 [Ge^{\gamma_2 z} - He^{-\gamma_2 z}],$$
(66)

$$T'_{xz} = -\frac{2\omega\rho_f k}{k_{tf}^2} \gamma_1 [Ee^{\gamma_1 z} - Fe^{-\gamma_1 z}] - \frac{j\omega\rho_f}{k_{tf}^2} (k^2 + \gamma_2^2) [Ge^{\gamma_2 z} + He^{-\gamma_2 z}].$$
(67)

Na sequência, devem se aplicadas as condições de contorno necessárias para que o tensor *stress* e as componentes de velocidade sejam contínuos na interface z = +d:

$$v_{x}(z = +d) = v'_{x}(z = +d),$$

$$v_{z}(z = +d) = v'_{z}(z = +d),$$

$$T_{zz}(z = +d) = T'_{zz}(z = +d),$$

$$T_{xz}(z = +d) = T'_{xz}(z = +d).$$
(68)

Em z = 0 tem-se as soluções (58) e (59), dadas por sinh(qz), sinh(sz), as quais se tornam iguais a 0, e, $\cosh(qz)$ e $\cosh(sz)$, as quais se tornam iguais a 1. Devido a simetria, deve-se obter o mesmo resultado quando se aplicam as condições de contorno para z = +d ou z = -d. Para o meio fluido a fim de manter à mesma origem (z = 0) para ambas as ondas (estacionária e de fuga), em $z \leq -d$, z deve ser trocado por (z + d) em (62) e (63). Além disso, ao aplicar-se a condição de radiação de Sommerfeld (KINO, 1987), tem-se que F = 0 e H = 0 nestas equações, caso contrário, a energia seria infinita em $z = \pm\infty$. A mesma abordagem deve ser considerada em (64) a(67).

Embora não seja necessariamente obrigatório, é interessante neste estágio, dividir as soluções em modos simétricos e assimétricos, o qual conduz a um sistema de equações 4×4 . Isto simplifica significativamente a análise do problema e a interpretação das soluções.

2.3.1 Modos Simétricos

Na Figura 2 ilustra-se a estrutura da onda através da espessura da placa para o movimento simétrico. Percebe-se que v_z troca de sinal em z = 0 (AULD, 1990). Logo, para que



Figura 2 – Onda de Lamb simétrica. a) Discretização fina. b) Funções v_x (par) e v_z (ímpar).

Fonte: Elaborada pelo autor

 $v_z(z=0) = 0 \text{ em } (17)$ é necessário que $\partial Q_s/\partial z = 0 \text{ e } S_s = 0 \text{ em } z = 0$. Isto força a solução de onda estacionária no sólido a ter B = 0 em (56) e C = 0 em (57).

O tensor T_{xz} corresponde a uma rotação do meio em torno do eixo y, o qual roda no sentido horário para z < 0 e anti-horário para z > 0, e, com isto, $T_{xz}(z = 0) = 0$. Alternativamente, considera-se que v_x deve ser uma função par de z, enquanto que v_z deve ser uma função ímpar. Isto ocorre somente se Q_s for par e S_s for ímpar, ou seja:

$$Q_s = A\cosh(qz), \quad B = 0 \tag{69}$$

$$S_s = D\sinh(sz), \quad C = 0 \tag{70}$$

Então, basta fazer B = 0 e C = 0 na região do sólido. As expressões para o fluido são as mesmas já deduzidas anteriormente [(62) e (63) com z substituído por z + d na região $z \le 0$]. Com a condição de contorno aplicada na interface z = -d, tem-se a relação para levantamento da característica de dispersão para o modo simétrico, dado pelo seguinte sistema homogêneo:

$$\begin{bmatrix} (k^2 + s^2)\cosh qd & 2jks\cosh sd & -r(k^2 + \gamma_2^2) & -2jrk\gamma_2\\ 2jkq\sinh qd & -(k^2 + s^2)\sinh sd & -2jrk\gamma_1 & r(k^2 + \gamma_2^2)\\ q\sinh qd & jk\sinh sd & -\gamma_1 & -jk\\ jk\cosh qd & -s\cosh sd & -jk & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A\\ D\\ E\\ G \end{bmatrix} = 0, \quad (71)$$

Neste sistema de equações a variável r é dada por $r = -j\eta k_{ts}^2/\rho_s \omega = -j\omega\eta/\mu = c'_{44}/c_{44}$, e, possui solução não-trivial se e somente se o seu determinante for nulo. As raízes (k) desta equação determinantal conduzem as chamadas curvas de dispersão, correspondentes a gráficos de k versus ($f \cdot 2d$).

2.3.2 Modos Antissimétricos

Na figura 3 ilustra-se a estrutura da onda através da espessura da placa para o movimento antissimétrico. Neste caso, v_x deve ser função ímpar de *z*, e, v_z deve ser função par de *z*:

Figura 3 – Onda de Lamb antissimétrica. a) Discretização fina. b) Funções v_x (ímpar) e v_z (par).



Fonte: Elaborada pelo autor

A análise que se segue também pode ser justificada observando-se que v_x troca de sinal em z = 0, e assim, $v_x(z = 0) = 0$ (AULD, 1990). E também, que $T_{zz}(z = 0) = 0$, pois o esforço sobre o elemento de volume passa de compressão para tração. Com isso, conclui-se que:

$$Q_s = B \sinh(qz), \quad A = 0 \tag{72}$$

$$S_s = C \cosh(sz), \quad D = 0 \tag{73}$$

Aplicando a condição de contorno na interface z = -d, obtem-se a relação de dispersão característica para o modo antissimétrico a partir do sistema:

$$\begin{bmatrix} (k^{2} + s^{2}) \sinh qd & 2jks \sinh sd & -r(k^{2} + \gamma_{2}^{2}) & -2jrk\gamma_{2} \\ 2jkq \cosh qd & -(k^{2} + s^{2}) \cosh sd & -2jrk\gamma_{1} & r(k^{2} + \gamma_{2}^{2}) \\ q \cosh qd & jk \cosh sd & -\gamma_{1} & -jk \\ jk \sinh qd & -s \sinh sd & -jk & \gamma_{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ C \\ E \\ G \end{bmatrix} = 0.$$
(74)

Se a segunda viscosidade (ζ) é desconsiderada em (71) e (74), estas equações estarão de acordo com os resultados obtidos por (NAYFEH; NAGY, 1997). No entanto, embora baixos valores do produto frequência-viscosidade (< 10⁶ Pa) não modificam de forma significativa as propriedades de propagação das ondas guiadas, quando se tem um fluido muito viscoso, ou uma camada viscoelástica, em contato com a placa, este parâmetro se torna importante para a análise do sistema.

2.3.3 Curvas de Dispersão

As equações características (71) e (74) permitem determinar numericamente a dependência da velocidade de fase e da atenuação das ondas de Lamb com a frequência, tanto para placas imersas quanto para placas revestidas por camadas de fluido viscoso, desde que a espessura da camada líquida seja muito maior que d. Para isso, obtêm-se informações sobre as relações entre o número de onda k com a frequência, resultando-se no espectro de frequência da velocidade de fase, ou curva de dispersão.

Em uma análise matemática, as equações de dispersão para os modos simétricos e antissimétricos apresentam um número finito de soluções (k) para cada frequência. Dentre estas soluções pode haver um número finito de k's complexos, os quais forncecem informações sobre velocidade de fase c_p e atenuação α dos modos guiados, dados por:

$$k = \frac{\omega}{c_p} + j\alpha,\tag{75}$$

a partir do qual pode-se obter a velocidade de fase que está relacionada com a parte real do *k* complexo:

$$c_p = \frac{\omega}{\Re\{k\}} = \frac{\omega}{k_R}.$$
(76)

No que diz respeito ao fenômeno físico, a compreensão da característica de dispersão está associada ao fator $e^{j(kx-\omega t)}$. Considerando, então, $k = k_R + jk_I$ uma solução de (71) e (74), o fator de fase instantânea pode ser escrito como:

$$e^{j(kx-\omega t)} = e^{j(k_R x - \omega t)} e^{-k_I x}$$
(77)

Desta forma, o fator $e^{j(kx-\omega t)}$ corresponde à propagação da onda harmônica temporal na direção *x*, enquanto que o termo adicional $e^{-k_I x}$ representa a queda de amplitude ao longo da distância conforme a onda se propaga. Esta queda exponencial mostra a atenuação da onda. Assim, o parâmetro k_I é denominado fator de atenuação e é dado em neper (Np) por comprimento. A unidade neper é adimensional e utiliza os logaritmos naturais (na base *e*) para se obter os valores numéricos (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1964).

Há três possíveis valores para a parte imaginária, os quais podem ser interpretados da seguinte forma (ROSE, 2004):

• $k_I < 0$

A onda cresce exponencialmente com a distância x e trata-se de um fenômeno físico que não é observado para meios passivos;

• $k_I = 0$

A onda propaga sem atenuação. Para o problema simples de placa livre (sólido-ar), apenas valores reais de k são necessários para suprir a informação sobre a propagação da onda. Assim, para se obter as curvas de dispersão, interessa somente nas soluções reais das equações (71) e (74);

• $k_I > 0$

Neste caso, a onda decai exponencialmente com a distância, estando associada a uma atenuação.

Um dos principais problemas em ensaios não-destrutivos usando ondas de Lamb é o seu caráter dispersivo. Quando um modo de propagação é excitado através de um sinal com uma determinada largura de banda, as suas diferentes componentes espectrais vão se propagar com diferentes velocidades, dando origem a uma distorção do sinal no receptor.

A solução numérica para as equações características (71) e (74) foram obtidas segundo um algoritmo que foi implementado baseando-se na procura de mínimos da função multivariável usando o método de derivada, com os seguintes passos:

- 1. Primeiro, define-se o intervalo do produto frequência-espessura $(f \cdot 2d)$ para a busca de soluções do modo de Lamb específico;
- Em seguida, determina-se um valor (estimado) inicial de velocidade de fase e atenuação, os quais são escolhidos para a primeira frequência do intervalo determinado no primeiro passo;
- Escolhe-se os parâmetros específicos de otimização de busca, como tolerância e números máximos de avaliações e iterações;
- 4. O processo de minimização da função multivariável é realizado usando a função *fininse-arch* do Matlab;
- 5. O primeiro e segundo passos são repetidos para cada modo de Lamb que se deseja encontrar.

Nas próximas seções são apresentadas as curvas de dispersão para os modos de Lamb e quase Scholte. Conhecer suas características em função da frequência se torna importante, para que se possa selecionar os modos e bandas de frequências mais adequados para aplicações em detecção de defeitos ou em caracterização de líquidos.

2.4 ONDAS DE LAMB

Na Figura 4 apresenta-se as curvas de dispersão obtidas para uma placa de alumínio imersa em água, cujas propriedades do sólido são: velocidade longitudinal, $c_l = 6400$ m/s, velocidade de cisalhamento, $c_t = 3100$ m/s e densidade $\rho_s = 2700$ kg/m³. As propriedades da água são: velocidade do som no fluido $c_f = 1500$ m/s e densidade $\rho_f = 1000$ kg/m³.

Por inspeção da Figura 4, verifica-se que para pequenos valores de $(f \cdot 2d)$, correspondentes à região de baixas frequências para um determinado valor de espessura, existem somente dois modos de Lamb fundamentais, ou modos dominantes (S0 e A0), e que não apresentam frequência de corte. O terceiro modo que está mais abaixo do A0 corresponde ao modo de



Fonte: Elaborada pelo autor

superfície quase Scholte, o qual será abordado na próxima seção. Ainda nesta região, percebese que o modo S0 apresenta baixa dispersão, ao contrário do modo A0 que se apresenta mais dispersivo.

À medida que $(f \cdot 2d)$ aumenta, o comprimento de onda por espessura $(\lambda/2d)$ diminui, mais modos atingem a condição de ressonância transversal $(d = N\lambda/2)$ e mais modos são acoplados, sendo denominados S1, S2,..., Sn para os modos simétricos, e A1, A2,..., An para os modos antissimétricos.

Observa-se ainda que, à medida que a frequência aumenta as velocidades dos modos fundamentais, simétrico e antissimétrico, tendem para o valor da onda acústica superficial (onda de Rayleigh, com velocidade c_R). Isto acontece porque, em altas frequências, os modos de Lamb se degeneram em ondas superficiais, uma vez que a espessura da lâmina torna-se muito maior que o comprimento de onda. Por outro lado, as velocidades dos modos superiores tendem assintoticamente para a velocidade da onda acústica transversal (c_t).

O fenômeno da dispersão pode dar origem a dificuldades de interpretação do sinal recebido e à diminuição da relação SNR, pois a amplitude máxima da envoltória de um sinal decai rapidamente se a sua dispersão é elevada. Na Figura 5 observa-se outra forma de se apresentar as curvas de dispersão, o qual relaciona a frequência com o número de onda, lembrando que $k_R = \omega/c_p$.

Outro problema que pode surgir quando se usam ondas guiadas relaciona-se com a dificuldade de geração e utilização de apenas um modo de propagação. Em quaisquer das circunstâncias, mesmo para as baixas frequências, podem existir, pelo menos, dois modos.

Figura 4 – Curvas de dispersão para a placa de alumínio imersa em água.



Figura 5 – Curvas de dispersão relacionando o número de onda k_R e o produto $(f \cdot 2d)$.

Fonte: Elaborada pelo autor

Com o aumento da frequência, o número de modos existentes pode aumentar, o que pode dar origem a problemas na interpretação da informação captada no receptor. Mesmo quando é garantida uma geração monomodo, a presença de fronteiras irregulares, defeitos ou outras variações da impedância acústica podem dar origem a vários sinais no receptor, devido à conversão de modos.

A velocidade relevante em experimentos práticos, quando pulsos de curta duração no tempo (ondas monocromáticas) são empregados, é a velocidade da informação, ou velocidade de grupo, $c_g = d\omega/dk_R$ (ROSE, 2004). A velocidade de grupo é deduzida da curva de velocidade de fase, e está relacionada tanto com inclinação da curva de dispersão quanto o valor da frequência central de operação. Substituindo-se $k_R = \omega/c_p$, onde c_p é a velocidade de fase da onda de Lamb, em $c_g = d\omega/dk_R$, obtém-se:

$$c_g = \left[\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\omega}\left(\frac{\omega}{c_p}\right)\right]^{-1} = \left[\frac{c_p - \omega\frac{\mathrm{d}c_p}{\mathrm{d}\omega}}{c_p^2}\right]^{-1} = \frac{c_p}{1 - \frac{\omega}{c_p}\frac{\mathrm{d}c_p}{\mathrm{d}\omega}}$$
(78)

e usando a relação $\omega = 2\pi f$, tem-se:

$$c_g = \frac{c_p}{1 - \frac{f.d}{c_p} \frac{\mathrm{d}c_p}{\mathrm{d}(f.d)}}.$$
(79)

Assim, as curvas de dispersão para uma placa de alumínio imersa em água, descrita em termos de velocidade de grupo, podem ser ilustradas em gráfico, Figura 6, utilizando-se os resultados obtidos anteriormente para a Figura 4, juntamente com a equação (79).

Verifica-se que cada modo apresenta um valor para a velocidade de propagação e uma determinada dispersão característica, o qual dificulta a análise dos sinais. Por isso, na prática,





Fonte: Elaborada pelo autor

há a preferência em utilizar uma quantidade mínima de modos de propagação, como os modos fundamentais simétrico (S0) e antissimétrico (A0) correspondentes à região com baixa dispersão.

Porém, há aplicações em que se opera com frequências mais elevadas, ou então, com pulsos de banda larga, que posteriormente são filtrados para se operar com determinados modos a determinadas frequências (MICHAELS; MICHAELS, 2007).

Para minimizar a questão da dispersão, utilizam-se sinais de banda estreita, como trem de ondas senoidais, onde se perde em termos de resolução axial, ou então, compensa-se a dispersão (WILCOX; LOWE; CAWLEY, 2001; XU; GIURGIUTIU; YU, 2009, San Diego), quando se conhecem as curvas de dispersão e a natureza do sinal que se propaga.

Deve-se considerar também que as ondas de Lamb decaem em amplitude ao longo da propagação. Este efeito, correspondente à atenuação, pode ser observado quando a placa está submersa em um fluido viscoso, ocorrendo ondas de fuga (*leaky*) e perdas viscosas no fluido (DAYAL; KINRA, 1989). Se a placa é revestida por uma camada de fluido com espessura finita h, as ondas de Lamb exibem uma fuga de energia menor porque a viscosidade é a única fonte da atenuação (fricção viscosa na interface).

Os modos de Lamb de fuga ocorrem devido aos efeitos combinados da perda por radiação, ou seja, fuga de energia para o fluido, e também, por perda dissipativa devido à fricção viscosa nas interfaces. Segundo Nayfeh e Nagy (1997), quando se tem camadas muito espessas de fluido ($h \rightarrow \infty$) o efeito da viscosidade sobre a velocidade de fase dos modos de Lamb normalmente é desprezível relativamente à atenuação. Neste trabalho, a atenuação devido a fuga de energia é a situação de maior interesse, pois retrata o que acontece experimentalmente. A atenuação pode ser avaliada diretamente da parte imaginária do número de onda complexo, calculado a partir das equações de dispersão (71) e (74) para diferentes frequências, ou seja, $k_I = \Im\{k\}$. O coeficiente de atenuação para cada modo de Lamb ilustrado na Figura (4), pode ser observado na Figura 7.





Fonte: Elaborada pelo autor

Estas curvas são chamadas de curvas de dispersão de atenuação, pois representam a atenuação de cada modo de Lamb para frequências e números de onda específicos. As curvas de atenuação, em conjunto com as de velocidade de fase, descrevem o comportamento das ondas de Lamb em placas submersas em fluido.

Embora o contato do fluido com a placa ocasione a atenuação dos modos de Lamb, as curvas de velocidade de fase são pouco influenciadas, podendo-se dizer que se trata de ondas de Lamb para placa livre (placa-vácuo) com atenuação.

Por inspeção da Figura 7a, observa-se que uma impotante caracteristica é que a maioria dos modos apresentam bandas em que a atenuação se aproxima de zero, exceto os modos A0 e A1. Estes mínimos estão relacionados com a diminuição da velocidade da partícula *out-of-plane* (v_z) na interface da placa. Os perfis de vibração nessas frequências diminuem o acoplamento de energia acústica a partir da placa para o fluido. Nestes casos, somente as velocidades vibracionais *in-plane* (v_x) existem na interface, as quais são de certa forma atenuadas devido as perdas viscosas.

Os perfis de vibração de v_x , v_z , T_{zz} e T_{xz} são obtidos a partir de Q e S de (16) e (17) para a velocidade de partícula e (22) e (23) para o *stress* no sólido, e, (44) e (45) para velocidade e (52) e (53) para *stress* no líquido. Para se obter Q e S precisa-se dos valores das constantes A, D, E e G no modo simétrico e B, C, E e G no modo antissimétrico, os quais são calculados fazendo G = 1 nas equações (71) e (74) e usando os valores obtidos para o número de onda k em cada frequência, resolve-se um sistema de matrizes resultante. Como exemplo, estão ilustrados na Figura 8 os perfis de velocidade da partícula *out-of-plane* do modo S1 para três frequências em torno do mínimo de atenuação.

Figura 8 – Perfis de vibração da velocidade de partícula *out-of-plane* (v_z) do modo S1 para frequências próximas do mínimo de atenuação. Dados normalizados com o módulo da velocidade na origem.



A velocidade de vibração *out-of-plane* desaparece na superfície da placa na frequência de 3,4 MHz.mm, a qual corresponde ao ponto de mínimo da curva de atenuação do modo S1, como pode ser observado na Figura 7a. No quadro inserido, pode-se verificar que a distribuição de vibração na interface sólido-líquido está próxima de zero, e, observar o perfil típico em uma camada viscosa no meio fluido. Esses mínimos de atenuação são uma vantagem para a propagação de ondas guiadas em placas imersas de grandes dimensões, pois permitem analisar estruturas, como, por exemplo, na detecção de defeitos por meio de imagens sem que hajam diminuições relevantes dos sinais recebidos, conforme será discutido nos próximos capítulos.

2.5 A ONDA DE SCHOLTE

Nesta seção apresenta-se as características de propagação do modo quase Scholte. Este tipo de onda se propaga na interface entre um sólido e um fluido e a análise deste modo propagante é uma alternativa atraente para se determinar a velocidade de fase do modo guiado, o qual possui informações sobre as características do líquido.

Desde o seu descobrimento, as ondas de interface têm sido de grande interesse para a sismologia, sendo aplicadas, principalmente, em estudos de sedimentos do fundo do mar (ROEVER; VINING; STRICK, 1959). No entanto, há algumas décadas, estes tipos de ondas começaram a ser usadas em caracterização de líquidos devido às suas propriedades de propagação entre sólido e o fluido (BILLY; QUENTIN, 1983; CEGLA; CAWLEY; LOWE, 2005). O seu tipo depende dos meios que estão em contato. Para o caso de um sistema composto por um semi-espaço sólido e outro líquido, tem-se a onda de Scholte propriamente dita.

Métodos não-destrutivos por ultrassom são umas das técnicas promissoras para a caracterização de líquidos. Quando uma fina camada sólida é coberta com fluido, considera-se tratar-se de um sistema de semi-espaços infinitos, e então, as ondas acústicas de superfície são preferencialmente usadas para a caracterização dos materiais (LEE; CHENG, 2001).

Quando o material sólido não tem uma espessura muito grande comparado com o comprimento de onda, aparece um modo de propagação muito similar à onda de Scholte denominado modo quase Scholte (QSCH) (CEGLA; CAWLEY; LOWE, 2005).

2.5.1 O modo quase Scholte

Este modo é caracterizado como sendo uma onda flexural com comportamento assintótico da velocidade de fase em altas frequências, aproximando-se da velocidade longitudinal do fluido. Numa configuração contendo um sólido elasticamente isotrópico imerso em líquido, a velocidade de cisalhamento no sólido é menor que a velocidade longitudinal do fluido (CHE-EKE, 2002).

O modelamento do modo quase Scholte pode ser feito para fluidos ideais ou viscosos usando a técnica de ondas parciais, como descrito por (ROSE, 2004), ou o método de matriz global descrito por (LOWE, 1995). Isto resulta numa relação entre número de onda e frequência, ou equação de dispersão, que descreve o modo.

Para o caso de um sólido com geometria tipo de placa, as relações de dispersão características podem ser obtidas usando-se o modelamento teórico para o sólido e para o fluido viscoso conforme descrito na seção 2.2.

Portanto, sendo o modo quase Scholte um tipo de onda flexural, pode-se obtê-lo como uma das soluções do determinante para modos antissimétricos. Com isso, a velocidade de fase, velocidade de grupo e a atenuação são calculados em função da frequência tal como realizado para as ondas de Lamb, como pode ser observado na Figura 4.

A vantagem de se usar o modo QSCH para a caracterização de líquidos está na alta proporção de energia da onda que se propaga no fluido. Desta forma, informações mais detalhadas a respeito das propriedades do fluido podem ser obtidas com mais sensibilidade mensurando-se a velocidade de fase, a qual está relacionada com a densidade e viscosidade dos materiais.

Embora as ondas de Lamb sejam multimodais e dispersivas, o uso de um único modo de propagação facilita a análise de sinais, desde que se opere na faixa de frequência que apre-

senta pouca dispersão. Sendo o modo QSCH obtido através do modo de Lamb A0, como será mostrado nas próximas seções, pretende-se usá-lo para a caracterização de fluidos.

2.5.2 Propriedades do modo quase Scholte

As propriedades do modo QSCH podem ser modeladas pela combinação das componentes de velocidade de partículas e *stress* do sólido e fluido e aplicando as condições de contorno, as quais estabelecem a continuidade destas componentes através da interface. As curvas de velocidade de fase, velocidade de grupo e atenuação foram obtidas teoricamente para uma placa de aço inox com 0,1 mm de espessura, ($c_l = 5890 \text{ m/s}$, $c_t = 3135 \text{ m/s}$, $\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3$) imersa em semi-espaços infinitos de fluido, conforme podem ser observadas pela Figura 9.

Neste caso, são analisados três diferentes modos antissimétricos: o modo de Lamb A0 para o caso da placa em contato com o ar ($c_l = 343 \text{ m/s}$, $\rho_s = 1,2 \text{ kg/m}^3$) e com a água ($c_l = 1500 \text{ m/s}$, $\rho_s = 1000 \text{ kg/m}^3$), e, o modo quase Scholte para a placa imersa em água. Neste caso, em que a propagação ocorre entre um sólido elástico e um fluido ideal, o modo QSCH poder apresentar pouca dispersão dependendo da frequência de operação.

Há muitas similaridades entre esses modos de propagação. Em baixas frequências as velocidades de fase são muito pequenas e em altas frequências apresentam uma assíntota horizontal. No caso do modo A0, a assíntota tende ao valor da velocidade de cisalhamento do material da placa, e, para o caso do modo quase Scholte, esse valor é o da velocidade do som no fluido. A velocidade de grupo revela o mesmo comportamento assintótico.

Uma explicação física para esse comportamento é que o comprimento de onda do modo quase Scholte diminui com o aumento da frequência. Com isso, há um momento em que o comprimento de onda se torna menor que a espessura da placa. Neste caso o modo se comporta como se estivesse em um semi-espaço infinito decaindo exponencialmente na direção transversal à propagação. Por outro lado, em baixa frequência ocorre uma interação entre as duas interfaces da placa.

A atenuação é claramente diferente para os modos A0, em sólido-ar e sólido-água, e QSCH. Para o modo de Lamb A0 em sólido-ar verifica-se um local de máximo seguido de um decrescimento para altas frequências. A alta atenuação desse modo A0 dá origem às ondas de fuga (*leaky*). Um comportamento distinto pode ser observado pelo modo QSCH, em que a atenuação é muito mais baixa do que o modo A0, embora também cresça com a frequência. Esta característica está relacionada mais com os efeitos viscosos no fluido do que com o acoplamento entre placa e fluido, o que faz com que a amplitude do modo QSCH decaia menos na água do que a do modo A0 em frequências moderadas (CEGLA; CAWLEY; LOWE, 2005).

Figura 9 – Curvas de dispersão teóricas para o modo fundamental A0 (ar/água) antissimétrico e quase Scholte. a) Velocidade de fase em função da frequência; b) Velocidade de grupo em função da frequência; c) Coeficiente de atenuação em função da frequência.



Fonte: Elaborada pelo autor

As similaridades entre os modos A0 e QSCH também podem ser observadas pelos seus perfis de deslocamento. Na Figura 10a verifica-se o comportamento das velocidades de vibração das partículas *in-plane* (v_x) e *out-of-plane* (v_z), e, na Figura 10b observa-se os componentes de *stress*. Os perfis dos modos foram obtidos para frequência de 2,2 MHz. Na placa, correspondente às posições entre 0 mm (centro da placa) e $0,5 \times 10^{-4}$ m (interface), as curvas de deslocamentos *in-plane* e de *stress* para o modo A0 no sólido-ar e o modo QSCH possuem forma similar. Acredita-se que esta seja uma das razões da conversão do modo A0 em caso sólido-ar para o modo QSCH.

Figura 10 – Perfis de deslocamento e *stress* para os modos A0 (ar/água) e quase Scholte na frequência de 0.22 MHz.mm. a) Velocidades *out-of-plane* e *in-plane* para o modo A0 em sólido-ar, modo A0 em sólido-água e modo quase Scholte; b) Componente *Stress* T_{zz} e T_{xz} para o modo A0 em sólido-ar, modo A0 em sólido-ar, modo A0 em sólido-água e modo quase Scholte.



(a)

Fonte: Elaborada pelo autor

2.6 COMENTÁRIOS

Nesta abordagem teórica, a propagação de ondas ultrassônicas volumétricas foi primeiramente descrita. Ao se aplicar as condições de contorno, pôde-se descrever as características das ondas guiadas em placa imersa em fluido.

O fluido homogêneo em torno da placa foi modelado usando a equação de Navier-Stokes, levando em consideração os coeficientes de viscosidade volumétrico e de cisalhamento. Estas equações que representam o sistema completo foram relacionados em uma única matriz que descreve um meio multicamada constituído por fluido-sólido-fluido.

As curvas de dispersão e atenuação para uma placa imersa em água foram calculadas numericamente, sendo possível observar que, enquanto as curvas de velocidade de fase não se alteram significativamente, em comparação com o caso em que a placa não está em contato com um líquido, a atenuação pode ser muito alta devido as ondas de fuga e perdas viscosas.

No entanto, observa-se que para alguns modos de Lamb há uma banda de frequência em que a atenuação é baixa, a qual está relacionada com as velocidades *out-of-plane* que se tornam nulas na interface sólido-fluido. Trabalhar nessas regiões de frequência pode constituir uma vantagem para aplicações de testes não destrutivos, como na detecção de defeitos por imagem.

Para a caracterização de fluidos a velocidade de fase e a atenuação das ondas de Lamb são propriedades importantes a serem analisadas, uma vez que delas pode-se obter informações sobre o líquido. Sendo o modo quase Scholte um tipo de onda de superfície, cuja curva de dispersão pode ser obtida pela matriz dos modos antissimétricos, verificou-se, juntamente com suas propriedades, que constuitui uma alternativa para a construção de um sensor em guia de ondas para a caracterização de líquidos.

3 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA ANÁLISE DE ONDAS EM PLACAS

Neste capítulo descreve-se a implementação de técnicas experimentais com vistas ao desenvolvimento de sensores para a caracterização de líquidos e para a detecção de defeitos em placas. Antes, simulações numéricas são realizadas para a obtenção das curvas de dispersão dos sistemas que são abordados. Neste âmbito, técnicas de modelagem por elementos finitos de sistemas com propagação de ondas de Lamb, como os apresentados nos capítulos 2, foram realizadas com o software *PZFlex*, o qual é apropriado para se resolver problemas de propagação de ondas, piezeletricidade e aplicações com ultrassom (ASSOCIATES, 2009).

Para a validação da simulação levantou-se as curvas de dispersão de uma placa de alumínio imersa em água e comparou-se os resultados com as curvas teóricas obtidas por meio de métodos numéricos implementados em Matlab. Para isso utilizou-se o método da Transformada de Fourier bidimensional (2D-FFT), descrito por Alleyne e Cawley (1991) para a análise da propagação de sinais na existência de vários modos de propagação.

O modo quase Scholte também é avaliado, porém, através de simulações com o software Wave 2000, o qual baseia-se na técnica de diferenças finitas. As curvas de dispersão de uma placa de aço inox parcialmente imersa em água são obtidas para o modo A0 e quase Scholte.

As técnicas experimentais abordadas visaram a elaboração de sistemas de medição para se avaliar as bandas de baixa atenuação dos modos de Lamb em determinadas faixas de frequências. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Ultrassom da FEIS-Unesp.

3.1 TÉCNICAS NUMÉRICAS POR ELEMENTOS FINITOS

As simulações foram realizadas utilizando o software *PZFlex*, no Labaratório de Ultrassom da FEIS-Unesp, como parte complementar do estudo teórico sobre as propagações de ondas de Lamb em placas. O método de elementos finitos (FEM) possui a capacidade de modelar matematicamente estruturas de guiamento complexas e com geometrias irregulares, contendo perfurações, trincas ou parafusos, além de permitir a alteração de parâmetros dessas geometrias. Com isso, torna-se possível simular a excitação de ondas guiadas em qualquer ponto e/ou direção da placa, fornecendo, então, informações sobre o deslocamento provocado.

Embora as simulações tenham sido realizadas para o caso simples de um sistema de placa imersa em fluido, o método de elementos finitos pode ser muito útil como ferramenta para estudos futuros de ondas de Lamb propagando-se em sistemas mais complexos que ocorrem na prática.

O software PZFlex possui uma grande variedade de elementos de simulação, facilitando

a análise de materiais piezelétricos, acústica de fluidos, sólidos isotrópicos e anisotrópicos, tecidos e meios biológicos, entre outros. Em comparação aos modelos realizados no domínio da frequência, o trabalho no domínio do tempo apresenta como vantagens a velocidade e o tamanho reduzido do modelo, permitindo simular sistemas mais complexos com precisão (Gó-MEZ-ULLATE; ESPINOSA, 2007).

Nesta etapa foi possível antecipar quais resultados e limitações pode-se encontrar na prática, como a resposta do sistema com diferentes sinais de excitação (senoidal gaussiano ou função impulso), atenuação e faixas de frequência de melhor resposta para a aplicação desejada.

A técnica de modelagem por elementos finitos consiste em dividir uma estrutura, ou um sistema, em um conjunto de pequenas regiões denominadas elementos finitos, transformando o domínio contínuo em discreto. Ao conjunto destes elementos dá-se o nome de malha, sendo esta formada por elementos compostos por faces e nós, os quais são pontos de intersecção e ligação entre os elementos.

O FEM dedica-se à busca por soluções em cada elemento separadamente, para que possam ser generalizadas para todo o domínio. Buscar uma função admissível que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio pode ser praticamente impossível em um problema complexo. Para isso, o PZFlex calcula a força/pressão e deformação em um único elemento, transferindo os valores proporcionalmente aos elementos vizinhos (ASSOCIATES, 2009).

Para entender o método, considere-se uma estrutura de um elemento que consiste em nós individuais ligados entre si. No modelo 2D, o elemento terá 4 nós, enquanto que no modelo 3D terá 8 nós como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Estrutura de elementos e nós. a) Modelo 2D. b) Modelo 3D.



Fonte: (ASSOCIATES, 2009)

Observa-se que o PZFlex utiliza elementos lineares simples, ou seja, quadrados e retângulos, e a quantidade de elementos define a acurácia da representação do modelo, garantindo que as forças calculadas nos nós não estejam excessivamente generalizadas. Quanto maior o número de elementos maior a acurácia na modelagem, porém, com muitos elementos corre-se o risco do cálculo computacional demorar muito tempo para ser concluído. Para que o sistema em PZFlex comece a ter um bom desempenho, sugere-se que o modelo tenha pelo menos 12 elementos por comprimento de onda (ASSOCIATES, 2009). Além disso, para se ter simultaneamente bons resultados e processamento computacional reduzido, a construção do modelo deve ser a mais simples e próxima da realidade. Na programação, primeiro definem-se parâmetros da geometria do objeto real, que são convertidos em um formato que o software tenha a capacidade de interpretar. Para isso definem-se os conjuntos de coordenadas x-y-z e i-j-k, os quais estão diretamente relacionados entre si, onde os eixos x, y e z são definidos com as dimensões do modelo, e, os eixos i, j e k, com os nós (elementos) em cada direção ou região do sistema.

Uma etapa importante na programação é a atribuição de material para o objeto, pois quanto mais exatos estiverem os valores das propriedades, mais coerentes os resultados serão com a realidade. Por esta razão o PZFlex possui um arquivo com os materiais mais utilizados ma prática, no qual se permite a inserção de novos materiais ou a alteração das propriedades dos já existentes.

Algo que simplifica significativamente o modelo é a aplicação de condições de contorno. Se o objeto é simétrico e as mesmas condições são aplicadas em ambos os lados, não há necessidade de se projetar a estrutura inteira. É mais eficiente desenhar metade da estrutura, utilizando a condição de simetria. Se o objeto possui, em um dos lados, dimensão infinita, significa que as bordas da estrutura não reflete as ondas, ou seja, ocorre absorção total aplicando-se a condição de absorção das ondas incidentes.

O software possui funções de excitação pré-definidas para aplicação de um esforço de pressão em um dado ponto ou região ou, até mesmo, modelar o deslocamento gerado devido à aplicação de um campo elétrico em um material piezelétrico. Além disso, permite a utilização de um sinal gerado em outros aplicativos, como Matlab ou Excel.

Após definida a geometria do modelo e as condições iniciais, especifica-se quais são os resultados desejados em uma determinada região do modelo, como, por exemplo, deslocamento, corrente, pressão, tensão, dentre outros. A simulação é executada por um tempo total definido, disponibilizando-se toda a informação em um histórico de resultados.

3.1.1 Simulação de Ondas de Lamb Usando o PZFlex

Simulações foram realizadas para uma placa de alumínio imersa em água, pois se trata de um dos sistemas abordados neste trabalho, e no qual os resultados podem ser comparados com os obtidos na análise teórica. Conforme visto no capítulo 2, as curvas de dispersão apresentam as velocidades de fase para cada possível modo de propagação, para um determinado valor do produto frequência-espessura (f.2d).

Do mesmo modo, a simulação é feita para alguns valores de (f.2d), com um pulso ultrassônico se propagando em uma placa, e, a pressão ou deslocamento (longitudinal ou transversal) sendo mensurado em um ponto localizado a uma certa distância conhecida. Para a análise da propagação dos sinais, utiliza-se o método desenvolvido por Alleyne e Cawley (1991) utilizando a Transformada de Fourier bidimensional (2D-FFT).

3.1.2 O Método 2D-FFT

A 2D-FFT descrita nesta seção é uma extensão do método apresentado por Sachse e Pao (1978), em que se determina as velocidades de fase e de grupo para ondas com dispersão em meios sólidos, utilizando-se a fase dos sinais (excitação e ecos). O método consiste em aplicar a Transformada de Fourier bidimensional ao sinal mensurado ao longo de diversos pontos equidistantes na direção de propagação. O sinal de recepção é dado por uma matriz contendo, em cada coluna, o sinal temporal para uma dada posição no espaço.

Primeiramente, aplica-se a Transformada de Fourier temporal (TF1). A partir daí tem-se uma matriz resultante contendo, em cada coluna, o espectro de frequências de cada posição. Nas linhas desta matriz aplica-se a Transformada de Fourier espacial (TF2), resultando na matriz que relaciona amplitude, número de onda e frequência. A transformada de Fourier bidimensional (tempo-espaço) é dada pela equação (ALLEYNE; CAWLEY, 1991):

$$H(k,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x,t)e^{-j(\omega t + kx)} dt dx$$
(80)

considerando propagação ao longo do eixo *x* num dado intervalo de tempo. Na Figura 12 estão esquematizadas as Transformadas de Fourier temporal e espacial sendo aplicadas no sinal de recepção.





Fonte: Elaborada pelo autor

Algumas condições de taxas de amostragem temporal e espacial devem ser obedecidas a fim de se evitar o *aliasing*. A frequência de amostragem temporal deve obedecer o Teorema da Amostragem de Nyquist, em que a frequência de amostragem temporal deve ser maior que o dobro da maior componente espectral significativa do sinal. Outra condição é que a distância entre dois pontos de aquisição ao longo da direção de propagação deve ser menor que a metade do comprimento de onda do sinal.

Para isso, no PZFlex, a frequência de amostragem temporal é igual ao inverso do passo da simulação, logo, quanto maior a frequência de amostragem, menor o passo e, consequente-

mente, maior o tempo de simulação. Para a aquisição dos pontos determina-se uma linha, com pontos inicial e final e se específica o espaçamento entre eles.

3.1.3 Placa Imersa em Água

Apresenta-se a seguir as simulações realizadas para uma placa de alumínio, cujas propriedades são: velocidade longitudinal, $c_l = 6400$ m/s, velocidade de cisalhamento, $c_t = 3100$ m/s, e espessura de 1 mm; imersa em água ($c_f = 1500$ m/s). A placa possui uma dimensão de 160 mm de largura e 400 mm de comprimento. A pressão foi aplicada em um dado ponto da superfície da placa, e, após uma distância conhecida, determinou-se os deslocamentos das partículas, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Esquema de simulação para se obter as curvas de dispersão na placa de alumínio.



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao excitar o sistema com uma função impulso (aproximado por um pulso estreito com uma frequência central de 2 MHz) e aplicar a 2D-FFT à resposta, obtém-se as curvas de dispersão, que relacionam o número de onda *k* e o produto (*f*.2*d*), para todas as frequências até o valor máximo especificado na simulação de 4 MHz. Juntamente com os dados simulados com o PZFlex, observa-se na Figura 14 as curvas teóricas obtidas da relação $k_R = \omega/c_p$ e do método discutido no capítulo 2.

A determinação da pressão/deslocamento foi feita a 0,3 m do ponto de excitação com passos de 0,5 mm. Devido à dispersão, cada componente espectral do sinal se propaga com uma velocidade diferente. Para se avaliar o efeito de atenuação dos modos de Lamb, simulouse o modo antissimétrico determinando-o a 10 mm do ponto de excitação na superfície superior, utilizando-se um sinal senoidal com frequência de 100 kHz modulado por um pulso gaussiano. Foi possível observar o seu comportamento ao longo da distância percorrida na placa. A Figura 15 ilustra os deslocamentos em diferentes tempos, onde é possível observar o decaimento de amplitude do modo propagante.

O mesmo foi verificado para deslocamentos na superfície inferior, pois neste caso temse a condição de simetria, e, as mesmas condições de contorno são aplicadas nas superfícies sólido-líquido.

Figura 14 – 2D-FFT da resposta ao aplicar um sinal impulso no sistema placa de alumínio, de 1 mm de espessura, imersa em água.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 15 – Deslocamento do modo antissimétrico determinado ao longo da propagação na placa imersa em água.



Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme visto no capítulo 2, em sólidos isotrópicos são possíveis dois tipos de ondas, a longitudinal e de cisalhamento. No entanto, em líquidos não viscosos propagam-se somente ondas longitudinais. Se os líquidos são viscosos, além das ondas longitudinais existem as ondas de cisalhamento, que são atenuadas rapidamente. Uma das formas de atenuação é a queda de amplitude do deslocamento simétrico e antissimétrico devido às condições de contorno envolvidas.

3.2 TÉCNICAS NUMÉRICAS POR DIFERENÇAS FINITAS

Nesta seção descreve-se as simulações realizadas no Laboratório UALB-CSIC de Madrid, como parte de um estudo sobre a viabilidade de se gerar o modo QSCH em placas de aço inox, bem como, entender como este modo de propagação se comporta na região de interface placa-fluido.

O Wave 2000 é um software para simulações computacionais na área de ultrassom e que opera solucionando equações de ondas elásticas em duas dimensões (2D), baseando-se no método de diferenças finitas. Apesar de exigir intenso trabalho computacional, este programa é uma ferramenta prática versátil na solução de diversos problemas de ultrassom (CYBERLO-GIC, 2013).

Nesse software, o objeto sob teste por ultrassom é especificado como um arquivo gráfico baseado em pixels. Basicamente este objeto é composto de 256 níveis de cinza, sendo que cada valor de pixel representa um tipo de material (aço, água, etc). Pode-se trabalhar com objetos e imagens projetados no próprio software ou por algum outro programa que forneça arquivos no formato monocromático de 8 bits (KAUFMAN et al., 1999).

O fato do Wave 2000 trabalhar em duas dimensões constitui uma vantagem, pois uma simples interface gráfica, se comparada com desenho 3D, proporciona maior rapidez na geração de soluções. As simulações se aproximam da prática, uma vez que se pode projetar o sistema sob análise com uma configuração similar ao do caso real.

Embora o programa consiga lidar com uma grande variedade de modelos de ultrassom, há também algumas desvantagens como, por exemplo, a necessidade de se projetar o sistema com dimensões reduzidas ao da prática, pois, assim, exige-se menos memória computacional. Para isso, deve-se levar em consideração frequência de operação e a memória RAM disponível (KAUFMAN et al., 1999).

3.2.1 Simulação do modo quase Scholte Usando o Wave 2000

Com o Wave 2000, as simulações foram realizadas para uma placa de aço inox parcialmente imersa em água, pois também é um tipo de sistema abordado neste trabalho para análise do modo quase Scholte. Os resultados serão comparados com a teoria, através das curvas de dispersão envolvendo o número de onda dos modos propagantes para um determinado valor do produto frequência-semi-espessura (f.2d).

Do mesmo modo, a simulação é feita para alguns valores de (f.2d), com um pulso ultrassônico se propagando em uma placa, e, a pressão ou deslocamento (longitudinal ou transversal) é determinado em um ponto localizado a uma certa distância conhecida. Para a análise da propagação dos sinais utiliza-se o método desenvolvido por (ALLEYNE; CAWLEY, 1991) utilizando a Transformada de Fourier bidimensional (2D-FFT).

3.2.2 Placa Parcialmente Imersa em Água

Nesta seção são apresentadas as simulações 2D realizadas para uma placa de aço inox, com comprimento de 155 mm, largura de 10 mm e espessura de 0,1 mm, parcialmente imersa em água. A camada de água tem início a 50 mm da borda da placa, onde está o transdutor de excitação.

As propriedades da placa são: velocidade longitudinal, $c_l = 5885$ m/s, e velocidade de cisalhamento, $c_t = 3405$ m/s; e, a da água é: $c_f = 1500$ m/s. Na extremidade da placa em contato com o ar inseriu-se uma excitação transversal, e, após determinadas distâncias, pontos de análises foram posicionados ao longo da placa para se determinar os deslocamentos das partículas, como se observa na Figura 16.

Figura 16 – Esquema de simulação para a placa parcialmente imersa em água.



O sistema é excitado com uma função pulso quadrado positiva, com amplitude normalizada e com tempo de duração de 0,03 μs (para ser estreito e de banda larga). Aos dados coletados é aplicada a 2D-FFT, obtendo-se a relação entre o número de onda k e o produto (*f.2d*). Os 30 pontos de análise estão posicionados dentro da placa, operando no modo transversal e separados por uma distância de 0,5 mm entre si, de maneira que 15 estão alocados na parte sólido-ar e 15 em sólido-água.

A partir dos sinais adquiridos, preferiu-se graficá-los separadamente para se visualizar os possíveis modos de propagação em cada parte do sistema. Na Figura 17a foi aplicado o método de 2D-FFT à resposta dos 15 pontos de análise dispostos em placa-ar, podendo-se observar a propagação do modo A0. Para efeito de comparação, graficou-se também a sua curva de dispersão teórica, a qual foi apresentada na seção 2.4.
Figura 17 – 2D-FFT da resposta dos 15 pontos de análise posicionados dentro da placa. a) Região placa-ar. b) Região placa-água.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 17b ilustra-se a relação de dispersão, em resposta aos pontos 15 pontos de análise presentes na região placa-água. Quando a onda elástica atinge a superfície ar-água parte da energia do modo A0 é irradiada para o fluido e parte é convertida no modo QSCH.

Ao se analisar todo o conjunto de sinais adquiridos para a placa parcialmente imersa, pode-se observar o resultado na Figura 18. Embora os modos AO e quase Scholte possuem valores de k_R muito próximos, é possível verificar a presença do modo QSCH.

Figura 18 – 2D-FFT da resposta dos 30 pontos de análise posicionados dentro da placa parcialmente imersa em água.



Uma vez que os resultados das simulações estão de acordo com a previsão teórica discutida no Capítulo 2, foi possível verificar a viabilidade de se mensurar experimentalmente os modos de Lamb e quase Scholte. A análise do histórico de dados possibilitou a identificação dos modos propagantes na frequência de excitação, o que facilitou os experimentos na prática. Além disso, pode-se ter uma ideia das dimensões da placa e em quais pontos da superfície se poderia mensurar os deslocamentos sem que as reflexões pudessem interferir de maneira significativa nos resultados. Diante destas observações, deu-se início ao desenvolvimento dos sensores objetivando a aplicação em caracterização de líquidos.

3.3 SISTEMAS EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO

Para identificar a propagação de alguns modos de Lamb e quase Scholte nas placas de alumínio e aço inox, respectivamente, dispositivos de medições foram projetados e desenvolvidos. Para isso, utilizou-se técnicas de emissão como a incidência oblíqua e ondas *shear*. Estes dispositivos possibilitam o acoplamento de ondas guiadas por meio de transdutor excitado com pulso ultrassônico em frequências apropriadas.

Para a realização das medições fez-se o uso de métodos pulsados, os quais são aplicados desde a faixa de MHz até a faixa de GHz e constituem técnicas simples e rápidas, sendo úteis para a fase experimental. Os métodos pulsados empregados foram o de pulso-eco e o de emissão-recepção. Esses métodos podem ser implementados como técnicas de análise não destrutivas e consistem em emitir ondas ultrassônicas curtas no tempo e captar os sinais recebidos. Tratam-se de técnicas rápidas, comum na área de ensaios não destrutivos por ultrassom, e podem ser utilizados um (modo pulso-eco) ou dois (modo emissão-recepção) transdutores (PELLAM; GALT, 1946).

No modo pulso-eco, um pulso ultrassônico é emitido por um transdutor piezoelétrico, e, quando encontra uma superfície refletora, parte ou toda a sua energia é refletida, retornando ao transdutor (MCCLEMENTS; FAIRLEY, 1991). Neste caso, o pulso propaga-se pelo menos duas vezes pela amostra, o que pode ser limitante no caso de uma amostra com atenuação elevada.

Na técnica de emissão-recepção, um transdutor opera como transmissor e o outro como receptor, sendo que, geralmente, o mesmo material é utilizado para o emissor e o receptor. Isso pode não ser ideal, devido às características piezoelétricas de cada material, pois é sabido que determinados materiais operam de maneira mais eficiente como transmissores, e outros, como receptores (KAATZE et al., 1993).

Em ambos os casos é necessário que a superfície de contato entre a amostra e os transdutores seja preenchida com um "agente de acoplamento" que permita a transferência de energia, mas, que elimine o ar entre eles. Algumas das desvantagens em relação aos métodos anteriores são: a necessidade de se manter o paralelismo entre os transdutores durante alguma movimentação e de se medir com precisão a alteração na distância de propagação.

3.3.1 Dispositivo de Medição das Curvas de Dispersão dos Modos de Lamb

Neste trabalho, primeiramente fez-se um estudo da técnica experimental baseada em emissão-recepção com incidência oblíqua da onda propagante. Nesta técnica faz-se o uso de prismas e trilho, ambos produzidos com material polimetil-metacrilato, ou acrílico, no Laboratório de Ultrassom da Feis-Unesp. Os transdutores são fixados nos prismas e o paralelismo entre os mesmos é mantido através de um trilho.

Conforme visto no capítulo 2, em sólidos isotrópicos são possíveis 2 tipos de ondas: a longitudinal e a de cisalhamento. Quando uma onda longitudinal plana, por exemplo, se propaga em um meio material (fluido ou sólido) e atinge obliquamente uma interface plana com um sólido, ondas longitudinal e transversal, ou modos simétrico e antissimétrico, podem ser acopladas à placa, de acordo com o ângulo de incidência ajustado.

De forma análoga à incidência de uma onda plana em uma interface planar entre meios materiais distintos, sabe-se que, de acordo com o ângulo de incidência, a onda pode ser parcialmente refletida e parcialmente refratada (ou transmitida) como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Incidência de um feixe de onda na superfície entre dois meios: o raio incidente é dividido em raio refletido e raio refratado.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os ângulos de incidência são determinados de acordo com a lei de Snell-Descartes, que fornece apenas informação da direção e não da amplitude da onda:

$$k_1 \operatorname{sen}(\theta_I) = k_2 \operatorname{sen}(\theta_T), \tag{81}$$

sendo θ_I o ângulo de incidência, θ_T o ângulo de transmissão, k_1 e k_2 os números de onda referentes ao meio 1 e 2, respectivamente. Substituindo a relação $k_i = \omega/c_i$ para i = 1,2 em (81),

tem-se que:

$$\frac{\omega}{c_1}\operatorname{sen}(\theta_I) = \frac{\omega}{c_2}\operatorname{sen}(\theta_T).$$
(82)

Se $c_1 < c_2$, então $\theta_I < \theta_T$ e o raio transmitido se distancia da normal. Fazendo $\theta_T = 90^\circ$, então θ_I atingirá um valor limite para o qual o feixe refratado emerge tangente a superfície de separação entre os dois meios. Neste caso, o ângulo de incidência é denominado ângulo crítico, e, sendo assim, (82) torna-se:

$$\operatorname{sen}(\theta_c) = \frac{c_1}{c_2}.$$
(83)

Ao considerar o meio 1 como sendo o material acrílico e o meio 2 a placa, (83) pode ser reescrita como:

$$\operatorname{sen}(\theta_c) = \frac{c_{\operatorname{acrilico}}}{c_{\operatorname{placa}}}.$$
(84)

sendo c_{acrilico} a velocidade de fase longitudinal de propagação da onda volumétrica (*bulk*) no acrílico e c_{placa} a velocidade de fase de propagação da onda na placa.

Com esta técnica experimental pretende-se obter a velocidade de fase do modo, simétrico ou antissimétrico, acoplado para uma determinada velocidade de fase da curva de dispersão. As curvas de dispersão apresentam os modos que podem propagar, dependendo da forma de excitação. Ao utilizar um transdutor como fonte, o número de modos de Lamb é pequeno, visto que a fonte possui uma resposta em frequência e abertura espacial finitas, diferente dos casos simulados na validação dos resultados computacionais, nos quais foram utilizadas fontes pontuais.

O ângulo de incidência dos modos a serem acoplados foi obtido utilizando velocidade de propagação no acrílico de $c_{acrilico} = 2700 \text{ m/s}$ e velocidade de propagação no alumínio de $c_{aluminio} = 5400 \text{ m/s}$ para se obter os modos de Lamb simétricos. Esta velocidade de propagação é um valor aproximado obtido para as frequências de excitação que se pretende trabalhar. Um exemplo está ilustrado na Figura 20, em que, para o acoplamento do modo simétrico S0 desde baixas frequências até 1 MHz, a velocidade de propagação é de 5400 m/s, como indica o ponto P1. Utilizando (84) obteve-se o ângulo de incidência de 30°.

Ainda com relação à Figura 20, destaca-se que para a seleção das frequências de excitação de cada modo guiado, além das curvas de velocidade de fase, levou-se em consideração a máxima velocidade de grupo e a região de baixa atenuação.

Para o acoplamento dos modos antissimétricos usou-se um valor de $c_{aluminio} = 6300$ m/s, como indica o ponto P2, obtendo-se um ângulo de incidência de 25° . Embora a escolha da velocidade de propagação e frequência de excitação foi demonstrada com base nos pontos P1 e P2, deve-se enfatizar que, na prática, o que se obtém é uma banda de ângulos e frequências, resultando em uma faixa de velocidade de fase mensurada conforme será mostrado no capítulo 5. Na Figura 21 estão ilustrados alguns prismas de acrílico utilizados para o acoplamento de ondas de Lamb em placa de alumínio.

74

Figura 20 – Seleção de velocidade de propagação para o cálculo do ângulo de acoplamento dos modos guiados, e, de frequência de excitação dos modos guiados. a) Velocidade de fase. b) Velocidade de grupo. c) Atenuação.





Figura 21 – Prismas produzidos em acrílico utilizados para o acoplamento dos modos de Lamb.



Fonte: Elaborada pelo autor

Em razão da necessidade de se manter o paralelismo entre os transdutores no método de emissão-recepção, projetou-se um trilho, também produzido em acrílico, como pode ser observado na Figura 22. No trilho, o prisma com o transdutor emissor é mantido fixo, enquanto que o prisma com o transdutor receptor é colocado na parte móvel.

Figura 22 – Trilho em acrílico utilizado para fixação dos prismas. a) Trilho. b) Trilho com prismas fixados.



(b)



Fonte: Elaborada pelo autor

Os primas são fixados de modo a deixar o trilho suspenso, ou seja, o trilho não entra em contato com a placa, o que elimina a transmissão do modo propagante a partir da placa para outras partes do sensor. Além disso, para se obter maior precisão nos passos de movimentação do transdutor receptor, providenciou-se uma escala em milímetros em uma das bordas do trilho.

3.3.1.1 Arranjo Experimental

Nesta seção descreve-se o arranjo do sistema para a aquisição de dados experimentais. Foram utilizadas placas de alumínio de 1, 2 e 3 mm de espessura e imersas em água, sendo aplicado o método pulsado de emissão-recepção, com o uso dos prismas e trilho em acrílico descritos na seção anterior. As ondas de Lamb foram geradas e recebidas por dois transdutores de banda larga centrada em torno de 5 MHz - produzidos e cedidos pelo Laboratório de Sensores e Atuadores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - acoplados aos prismas de acrílico. Na Figura 23 é apresentado um esquema da configuração experimental.





Fonte: Elaborada pelo autor

Um dos transdutores é excitado com um pulso senoidal de 6 ciclos com envoltória gaussiana e aplitude de 300 mV_{pp} fornecido por um gerador de funções (*Tektronix AFG* 3101). A frequência central do pulso é escolhida de acordo com as bandas de frequência de baixa atenuação obtidas teoricamente. O aparato experimental utilizado em laboratório está ilustrado na Figura 24.

Estes pulsos são amplificados por meio de um amplificador de potência com banda larga modelo 204L (40 W, *Electronics and Innovation*) com o objetivo de alimentar o transdutor emissor. As ondas recebidas pelo outro transdutor são digitalizadas por um osciloscópio digital (*Agilent MSO7014B*) e armazenadas em um computador para o processamento de sinal.

Durante as medições, variou-se a distância entre os transdutores de 15 a 85 mm, com passos de 1 mm. Conforme mencionado anteriormente, os modos simétricos foram excitados usando prismas de acrílico produzidos com ângulo $\theta_c = 30^{\circ}$ enquanto que, para os modos antissimétricos, θ_c foi escolhido como sendo 25°.

3.4 COMENTÁRIOS

As técnicas experimentais e numéricas foram ferramentas importantes para a análise e desenvolvimento do sensor destinado a caracterização de líquidos. Sendo, uma das abordaFigura 24 – Instrumentação e processo de medição usando placa de alumínio imersa em água e prismas de acrílico.



Fonte: Elaborada pelo autor

gens deste trabalho, o desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais para se obter a velocidade de fase e atenuação de sinais experimentais, tornou-se conveniente realizar testes preliminares por meio de simulação.

Conforme descrito neste capítulo, o software PZFlex permite desenvolver sinais sintéticos de excitação do transdutor com características muito próximas dos sinais gerados pelos equipamentos de laboratório. Além disso, é útil na modelagem e análise de estruturas mais complexas que poderão ser investigadas nos próximos trabalhos (como os materiais compósitos).

Durante a modelagem dos sensores para a caracterização de fluidos, a atribuição de propriedades do material e das condições de contorno também contribuiram para que os resultados fossem os mais próximos do caso real. Com os resultados simulados comparados com os teóricos, foi possível verificar a faixa de frequência e a geometria ideal para se trabalhar no sensor, evitando o desperdício de transdutores e de tempo com testes em laboratório.

Com o sensor devidamente elaborado e montado pode-se proceder às medições das bandas de baixa atenuação dos modos guiados. Sendo o sensor para caracterização de líquidos o principal objetivo deste trabalho, preferiu-se descrevê-lo no próximo capítulo abordando-se aspectos de construção do sensor e resultados experimentais.

4 SENSOR PARA CARACTERIZAÇÃO DE LÍQUIDOS

Este capítulo é dedicado à descrição de construção do sensor para caracterização de líquidos, e, à apresentação dos resultados experimentais envolvendo o modo quase Scholte em placa submersa em fluido. Assim como a simulação do modo quase Scholte, os experimentos abordados neste capítulo foram realizados no Laboratório UALB-Madrid/ES.

Na análise da propagação do modo quase Scholte procurou-se avaliar a sua sensibilidade quanto às propriedades do líquido. Para isso foram mensuradas as velocidades de fase de misturas de água e etanol, em diversas concentrações e de alguns líquidos na sua forma pura. Com os dados experimentais foi possível empregar o algoritmo de inversão de dados para caracterização dos líquidos, sendo possível obter o parâmetro densidade e velocidade longitudinal dos fluidos abordados neste trabalho.

4.1 SENSOR PARA CARACTERIZAÇÃO DE LÍQUIDOS MEDIANTE MODO QUASE SCHOLTE

Esta etapa foi realizada no Laboratório UALB-Madrid/ES durante o doutorado sanduíche da autora. Conforme mencionado no capítulo 1, o uso de etanol combustível tem sido crescente no Brasil, e, um problema que pode prejudicar os consumidores é a quantidade de água no etanol acima do valor estabelecido pela ANP. O desenvolvimento de um sensor em guia de onda por ultrassom constitui uma alternativa atraente e de configuração fácil de ser implementada.

Com o objetivo de se elaborar um sensor com aplicação em caracterização de líquidos, testes com placas e transdutores foram realizados para se alcançar uma melhor geometria. Nesta aplicação, escolheu-se trabalhar com o modo quase Scholte, pois, como descrito no capítulo 2, ele pode ser obtido como uma das soluções dos modos antissimétricos. Além disso, pelas suas propriedades, ao propagar-se apenas na interface sólido-fluido, acredita-se que seja um modo de onda mais sensível às características do fluido do que um modo de Lamb.

Para o tipo de aplicação pretendida procurou-se montar um sensor composto basicamente de placa e transdutor, sendo que este fique separado da amostra de fluido não havendo, portanto, a necessidade do sensor estar totalmente imerso. Escolheu-se trabalhar com placas de aço inox uma vez que são mais resistentes a corrosões ou danos quando em contato com diversos tipos de líquidos, e, também, é preferido para se trabalhar com alimentos.

Cegla, Cawley e Lowe (2005) em seus experimentos utilizaram uma placa de alumínio de 0,94 mm de espessura, 200 mm de comprimento e 100 mm de largura e um recipiente suficientemente grande para conter o sistema fluido-placa. Visando elaborar um sensor que

seja prático no manuseio e na aferição da propriedade da amostra, procurou-se investigar as possíveis dimensões do sensor de modo a usar uma pequena quantidade de amostra sem que ocorresse perda de sensibilidade.

Com isso, dúvidas surgiram quanto às dimensões da placa e frequência de operação do transdutor. No UALB haviam disponíveis transdutores longitudinais (*Doppler Electronic Technologies*) de 2 e 5 MHz, que foram utilizados para verificar a possibilidade de acoplamento do modo quase Scholte nas placas de aço inox.

Buscando uma dimensão apropriada da placa, testes foram realizados com placas de 0,1, 0,2 e 0,3 mm de espessura, com comprimento fixo de 150 mm e diferentes larguras, de 100, 50 e 10 mm. Na Figura 25 observa-se o aparato experimental para os testes de desenvolvimento do sensor.

Figura 25 – Testes iniciais para desenvolvimento de sensor para caracterização de líquidos.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os testes começaram com as placas de 100 mm de largura, pois pensava-se que com a placa mais larga, a quantidade de reflexões muito próximas uma das outras seria reduzida. O transdutor de 2 MHz foi ajustado com uma inclinação na borda da placa de modo a possibilitar a propagação do modo quase Scholte. No recipiente de vidro, o qual era relativamente grande podendo-se considerar o meio fluido como infinito, pode-se controlar o nível de água através de uma bomba peristáltica.

Através do Ultrascope-USB, pulsos quadrados de 4 ciclos e com frequência central variando entre 2 e 5 MHz eram enviados ao transdutor que operava no modo pulso-eco. Os sinais recebidos podiam ser visualizados pelo software do Ultrascope-USB. Um algoritmo foi desenvolvido em Matlab para a aquisição de dados, no qual foram configurados comandos de controle do Ultrascope-USB e armazenamento de dados a cada intervalo de tempo.

As medições foram realizadas alterando-se o nível de água por meio de uma bomba peristáltica, a qual foi ajustada para se obter uma mudança de nível. Com os primeiros dados coletados, percebeu-se que o algoritmo para o cálculo de velocidade de fase, velocidade de grupo e atenuação para o modo quase Scholte não estava forncendo corretamente os resultados.

Assim, procedeu-se à correção do algoritmo, pois, sendo o modo QSCH uma conversão do modo de Lamb A0 na interface ar-fluido de uma haste como a mostrada na Figura 16, fez-se necessária uma interpolação de dados do modo A0 em ar com os dados mensurados para se obter o modo QSCH experimentalmente.

Procurou-se analisar o comportamento do modo QSCH nas frequências de excitação de 2, 3, 4 e 5 MHz, com as placas de diferentes espessuras. Desses testes, verificou-se que em placas de espessura de 0,3 mm não era possível acoplar o modo QSCH através da conversão de A0 em QSCH. Assim, se descartou a possibilidade de se trabalhar em valores de f.2d acima de 6 MHz·mm.

Estes procedimentos também foram realizados para as placas com larguras de 50 e 10 mm. Com a análise dos resultados observou-se que se poderia montar um sensor com a placa de espessura 0,1 mm nas dimensões $10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, e, com um transdutor *shear* com frequência próxima a 2 MHz e posicionado em uma das extremidades longitudinais da placa para melhorar o acoplamento do modo A0. Nesta configuração o modo QSCH se apresentou com maior amplitude e pouca sobreposição de reflexões nas bordas laterais da placa ao longo da propagação. Observa-se na Figura 26 a montagem do sensor.





Fonte: Elaborada pelo autor

Baseando-se nas informações obtidas pela simulação do modo quase Scholte, pode-se determinar a faixa de frequência de excitação do sensor, a qual, de acordo com a Figura 18, está entre 1,5 e 3,5 MHz. No laboratório UALB haviam disponíveis cerâmicas piezoelétricas *shear* de 1,7 MHz e de 3,4 MHz, sendo a segunda opção escolhida com a intenção de se excitar o modo em frequências mais altas. Isto se deve ao fato de que, para frequências maiores, as curvas de velocidade de fase estão mais distintas e, portanto, há melhor precisão durante as medições.

Foram utilizadas três piezocerâmicas PZ27 Ferroperm com 3 mm x 4 mm de largura e comprimento, e, 0,26 mm de espessura, as quais foram coladas com cianoacrilato em uma

das bordas da placa de aço inox, sendo esta disposta perpendicularmente a uma das faces da cerâmica piezoelétrica para a excitação do modo antissimétrico. Na face oposta foi colocado um *backing* de material compósito 3-3 de araldite/ar para que a excitação de onda contrária à placa fosse absorvida. Com este mesmo material moldou-se uma pequena caixa com 30 mm de lagura, 20,5 mm de comprimento e 20 mm de altura para envolver o transdutor, de modo a protegê-lo e facilitar o seu manuseio (ver Figura 26).

Fez-se um levantamento da resposta em frequência das piezocerâmicas quando estas estão coladas à placa, obtendo-se uma curva de ressonância típica que proporciona alguns parâmetros importantes. Entre eles, foi possível identificar a frequência de ressonância, como se observa na Figura 27, que corresponde ao valor máximo da parte real da admitância (G) do transdutor.

Figura 27 – Condutância da piezocerâmica PZ27 de 3,4 MHz.



Fonte: Elaborada pelo autor

Como próxima etapa, procurou-se verificar a influência das paredes do recipiente que continha a amostra e a placa, a medida que a distância entre a placa-parede decrescia. Com isso, pôde-se comprovar que para distâncias menores de 5 mm entre placa-parede, o valor da amplitude do modo QSCH dimunui significativamente chegando a desaparecer.

Considerando que o recipiente da amostra pode influenciar na propagação do modo QSCH, no Laboratório UALB foi produzido um recipiente com material a base de silicone com uma impedância de 1,5 MRayls, próxima à da maioria dos líquidos para diminuir a reflexão de ondas nas paredes. O diâmetro interno é de 16 mm e capacidade de 9 ml de amostra. Na Figura 28 estão ilustrados o recipiente para a amostra e o sensor baseado no modo QSCH.

Este tipo de material, o silicone, por ser mais flexível que o vidro ou o acrílico, ajuda a amortecer as vibrações externas que podem influenciar na movimentação do fluido durante as medições. Abaixo do recipiente foi adaptada uma mangueira, também de silicone, para a entrada e saída da amostra líquida.



Figura 28 – Sensor baseado no modo QSCH e recipiente em silicone para amostras.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.1 Processamento de sinais para cálculo de velocidade de fase experimental

Experimentos foram realizados com uma placa de aço inox de 0,1 mm de espessura parcialmente imersa em sua extensão num fluido contido dentro de um recipiente, e, perpendicular à superfície livre do líquido. Na Figura 29 observa-se um esquema da configuração experimental.





Fonte: Elaborada pelo autor

A placa possui 10 mm de largura e 150 mm de comprimento, e, a capacidade do recipiente é de 9 ml. O transdutor *shear* de frequência central 3,4 MHz foi colado no topo da placa. O sensor constituido por placa e transdutor pode ser observado na Figura 30.

O sensor foi fixado a uma haste com altura fixa, de modo que seu comprimento longitudinal permanecesse perpendicular à superfície do fluido. O recipiente com a amostra do líquido foi mantido em temperatura constante, de 20° C com uma precisão de 0,1 °C, introduzindo-

Fonte: Elaborada pelo autor

o em um controlador de temperatura a banho térmico. O aparato experimental utilizado em laboratório está ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Aparato experimental com o sensor baseado no modo quase Scholte utilizado nas medições.



Fonte: Elaborada pelo autor

O transdutor foi excitado com pulsos quadrados com 4 ciclos através do *Ultrascope-USB (Dasel)* e com frequência de 2,2 MHz. O *Ultrascope-USB* também adquire o sinal de eco refletido na extremidade longitudinal da placa e o armazena no computador para processamento. Um exemplo de um sinal temporal recebido pelo transdutor e seu espectro em frequência está ilustrado na Figura 32a e Figura 32b, respectivamente.

Como se observa, no sinal temporal adquirido estão presentes os modos A0 em água, o modo QSCH e algumas reflexões. Durante os experimentos verificou-se que o modo A0 em água decai em amplitude a medida que o nível da amostra segue aumentando dentro da cubeta. Além disso, o modo A0 está em uma frequência distinta a do modo QSCH, sobre o qual não exerce influência significativa. Logo, para se eliminar outros pulsos que aparecem durante a aquisição, e, assim, eliminar as frequências indesejadas, foi aplicada uma janela gaussiana (linha tracejada) que translada no tempo de acordo com a máxima amplitude do sinal adquirido.

84



Figura 32 – Sinal temporal adquirido pelo sensor para caracterização de líquidos.

Fonte: Elaborada pelo autor

Como resultado, o sinal está ilustrado na Figura 32c, e, seu espectro pode ser observado na Figura 32d.

Com o sinal janelado pôde-se porceder ao cálculo da velocidade de fase, o qual é obtido através da diferença de fase entre os sinais adquiridos. Para isso, o nível da amostra do fluido em contato com a placa foi variado lentamente adicionando ou removendo líquido. Usando esta técnica, mensurou-se os ecos do modo QSCH a cada intervalo de tempo de propagação, ou seja, com aumento do nível da amostra a distância de propagação do modo também se alterava, sendo possível obter o modo QSCH em diferentes instantes de tempo. Os cálculos serão apresentados a continuação. As aquisições levavam cerca de 3 minutos para cada amostra.

A partir das formas de onda adquiridas, são obtidas as curvas de velocidadede fase em função da frequência. O tempo de trânsito das ondas recebidas muda como resultado de diferentes comprimentos de propagação do modo A0 e QSCH através da placa conforme o nível de fluido é alterado. Na sequência, sucessivas *fft* de 2048 pontos foram realizadas e a partir da fase obtida, calculou-se a velocidade de fase experimental. A partir *fft* pode-se eliminar outros modos de propagação que podem aparecer separados em frequência, como o modo A0 em água que pode ser observado na Figura 32.

Nesta etapa, deve-se considerar a conversão de modos entre o modo A0 em ar e o modo quase Scholte. O modo antissimétrico A0 (acoplado em sólido-ar) ao ser excitado, se propaga

ao longo da placa até atingir a interface do líquido. Uma parte da energia do modo A0 é refletida para o transdutor e outra parte é transmitida pela placa submersa como ondas A0 (acoplado em sólido-água) e QSCH. A primeira é atenuada por radiação para o fluido, e somente o modo quase Scholte retorna depois de atingir a extremidade da placa e sofrer reflexões.

Logo, considerando a diferença de fase $\Delta \Phi = -\omega \Delta t$, a varição de tempo experimental corresponde a soma entre a variação de tempo do modo A0 (Δt_A) e do modo QSCH (Δt_S), e, que a velocidade dos modos de propagação correspondem a $c_A = \Delta x_A / \Delta t_A$ e $c_S = \Delta x_S / \Delta t_S$, respectivamente, tem-se que:

$$\Delta t_{exp} = \Delta t_A + \Delta t_S = \frac{\Delta x_A}{c_A} + \frac{\Delta x_S}{c_S} = -\frac{\Delta \Phi}{\omega}.$$
(85)

Rearranjando os termos de (85) e assumindo que $\Delta x_A = -\Delta x_S$ e $\Delta x_A + \Delta x_S = \Delta x_{exp} = 0$, tem-se que:

$$\frac{1}{c_S} = \frac{1}{c_A} - \frac{\Delta \Phi}{\omega \Delta x_{exp}},\tag{86}$$

a partir do qual pode-se determinar a velocidade de fase experimental como $c_{exp} = -\Delta x_S \omega / \Delta \Phi_{exp}$, resultando na equação da velocidade de fase do modo QSCH experimental dada por:

$$c_S = \frac{c_A c_{exp}}{c_A + c_{exp}}.$$
(87)

O pós-processamento de sinais demorava cerca de 2 minutos para fornecer os resultados. Mensurando-se a velocidade de fase do modo QSCH, pretende-se usá-la na técnica de inversão de dados, a qual constitui uma das propostas para esta tese de doutorado, para se determinar propriedades do fluido.

Baseando-se nessas técnicas experimentais e numéricas descritas no capítulo 3, pôde-se obter resultados que serão abordados nas próximas seções. Tendo como objetivo o desenvolvimento de um sensor para caracterização de líquidos, buscou-se uma alternativa para se obter algum tipo de parâmetro da amostra. Para isto, a proposta foi a implementação de um algoritmo de inversão de dados, o qual será descrito na próxima seção. Este algoritmo fornece os valores da densidade e da velocidade longitudinal no fluido usando como dado de entrada a velocidade de fase experimental do modo QSCH.

4.2 O ALGORITMO DE INVERSÃO DE DADOS

Para a completa caracterização dos líquidos, desenvolveu-se o algoritmo de inversão de dados (AID), o qual consiste em fornecer a densidade e a velocidade longitudinal da amostra em análise, a partir de dados experimentais da velocidade de fase do modo QSCH.

Conforme apresentado no capítulo 2, a técnica numérica elaborada para a obtenção das curvas de dispersão teóricas atua na busca de soluções da equação determinantal (74), resultando nas curvas de velocidade de fase, de grupo e na de atenuação. Como pode ser observado na seção 2.3.2, (74) é constituída por parâmetros relacionados aos materiais que compõem a placa (velocidade longitudinal e de cisalhamento, densidade e espessura), e o fluido (densidade e a velocidade longitudinal de propagação).

Na técnica numérica empregada para se obter as curvas de dispersão, os valores dos parâmetros da placa e do fluido são informados, e, então, é feita uma busca por soluções de número de onda (k), para cada frequência, que tornam (74) igual a zero. No algoritmo de inversão são fornecidos os valores de k, os quais são obtidos experimentalmente, e os parâmetros da placa, sendo, agora, a densidade e a velocidade longitudinal de propagação do fluido as incógnitas que tornam (74) nula. Portanto, isso constitui o processo inverso ao que vinha sendo realizado, esta é a razão pela qual recebe o nome de algoritmo de inversão de dados.

Sabendo-se que a velocidade de fase experimental pode apresentar variações durante as medições, primeiramente procurou-se testar o algoritmo fornecendo como dado de entrada a velocidade de fase teórica do modo QSCH para a água, deixando o parâmetro densidade como uma incógnita a ser buscada. Isso possibilitou também saber sobre a funcionalidade da técnica numérica utilizada.

A princípio os testes foram realizados através de programas computacionais não totalmente automatizados, e, que dependiam da intervenção do operador na tomada de decisões para a busca em determinados intervalos de valores de densidade de água e etanol puros. Embora estes primeiros testes demandaram várias linhas de programação e, consequentemente, maior tempo de processamento, foram importantes para se verificar a viabilidade da elaboração do algoritmo. Uma vez que os resultados pareciam estar de acordo com a teoria, procurou-se novas alternativas para a busca automática de soluções no algoritmo de inversão de dados. As técnicas de otimização constituiram uma boa ferramenta para este caso.

As técnicas de otimização são apropriadas para a formulação e busca de soluções de problemas no sentido de otimizar algum critério de decisão. Normalmente, as decisões a serem tomadas estão sujeitas a restrições, já que, nem todas as decisões possíveis são aceitáveis. Para se resolver matematicamente um problema de otmização é necessário que ambas, função objetivo e restrições, sejam quantificadas, o que não constitui dificuldade para a aplicação deste trabalho.

Existem diferentes métodos de otimização para se aplicar a um problema. A escolha do modelo apropriado é importante, pois a dificuldade de se resolver o problema depende da categoria na qual o modelo está inserido. Para a escolha do método de otimização, algumas escolhas quanto ao tipo de problema em questão foram adotadas: primeiro, foi necessário identificar o tipo de função objetiva, como, por exemplo, linear, quadrática, soma dos quadrados ou não linear. Através de (74) obteve-se a equação do determinante, pela qual verficou-se que

é do tipo não linear, pois apresenta produto entre variáveis; a seguir, classificou-se a restrição do problema dentre os tipos: sem restrições, limitado, linear e discreto. Sendo a variável a ser minimizada (densidade do fluido) conhecida dentro de uma faixa de valores (entre *X* e *Y* kg/m³) para os líquidos utilizados neste trabalho), então, o tipo de restrição foi classificada como limitada.

Um método de otimização indicado para este tipo de problema abordado é o método do ponto interior, o qual é caracterizado por resolver problemas de otimização não linear fazendo iterações do tipo Newton nas variáveis do projeto. A sua formulação permite trabalhar tanto com pequenos quanto grandes problemas, e satisfaz os limites a cada iteração. O método é caracterizado por ser um algoritmo de direções viáveis, pois, a cada iteração, define-se uma direção que é viável a restrições de desigualdade para a função objetiva. Os métodos de direções viáveis têm vantagens importantes para otimização de projeto de engenharia, sendo que sempre produzem um arranjo viável em cada iteração, de modo que qualquer solução recebida durante o processo iterativo pode ser empregada (HERSKOVITS,).

No algoritmo de inversão, a minimização da função objetiva usando o método do ponto interior é realizada pela função *fmincon* do software Matlab e se inicia a partir de um ponto inicial x_0 dentro da região factível (interior). Esta região é definida quando se estabelece os limites inferior e superior das restrições relacionadas às variáveis que se deseja encontrar (densidade e velocidade longitudinal). Assim, o ponto inicial x_0 foi estabelecido como sendo o limite inferior das restrições. A busca de solução iterativa segue uma trajetória que alcança a solução ótima depois de algumas iterações.

De acordo com a Figura 4, observa-se que o valor da velocidade de fase está relacionado com a frequência, e, uma vez que a velocidade de fase é obtida experimentalmente, ambos são inseridos como dado de entrada para o algoritmo. Deve-se mencionar que não é apenas um par de velocidade de fase e frequência que é inserido no programa, mas uma faixa de valores, sendo, assim, possível verificar a funcionalidade do algoritmo.

A solução numérica para o algoritmo foi obtida segundo os passos a seguir:

- Determina-se o intervalo de frequência, escolhida segundo a banda de frequência experimental, para que sejam inseridos os valores de velocidade de fase experimentais no algoritmo;
- Para cada valor de frequência se coloca o valor da velocidade de fase como dado de entrada na equação (74) do modo antissimétrico;
- A minimização do problema é realizada usando a função *fmincon* no software Matlab, e, se inicia de acordo com o ponto inicial x₀, encontrando valores de densidade e velocidade longitudinal para cada valor frequência e seu respectivo valor de velocidade de fase;

• Por fim, são calculados os valores médios de densidade e velocidade longitudinal do fluido para toda a faixa de frequência escolhida.

Com as primeiras medições experimentais usando o sensor para a caracterização de líquidos foi possível conhecer a faixa de frequência em que a velocidade de fase é mensurada. Conhecendo-se esta região, pode-se usá-la para inserção de dados no algoritmo. Os primeiros resultados foram obtidos idealizando um fluido cujos valores de densidade e velocidade longitudinal estão próximos a de um fluido aquoso do tipo água. Sabe-se que os dados experimentais podem apresentar uma variação de valores, seja por influência da temperatura ou por movimento de líquido próximo à placa. Por esta razão, procurou-se fazer uma análise quanto à precisão do algoritmo de inversão. Para isso, dados teóricos obtidos de métodos numéricos empregados foram utilizados.

4.2.1 Análise teórica de erro

O teste teórico do algoritmo foi realizado supondo um fluido aquoso com características próximas à da água. Suas propriedades são densidade $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$ e velocidade longitudinal $c_f = 1500 \text{ m/s}$. Na prática os valores de ρ_f e c_f , para um único fluido, podem variar conforme alguns parâmetros, como a temperatura e a pureza. Tratando-se de um teste, considerou-se um fluido de forma geral. Procurou-se avaliar em qual porcentagem de variação de velocidade de fase (c_p) na frequência de 2,2 MHz, ocasionaria um erro significativo na obtenção de velocidade longitudinal (c_f) e na densidade (ρ_f) do fluido. Em 2,2 MHz a velocidade de fase teórica do modo QSCH para a água destilada é igual a 1229,80 m/s. Este parâmetro foi variado conforme as porcentagens indicadas na Tabela 1, na qual os resultados para $c_f e \rho_f$, obtidos pelo algoritmo de inversão, também estão relacionados.

Como se observa, nesta primeira análise a porcentagem de erro aparentemente se torna significativa para uma variação de ±1 % na velocidade de fase, em que o erro para a densidade está em torno de 10 %. Na sequência, a velocidade longitudinal do fluido foi mantida fixa em $c_f = 1500$ m/s e a densidade permaneceu como uma variável para a otimização. Na Tabela 2 estão apresentados os resultados para ρ_f .

Nesta análise, observa-se mais uma vez que a variação de ±1 % na velocidade de fase proporciona um erro mais significativo nos resultados de densidade. Numa terceira análise, a densidade foi mantida fixa em $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$ e a velocidade longitudinal do fluido permaneceu livre para busca pelo algoritmo. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

%	$c_p (\text{m/s})$	Vel. Long. Fluido (m/s)	Erro (%)	Densidade (kg/m ³)	Erro (%)
+0.001	1229,8123	1500,04	0,003	999,88	0,012
±0,001	1229,7877	1499,96	0,003	1000,08	0,008
+0.010	1229,9229	1500,44	0,029	998,93	0,107
±0,010	1229,6770	1499,58	0,028	1001,03	0,103
+0.050	1230,4149	1502,13	0,142	994,72	0,528
±0,030	1229,1851	1497,85	0,144	1005,21	0,521
+0.100	1231,0298	1504,32	0,288	989,54	1,046
$\pm 0,100$	1228,5702	1495,73	0,284	1010,45	1,045
0.500	1235,9490	1522,12	1,475	947,84	5,216
±0,300	1223,6510	1479,14	1,391	1052,32	5,232
+1.000	1242,0980	1545,74	3,049	895,66	10,434
±1,000	1217,5020	1459,39	2,707	1104,87	10,487

Tabela 1 – Análise de erro de velocidade longitudinal e densidade do fluido para variações de velocidade de fase na frequência de 2,2 MHz.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 2 – Análise de erro de densidade do fluido, mantendo a velocidade longitudinal do fluido fixo em $c_f = 1500$ m/s. Variações de velocidade de fase na frequência de 2,2 MHz.

%	$c_p (m/s)$	Densidade (kg/m ³)	Erro (%)
+0.001	1229,8123	999,84	0,016
±0,001	1229,7877	999,99	0,001
+0.010	1229,9229	998,37	0,163
±0,010	1229,6770	999,89	0,010
0.050	1230,4149	991,84	0,816
±0,030	1229,1851	999,49	0,050
+0.100	1231,0298	983,72	1,628
±0,100	1228,5702	998,99	0,100
0.500	1235,9490	919,96	8,004
±0,300	1223,6510	994,99	0,500
+1.000	1242,0980	843,31	15,669
±1,000	1217,5020	989.99	1,000

Fonte: Elaborada pelo autor

%	$c_p (m/s)$	Vel. Long. Fluido (m/s)	Erro (%)
+0.001	1229,8123	1500,0037	0,0002
±0,001	1229,7877	1499,8827	0,0078
+0.010	1229,9229	1500,0375	0,0025
±0,010	1229,6770	1498,8138	0,0791
+0.050	1230,4149	1500,1874	0,0125
±0,030	1229,1851	1494,1229	0,3918
+0.100	1231,0298	1500,3747	0,0250
$\pm 0,100$	1228,5702	1488,3928	0,7738
+0.500	1235,9490	1501,8715	0,1248
±0,300	1223,6510	1447,2611	3,5159

Tabela 3 – Análise de erro de velocidade longitudinal do fluido, mantendo a densidade fixa em $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$. Variações de velocidade de fase na frequência de 2,2 MHz.

Fonte: Elaborada pelo autor

Neste caso, pode-se considerar que a velocidade longitudinal do fluido apresentou erros menores se comparado com os valores obtidos para densidade. Porém, também observa-se que para variações em ± 1 % na velocidade de fase o erro se torna significativo.

4.3 O MODO QUASE SCHOLTE NA CARACTERIZAÇÃO DE LÍQUIDOS

Os primeiros experimentos com o sensor QSCH foram realizados para se avaliar a sensibilidade do modo quase Scholte para a caracterização de fluidos. Para isso, mensurou-se a sua velocidade de fase em distintas amostras conforme será discutido nesta seção. Sendo o propósito deste trabalho o desenvolvimento de um sensor prático e robusto para a detecção de adulteração do etanol combutível, foram preparadas e testadas amostras de água destilada e misturas de etanol-água. As medições de velocidade de fase de diferentes concentrações de etanol em água foram obtidas em função da frequência.

O modo quase Scholte pode ser excitado como uma conversão modal do modo A0 (CEGLA; CAWLEY; LOWE, 2005). Para isso, o modo A0 se propaga através da placa no ar até atingir a interface do fluido. Neste ponto, parte da energia do modo flexural é convertida em modo A0 de fuga, o qual é altamente atenuado como se observa na Figura 9, e, em modo QSCH. Acredita-se que este modo possui energia suficiente para ser sensível às propriedades do fluido.

Portanto, depois do modo quase Scholte se propagar através da parte submersa da placa, informações sobre as características do fluido podem ser obtidas. As similaridades entre os perfis de deslocamento e *stress* observadas na Figura 10, apontam que a conversão modal entre os modos A0 e QSCH pode facilmente acontecer. A partir do perfil de modos pode-se verificar também que uma substancial fração de energia do modo A0 (em sólido-fluido) é irradiada para o fluido.

4.3.1 Resultados

As curvas de dispersão são obtidas usando o processamento de sinais descrito na seção . Deve-se considerar que no sensor há a propagação do modo A0 em placa/ar e do modo QSCH em placa/fluido. Assim, fez-se uma interpolação do dado experimental com a frequência do modo A0 em ar e calculou-se a velocidade de fase do modo QSCH considerando, também, a do modo antissimétrico em placa/ar.

As amostras de mistura de água e etanol foram preparadas com base na porcentagem em massa, ou seja, calculou-se as massas de água e de etanol necessárias para cada valor de concentração e, com o auxílio de uma balança de precisão, fez-se as misturas. Para isso, foram utilizados água destilada pelo sistema de purificação *PureLab UHQ system (Elga)* e etanol (Quimivita - 99,9 %).

Para uma medição mais precisa mensurou-se a densidade de cada amostra com um densímetro Anton Paar DMA 4100 (acurácia de $0,1 kg/m^3$), sendo possível saber com maior precisão a porcentagem de água contida no etanol. O cálculo de concentração das amostras foi obtido com o auxílio do manual Lide (2010), o qual contém valores de concentrações e densidades para misturas de 0% a 100% de água em etanol. Os resultados teóricos e experimentais para água e concentrações de etanol-água são apresentados juntos na Figura 33.





Observa-se que os resultados experimentais estão de acordo com o modelo teórico. Pe-

quenas discrepâncias encontradas nos dados de velocidade de fase podem ser originadas pelas diferenças entre os valores reais e teóricos dos materiais usados no modelamento, e também, por imperfeições e movimento de fluido na superfície da placa.

Nos resultados da atenuação experimental houve uma grande diferença com relação às curvas teóricas. Os valores ficaram mais altos e com grande influência de ruído. Nesta análise considera-se apenas a soma entre as atenuações do modo A0 em ar e do modo QSCH. Acredita-se que para a melhoria do cálculo deve-se considerar a fuga de energia na interface ar/líquido, pois, como se observa na Figura 16, há uma maior intensidade de propagação de onda no fluido.

A concordância entre os dados teóricos e os primeiros resultados experimentais tornouse um indicativo de que o sensor pode ser usado na caracterização de líquidos. Com os resultados obtidos até esta etapa foi proposta a elaboração de um método capaz de fornecer propriedades do líquido, como concentração ou densidade, a partir dos dados experimentais da velocidade de fase do modo QSCH.

Através do modelamento teórico pôde-se identificar os parâmetros do fluido que variam em cada amostra (densidade, velocidade longitudinal), e, através de uma inversão de dados, ou seja, a partir dos dados experimentais de velocidade de fase, pretende-se calcular essas propriedades do fluido.

4.3.2 Aplicação do Algoritmo de Inversão de Dados

Para a aplicação do algoritmo de inversão de dados foram realizadas medições de velocidade de fase como o sensor quase Scholte utilizando líquidos puros. Os fluidos etilenoglicol (Synth, 99 %), álcool n-propílico (Nuclear, 99,5 %), ácido acético (Nuclear, 99,5-100,5 %) e ácido láctico (Nuclear, 84,5 %) possuem propriedades bem conhecidas na literatura, e, as que são de interesse para este trabalho (velocidade longitudinal e densidade), estão relacionadas conforme a Tabela 4.

Líquido	Velocidade Longitudinal (m/s)	Densidade (kg/m ³)
Etilenoglicol ¹	1657	1100
Álcool n-propílico ¹	1207	807
Ácido Acético ²	1140	1052
Ácido Láctico ¹	1554	1206

Tabela 4 – Propriedades de líquidos puros a 25°C.

Fonte: ¹(HYDRO, 2015), ²(KHAN; SUBRAHMANYAM, 1972)

Os procedimentos experimentais para os líquidos puros foram conduzidos da mesma forma como descrito na seção 4.3.1, porém, mantendo as amostras em temperatura constante de 25°C. Na Figura 34 estão ilustradas as velocidades de fase mensuradas para cada tipo de líquido. Para se avaliar o sensor quase Scholte quanto à sua precisão durante as medições, foram

realizadas 10 medições para cada amostra. Com os valores de velocidade de fase mensurados na faixa de frequência de interesse, que está entre 1,9 MHz e 2,3 MHz, calculou-se uma variação máxima de 0,67 % com relação aos seus valores teóricos.





As velocidades de fase mensuradas foram armazenadas em banco de dados para serem inseridas como dado de entrada para o algoritmo de inversão. No AID o parâmetro viscosidade foi mantida fixa na ordem de 10^{-3} Pa.s, e, com isso, segundo (30) e (31), observa-se que a ordem de grandeza do produto frequência-viscosidade é de 10^6 Pa. Considerando os valores de velocidade de propagação, frequência e viscosidade utilizados neste trabalho, percebe-se que o produto frequência-viscosidade está na ordem de 10^5 Pa. Logo, baixos valores de viscosidade não proporcionam influências significativas nos resultados.

Os resultados obtidos para a densidade e velocidade longitudinal do fluido são apresentados na Tabela 5. Realizando-se uma comparação com os valores teóricos de c_f e ρ_f para cada tipo de líquido calculou-se a porcentagem de erro, a qual está relacionada na tabela.

Como se observa, os resultados de $c_f e \rho_f$ apresentados através do algoritmo de inversão de dados estão próximos dos valores teóricos. Segundo os valores de erros experimentais obtidos na Tabela 5, os erros máximos de densidade (<3 %) e de velocidade longitudinal (<0,5 %) correspondem a uma incerteza entre 0,1 e 0,5 % nos resultados de velocidade de fase do modo QSCH.

Com isso, pôde-se proceder com a análise das amostras de misturas de água e etanol nas concentrações de 10 % a 100 %, cujas velocidades de fase mensuradas estão ilustradas na Figura 33. Os resultados obtidos através do AID são apresentados na Tabela 6.

Líquido	Vel. Long. (m/s)	Erro(%)	Densidade (kg/m ³)	Erro (%)
Etilenoglicol	1654,10	0,18	1067,70	2,94
Álcool n-propílico	1208,00	0,08	802,40	0,57
Ácido Acético	1140,30	0,03	1051,00	0,09
Ácido Láctico	1560,80	0,44	1192,70	1,10

Tabela 5 – Resultados para velocidade longitudinal e densidade usando o algoritmo de inversãode dados para líquidos puros.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 6 – Resultados para velocidade longitudinal e densidade usando o algoritmo de inversão de dados para concentrações de etanol em água entre 10 % e 100 %.

Concentraçãos	Vel. Long. (m/s)	Densidade (kg/m ³)		$\mathbf{Erro}(0/2)$
Concentrações	Experimental	Densímetro	Experimental	LII0 (%)
7,57 %	1521,30	985,40	984,87	0,05
16,14 %	1601,90	973,80	972,99	0,08
23,85 %	1654,40	963,00	963,99	0,10
33,64 %	1620,60	947,10	946,63	0,05
42,30 %	1540,20	930,30	929,96	0,04
52,28 %	1479,10	908,70	908,92	0,02
74,30 %	1336,20	857,20	859,11	0,22
97,39 %	1175,60	796,80	796,34	0,06

Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos dados experimentais de densidade pode-se calcular a concentração da amostra em análise utilizando o software AlcoDens. Este programa substitui os cálculos manuais que normalmente são feitos em conjunto com as tabelas de propriedades de álcoois, como, por exemplo, a densidade. Dentre as funcionalidades é possível obter a concentração de etanol relacionando a temperatura e a densidade da amostra (SOFTWARE, 2015).

No AlcoDens todos os valores de densidade e concentração do etanol estão de acordo com a Tabela Internacional de Alcoometria, a qual é atualizada e revisada pela ANVISA para fins de controle e qualidade de produtos (AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANI-TÁRIA - ANVISA, 2010). Na Tabela 7 estão relacionados os valores de concentrações obtidos por meio do densímetro e o valor estimado pelo algoritmo usando os resultados experimentais obtidos pelo sensor QSCH para a caracterização de líquidos.

Uma característica limitante das misturas de etanol e água é que para concentrações entre 0 % e 50 %, aproximadamente, há o problema de ambiguidade de leitura da relação entre a velocidade longitudinal e a concentração. Como se observa na Figura 35, uma dada velocidade longitudinal no fluido pode corresponder a dois valores de concentrações. No método abordado neste trabalho não ocorre este problema, pois nos cálculos leva-se em consideração a densidade da mistura, a qual é única para cada amostra.

% m/m (densímetro)	% m/m (AID)	Erro (%)
7,57	7,91	0,34
16,14	16,65	0,51
23,85	23,37	0,48
33,64	34,08	0,44
42,30	42,51	0,21
52,28	52,18	0,10
74,30	73,55	0,75
97,39	97,68	0,29

Tabela 7 – Resultados do cálculo de concentração de 10 % a 100 % usando o software Alco-Dens.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 35 – Gráfico de velocidade longitudinal e densidade versus concentração.



Sendo a proposta para este trabalho a aplicação do sensor quase Scholte em caracterização de líquidos, mais especificamente em adulteração de etanol, fez-se também experimentos com concentrações de etanol em água na faixa de 90 % a 100 %. As concentrações foram preparadas variando a quantidade de etanol em 1 % dentro da faixa pretendida. As velocidades de fase mensuradas a temperatura de 20 °C estão ilustradas na Figura 36.

Fornecendo as velocidades de fase mensuradas como dado de entrada para o algoritmo de inversão pode-se obter os valores de velocidade longitudinal e densidade para cada mistura de etanol e água. Juntamente com os resultados obtidos pelo algoritmo estão os valores de densidades obtidos através do densímetro para cada concentração, sendo possível observar a porcentagem de erro como mostra a Tabela 8.

Novamente utilizou-se o software AlcoDens calcular a concentração das amostras. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 9, a qual também relaciona os valores de concen-





trações obtidos por meio do densímetro e o valor estimado pelo algoritmo.

Os resultados obtidos para a concentração a partir da densidade fornecida pelo algoritmo de inversão de dados apresentam um erro absoluto máximo de 0,86 %, o que corresponde a um erro absoluto médio de 0,43 %. Essas incertezas podem estar relacionadas à algumas melhorias que o algoritmo ainda necessita, tal como inserir a atenuação para o cálculo da densidade e velocidade longitudinal.

Algumas fontes de erros foram investigadas para que o sensor possa ser mais preciso. Conforme já mencionado as medições de velocidade de fase do modo QSCH apresentam uma variação de 0,67 %, cuja causa está relacionada aos ruídos no sinal temporal adquirido que provoca incerteza na detecção do pico de amplitude. Outro fator é a distância entre os níveis do fluido em que é realizada a aquisição, a qual foi efetuada de forma contínua e automatizada. Os intervalos de aquisição foram calculados baseando-se na velocidade de mudança de nível, obtendo-se um valor aproximado.

Embora os resultados experimentais estejam em concordância com o valores reais, algumas incertezas podem ser minimizadas. Para isso, pode-se procurar fazer medições com

Concentrações Vel. Long. (m/s) Densidade (kg/m ³)		de (kg/m ³)	$\mathbf{Erro}(0/2)$	
(% m/m)	Experimental	Densímetro	Experimental	L110 (%)
85,58 %	1289,6	829,5	828,4	0,13
86,54 %	1279,4	827,0	828,2	0,15
87,73 %	1272,5	823,9	822,7	0,15
89,12 %	1264,4	820,3	821,5	0,15
90,29 %	1248,0	817,2	819,4	0,27
91,53 %	1238,9	813,7	813,0	0,08
92,61 %	1233,3	810,8	809,1	0,21
93,79 %	1221,2	807,5	809,2	0,21
95,17 %	1213,1	806,6	803,3	0,41
95,83 %	1208,9	801,7	801,9	0,03

Tabela 8 – Resultados para velocidade longitudinal e densidade usando o algoritmo de inversãode dados para concentrações de etanol em água entre 90 % e 100 %.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 9 – Resultados do cálculo de concentração de 90 % a 100 % usando o software Alco-Dens.

% m/m	% m/m	
(densímetro)	densidade	Erro (%)
	experimental	
85,58	85,97	0,39
86,54	86,05	0,49
87,73	88,17	0,44
89,12	88,63	0,49
90,29	89,43	0,86
91,53	91,81	0,28
92,61	93,22	0,61
93,79	93,20	0,59
95,17	95,30	0,13
95,83	95,78	0,05

Fonte: Elaborada pelo autor

intervalos de tempo definidos, em que a mudança de nível se estabilize por um instante até que o sinal seja adquirido.

Em uma análise da velocidade longitudinal do fluido, obtida pelo algoritmo de inversão de dados, houve dificuldade em se fazer uma comparação com dados da literatura, pois os trabalhos encontrados que envolvem misturas de água e etanol em alta concentração usam temperaturas e etanol com grau de pureza diferentes do que se utilizou neste trabalho.

Uma alternativa para se verificar se os resultados de velocidade longitudinal estão coerentes foi fazer uma curva de ajuste para analisar o seu comportamento conforme está ilustrado na Figura 37.





Fonte: Elaborada pelo autor

A curva de ajuste da Figura 37a foi obtida pelos dados experimentais e observa-se que está coerente com os valores obtidos pelo densímetro. Observando-se a curva de ajuste da velocidade longitudinal na Figura 37b, verifica-se que os dados experimentais estão próximos do valor ajustado. Com isso, pode-se assumir a hipótese de que o ajuste está mais perto dos dados reais, o que permite relacionar a velocidade longitudinal com a concentração de forma mais precisa.

Ainda nessa figura estão os dados obtidos por Figueiredo et al. (2012), os quais fizeram medições de altas concentrações de misturas de etanol e água usando a técnica volumétrica por ultrassom. Como se observa, a reta de ajuste calculada neste trabalho possui uma tendência similar à obtida por Figueiredo et al. (2012). A diferença entre os valores de velocidade se deve ao fato das medições terem sido realizadas a uma temperatura de 22.8 °C e com etanol com grau pureza diferente do que foi abordado neste trabalho.

Portanto, procurou-se fazer um novo cálculo de concentração levando em consideração

ambos os parâmetros ($c_f e \rho_f$), obtendo-se, também, o erro absoluto entre a concentração média e a do densímetro para cada amostra como pode ser observado na Tabela 10. Juntamente, estão aprsentados os valores de concentração obtidos usando apenas a densidade experimental, os quais foram calculados pelo software AlcoDens, e, usando apenas a velocidade longitudinal.

% m/m	% m/m	% m/m	% m/m	
(densímetro)	densidade	velocidade	(média)	Erro (%)
	experimental	longitudinal		
85,58	85,97	85,71	85,84	0,26
86,54	86,05	86,87	86,46	0,08
87,73	88,17	87,75	87,96	0,23
89,12	88,63	88,73	88,68	0,44
90,29	89,43	90,73	90,08	0,21
91,53	91,81	91,85	91,83	0,30
92,61	93,22	92,50	92,86	0,25
93,79	93,20	94,08	93,64	0,15
95,17	95,30	95,02	95,16	0,01
95,83	95,78	95,56	95,67	0,16

Tabela 10 – Resultados do cálculo de concentração de 90 % a 100 % considerando a velocidadelongitudinal e a densidade.

Fonte: Elaborada pelo autor

Através destes resultados calculou-se o erro máximo de 0,44 % e um erro médio de 0,21 %, sendo possível observar que o uso conjunto de densidade e velocidade longitudinal para a determinação da concentração da amostra melhora a precisão do algoritmo de inversão. Assim, com esses resultados procurou-se verificar o quanto ainda se deve aperfeiçoar o método descrito neste trabalho.

Figueiredo et al. (2012) em suas determinações de concentrações de misturas de etanol e água mensuraram a atenuação e a velocidade de propagação colocando-se a amostra em um cilindro de vidro e utilizando-se o método de pulso-eco. Experimentalmente o sinal para o cálculo de atenuação não era suficientemente estável, logo, não foi possível relacioná-lo com a determinação de concentração. Usando a velocidade de fase obtiveram a concentração com uma incerteza média de 0,28 %, a qual está um pouco acima do obtido nesta tese.

Com um sensor a fibra óptica, Fujiwara et al. (2010) mensuraram a concentração de misturas de água e etanol baseando-se no princípio de reflexão de Fresnel. Um algoritmo baseado na intensidade das reflexões foi desenvolvido para o cálculo das concentrações. Com os resultados verificou-se um erro médio de 1,31 %, mas afirmam que o método proporciona um erro menor do que 1 % para baixas concentrações.

Já Xiong e Sisler (2010) aplicaram a espectroscopia de absorção no campo evanescente na faixa de infravermelho de sensores de fibra óptica enrolada para a determinação de baixa quantidade de água em etanol. Para isso, os autores utilizaram duas técnicas para se calcular a concentração de água: o método de regressão e de mínimos quadrados. Com os resultados que obtiveram calcularam um erro de 3,16 % e 0,42 %, respectivamente.

Há técnicas mais precisas que atuam na determinação de concentração de água em etanol, como, por exemplo, o sensor a fibra óptica que utiliza a ressonância de superfície de plasmon. Este sensor utiliza a técnica de interrogação espectral, em que o comprimento de onda de ressonância varia linearmente com a quantidade de água em etanol. O sensor possui uma resolução de 0,145 % e é destinado a determinação de 0-10 % de água em etanol (SRIVASTAVA; VERMA; GUPTA, 2011).

Embora Cegla, Cawley e Lowe (2005) não tenham calculado as concentrações de misturas de água e etanol, os autores mensuraram em seus experimentos a velocidade longitudinal de uma mistura de 5 % de etanol em água com temperaturas variando entre 10 e 35 °C. Em seus resultados para a velocidade longitudinal os autores obtiveram uma incerteza de 0,5 %, no qual acreditam ser aceitável para que o modo quase Scholte monitore pequenas mudanças nas propriedades do fluido.

Ao se verificar que a porcentagem de erro do método proposto neste trabalho não se encontra muito distinto do que se tem observado na literatura, constata-se que é viável o uso conjunto do sensor QSCH e do algoritmo de inversão de dados para a determinação de concentração de água em etanol. Os resultados obtidos com o sensor QSCH e com o algoritmo de inversão de dados estão de acordo com os que foram mensurados com o densímetro. Além disso, o tempo para execução do método proposto é de aproximadamente 5 minutos entre a aquisição e o processamento de dados, requer pequena quantidade de amostra (9 ml) e pode ser facilmente montado para se trabalhar fora do laboratório.

4.4 COMENTÁRIOS

Com os testes visando a busca por uma melhor geometria do sensor, pôde-se construir o sensor baseado no modo quase Scholte, o qual possui uma configuração simples e requer pequeno volume de amostra para as medições de velocidade de fase.

Para a aplicação em caracterização de líquidos pode-se verificar que é possível trabalhar com o modo quase Scholte. Tendo como foco de aplicação a detecção de adulteração de etanol combustível, o sensor baseado no modo QSCH e o algoritmo de inversão de dados foram testados quanto as suas viabilidades para essa aplicação. Primeiramente foram mensuradas misturas de água e etanol nas concentrações de 0 % a 100 %, com passo de 10 %, para se verificar a possiblidade de se mensurar a velocidade de fase.

Posteriormente, procurou-se elaborar o algoritmo de inversão de dados para a completa caracterização do fluido. O algoritmo, baseado em técnicas de otimização do ponto interior, aceita como dado de entrada a velocidade de fase experimental numa faixa de frequências for-

necendo a densidade e a velocidade longitudinal do fluido como resultado. Para se avaliar o algoritmo foram mensuradas amostras de líquidos puros e misturas de água e etanol nas concentrações de 90 % a 100 %. Os resultados experimentais estão de acordo com os dados teóricos, porém com uma incerteza de 0,44 %, que pode ser melhorada fazendo-se alguns ajustes durante o processamento de sinais. No entanto, numa comparação com a literatura, o método empregado neste trabalho apresenta resultados coerentes com a teoria o que evidencia que este sensor pode ser usado na caracterização de líquidos.

5 DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS IMERSAS

Neste capítulo descreve-se a apresentação dos resultados experimentais envolvendo ondas de Lamb em placa submersa em fluido. Assim como o desenvolvimento dos sensores e as simulações, parte dos experimentos foram realizados no Laboratório de Ultrassom da FEIS-Unesp e parte foi efetuada no Laboratório UALB-Madrid/ES.

5.1 SISTEMA EXPERIMENTAL PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS IMERSAS

Em aplicações NDT, em que a placa está em meio ar, a curva de dispersão constitui uma ferramenta útil para a seleção adequada dos modos de Lamb e da banda de frequência. Entretanto, quando a placa está imersa em líquido, além das curvas de velocidade, torna-se necessário analisar as curvas de atenuação em função da frequência.

A partir das curvas de velocidade de fase e atenuação em função da frequência, podese escolher uma melhor condição experimental para a inspeção da placa. Essa seleção é feita seguindo alguns critérios:

- O modo de propagação deve apresentar baixa atenuação;
- Deve-se evitar a interferência entre os modos (cada um com velocidade de grupo diferente);
- Ao se trabahar com prismas, a relação entre velocidade de fase e o ângulo do prisma deve ser considerado.
- Menores comprimentos de onda são preferíveis para se ter sensibilidade na detecção de pequenos defeitos.

Deve-se ter alguns cuidados ao usar estes critérios. Um exemplo está na detecção de defeitos pequenos, pois um menor comprimento de onda requer o uso de frequências mais altas, e, consequentemente, o número de modos que irão propagar também aumenta. Isso significa que há maior possibilidade de haver interferência entre os modos.

Neste trabalho, os modos de propagação e as frequências são apropriadamente selecionados para a detecção de defeitos por meio de geração de imagens usando um sensor array ultrassônico. Usando a técnica *phased array*, são obtidas as imagens da placa em ar e imersa em água, sendo possível observar experimentalmente a existência das bandas de baixa atenuação. O método *phased array* é baseado no uso de um conjunto de elementos transdutores que podem ser excitados de forma independente, e, em tempos diferentes e controlados. Isto permite se trabalhar com vários ângulos de inspeção, podendo-se variar e controlar os pontos focais do feixe na estrutura, como pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 – Técnica *phased array* com elementos excitados em tempos diferentes. a) Para angulação do feixe. b) Para focalizar o feixe. c) Para focalização e angulação do feixe.



Esta técnica tem sido muito usada em testes não destrutivos, principalmente porque possibilita o controle do feixe, podendo-se direcionar e focar para a região em análise, e, pela rapidez de inspeção. Outro fator importante é que, em placas, não há necessidade de se locomover o sensor array, e assim, a imagem é obtida fixando o sensor em uma parte da placa (YU; GIURGIUTIU, 2007; GóMEZ-ULLATE; CHINCHURRETA; ESPINOSA, 2007).

Baseando-se no estudo teórico e experimental das curvas de dispersão e atenuação da placa de alumínio imersa, procurou-se explorar as bandas de baixa atenuação para inspeção de placas imersas por meio do array emissor e receptor de pulsos ultrasônicos.

Quando a placa está em contato com o líquido há a fuga de ondas e, consequentemente, uma forte atenuação, a qual está relacionada com as propriedades do fluido. Observa-se na Figura 7a que a maioria dos modos apresenta regiões em que a atenuação se aproxima de zero, dentro das quais são mais apropriadas para a propagação de ondas e detecção de defeitos.

Nesta técnica experimental, um array sensor e um prisma de acrílico são fixados à placa. Um array linear com 128 elementos, espassados de centro a centro de 0,65 mm, e com largura de banda de 73 % (*Imasonic*, Besançon, França) foi acoplado à um prisma de acrílico com ângulo de incidência de 25° (velocidade de 2700 m/s) para a excitação dos modos A1 e S1 em, aproximadamente, 3,5 MHz, na placa de alumínio de 1 mm de espessura. Utilizou-se um sistema de controle de array (SITAU, 32:128, DASEL S. L., Espanha), o qual envia pulsos quadrados ao array (–90 V_p , 12 bits de aquisição, taxa de amostragem de 40 MHz).

A placa de alumínio possui dimensões 200 mm \times 300 mm e em uma de suas bordas foi posicionado o array como se observa na Figura 39. Foram produzidos cinco defeitos artificiais (perfurações) com 5 e 1,5 mm de diâmetro, os quais são identificados com as letras de *a* a *e*. A linha tracejada corresponde à área delimitada para a geração de imagem.

Figura 39 – Placa de alumínio com defeitos artificiais. Acima está um esquema com dimensões em mm e abaixo está a foto do array linear com o prisma de acrílico acoplado à placa.



Fonte: Elaborada pelo autor

O sistema de array opera com 32 canais multiplexados sobre os 128 elementos transdutores. Usou-se uma abertura fixa dos 32 elementos operando em modo *phased array*, com foco fixo na emissão (em 150 mm) e dinâmico na recepção. A inspeção da placa foi realizada em ar e imersa em água.

Neste sistema os elementos transdutores são excitados com um ciclo de pulso de onda quadrada, o que resulta em uma excitação de banda relativamente larga, devido as harmônicas, sendo necessário um filtro passa-banda para a seleção dos modos desejados para a propagação. Com o prisma de 25^o e array com frequência central de 5 MHz, foram selecionados os modos A1 e S1 para verificar o efeito da atenuação. Como se observa na Figura 7a, a atenuação do modo A1 em água é alta, enquanto o modo S1 possui uma banda de baixa atenuação que pode ser usada para a geração de imagem.

5.2 APLICAÇÃO DE BANDAS DE BAIXA ATENUAÇÃO DE ONDAS DE LAMB PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS

Quando a placa está em contato com um fluido viscoso os modos guiados propagantes são fortemente atenuados. No entanto, para a maioria dos modos de Lamb, há uma banda de frequência de baixa atenuação, como pode ser observado na Figura 7a, que pode ser usada para testes não-destrutivos ou caracterização de líquidos.

Com o intuito de explorar esta característica, uma verificação experimental foi realizada para se mensurar valores de baixa atenuação para alguns modos simétricos (S0, S1 e S2) e antissimétricos (A1 e A2) em diversas bandas de frequência. Os modos de Lamb foram acoplados na placa de alumínio por meio de incidência oblíqua usando-se os prismas com os ângulos apropriados.

5.2.1 Resultados das curvas de dispersão das ondas de Lamb

As curvas de dispersão e atenuação foram obtidas usando um tratamento em tempofrequência. O pulso captado para o modo simétrico S0, em diferentes posições do transdutor receptor, é mostrado na Figura 40. Este modo foi obtido usando uma frequência central de 1 MHz e uma placa de 1 mm de espessura. Como se observa, a amplitude do sinal detectado decai com a distância.

Figura 40 – Propagação de pulsos do modo S0 a 1 MHz em uma placa imersa de 1 mm de espessura. a) Transdutor receptor distante 15 mm do emissor. b) Para uma distância de 45 mm.



Fonte: Elaborada pelo autor

No processamento de sinais, esquematizado na Figura 41, uma janela gaussiana transladase no tempo de acordo com a máxima amplitude do sinal com a finalidade de eliminar ecos indesejados que estão na mesma ou em outra frequência. As componentes espectrais dos sinais são
obtidas através de sucessivas Transformadas de Fourier realizadas com 2048 pontos. Através da magnitude e da fase da FFT calcula-se as curvas de velocidade de fase e de atenuação.

Figura 41 – Esquema do processamento de sinais para se obter velocidade de fase e atenuação.



Para o cálculo da atenuação é realizado um ajuste linear dos valores da magnitude e das posições do transdutor receptor. A velocidade de fase é obtida fazendo-se o ajuste linear dos valores da fase com as posições ao longo da placa, o qual é multiplicado pela frequência angular.

As faixas de frequências de baixa atenuação estudadas foram selecionadas em torno de 1 MHz (modo S0), 4,2 MHz (modo S1), 8 MHz (modo S2), 2,5 MHz (modo A1) e 5,5 MHz (modo A2). Os resultados teóricos e experimentais são apresentados na Figura 42, para placas de 1 mm, 2 mm (verde) e 3 mm (preto) de espessura, em função da frequência de excitação.

Observa-se que os resultados experimentais estão de acordo com o modelo teórico. Ainda com o gráfico que relaciona número de onda e frequência pode-se verificar que, na faixa de 1,5 e 2,5 MHz, é possível se mensurar os modos S0 e A1, na qual apresentam baixa atenuação. No entanto, algumas discrepâncias foram encontradas nos dados experimentais de atenuação, as quais podem ser originadas pelas diferenças entre os valores reais e teóricos dos materiais usados no modelamento e pelos movimentos de fluido na superfície da placa.

Mesmo com a presença de algumas divergências entre os resultados teóricos e experimentais, observa-se uma boa concordância entre eles. Portanto, verifica-se que uma análise das curvas de dispersão em função da frequência se torna necessário para posterior aplicação. Na detecção de defeitos por imagem a escolha da banda de frequência e do modo de propagação foram realizados segundo alguns parâmetros: através da velocidade de fase pode-se fazer a seleção do ângulo de acoplamento do prisma, e, para a escolha de frequências foram analisadas as curvas de velocidade de grupo, verificando a faixa em que ocorre maior velocidade dos modos, e atenuação, os quais apresentam regiões de baixa atenuação.

5.2.2 Resultados de ondas de Lamb para detecção de defeitos

Primeiramente, para se escolher a frequência de excitação próxima aos 5 MHz da frequência central do array disponível, efetuou-se um levantamento da resposta em frequên-

Figura 42 - Resultados teóricos e experimentais para a propagação dos modos de Lamb na placa imersa em água. a) Velocidade de fase versus frequência. b) Atenuação versus frequência. c) Número de onda versus frequência.



△ Placa 3 mm 2 $f \cdot \overset{4}{2}d$ [MHz·mm] 8

• Placa 1 mm Placa 2 mm

10

*

3000

2000

1000

Fonte: Elaborada pelo autor

cia dos modos A1 e S1, em ar e em água, para o sistema array-prisma-placa conforme ilustra a Figura 43. Curvas aproximadas foram ajustadas ao dados experimentais para melhor interpretar os resultados.

Figura 43 – Resposta em frequência do modo A1 (símbolo quadrado) e do modo S1 (circulo). Propagação em placa em ar (vermehlo e azul) e em água (preto e verde).



O sinal transmitido pelo elemento 1 é refletido pelo defeito e recebido pelos 32 elementos do array. Os sinais são janelados para a seleção dos modos A1 e S1 e filtrados em banda estreita na várias frequências entre 2,5 e 4,75 MHz. Os resultados são normalizados como máximo valor do modo A1 em ar em 3 MHz.

Observa-se que, no meio ar, o modo S1, em frequências menores que 3,6 MHz, apresenta menor amplitude se comparado com o modo A1. Com a placa imersa em água, o modo A1 é fortemente atenuado para mais de 50 dB dependendo da frequência, enquanto que para o modo S1, em 3,4 MHz, a atenuação foi em torno de 10 dB. O efeito de atenuação pode ser claramente observado para o modo S1, em que o mínimo de atenuação está em torno de 3,4 MHz conforme observado na Figura 7a. Baseando-se nessas informações pode-se selecionar as bandas de frequências para a detecção de defeitos. Para o modo A1 em ar e em água usou-se frequência de 3 MHz ($c_g = 3390$ m/s), para o modo S1 em ar, 4,35 MHz, e em água, 3,4 MHz ($c_g = 3997$ m/s).

A imagem da placa em ar, para ambos os modos, está ilustrada na Figura 44, normalizada pela resposta do modo A1. Esta imagem foi obtida usando a velocidade de propagação do modo S1 em 4,35 MHz ($c_g = 3997$ m/s). Os defeitos detectados pelo modo S1 aparecem nas posições corretas, aproximadamente em y = 15 cm para os defeitos b_{S1} , c_{S1} e d_{S1} como indica a linha sólida.

Figura 44 – Imagem para a detecção de defeito de placa em ar, usando o modo S1 com velocidade de propagação de 4210 m/s.



Os defeitos que aparecem com maior intensidade em torno de y = 17,7 cm para os defeitos $b_{A1} c_{A1} e d_{A1}$, como indica a linha tracejada, são provenientes do modo A1 em 3 MHz, cuja formação foi feita usando a velocidade de propagação do modo S1, e, consequentemente, estes defeitos não aparecem nas posições corretas. A diferença em amplitude é esperada, devido a maior resposta do modo A1 em 3 MHz, conforme está ilustrado na Figura 43, e os defeitos são detectados por ambos os modos.

A imagem para a detecção de defeitos quando a placa está imersa em água pode ser observada na Figura 45. O modo A1 em 3 MHz é fortemente atenuado devido as ondas de fuga, não permitindo que os defeitos sejam detectados. Por outro lado, os defeitos ainda podem ser visualizados usando o modo S1 em 3,4 MHz devido a sua baixa atenuação.

A linha sólida indica os centros dos defeitos b_{S1} , c_{S1} e d_{S1} detectados usando o modo S1 em água, e, a linha tracejada indica a posição central destes defeitos gerados usando modo A1 quando a sua velocidade de propagação está próxima do modo S1 em água.

Para se comparar as amplitudes relativas entre as imagens em ar e em água, as amplitudes dos defeitos estão relacionados na Tabela 11. Para o modo A1 em água não foi possível obter valores significativos, devido ao efeito de forte atenuação conforme previsto pela resposta em frequência.

Com estes resultados observa-se o efeito e a importância em se conhecer as curvas de velocidade e de atenuação em função da frequência, e, a resposta em frequência para se determinar um ponto de operação. Quando a placa está imersa os modos que apresentam alta atenuação tendem a desaparecer, e menor quantidade de artefatos são produzidos na imagem permitindo uma melhor visualização de defeitos.

Figura 45 – Imagem para a detecção de defeito da placa imersa em água, usando o modo S1 com velocidade de propagação de 3858 m/s.



Tabela 11 – Intensidade dos defeitos (em dB), provenientes da Figura 44 e da Figura 45.

Modo	Meio/Defeito	а	b	с	d	e
A1	ar	-1.2	-3.8	0	-1.3	-8.4
	água	*	*	*	*	*
S 1	ar	-6.7	-14.7	-14.4	-14.3	-13.1
	água	-26.3	-29.1	-29.3	-27.2	-32.3
Fonto: Flaborada palo autor						

Fonte: Elaborada pelo autor

5.3 COMENTÁRIOS

Para se avaliar as bandas de baixa atenuação de alguns modos de Lamb, utilizou-se um par de transdutores longitudinais de banda larga acoplados a prismas de acrílico. Esta configuração é baseada no método de emissão recepção e a partir dos sinais adquiridos pode-se calcular as curvas de velocidade de fase e atenuação.

As bandas de baixa atenuação constituem uma vantagem para aplicações em análise não destrutiva, pois, mesmo que alguns modos sejam altamente atenuados quando a placa está em contato com um líquido, outros podem ser usados para a detecção de defeitos. Por esta razão, os modos e as bandas de frequências foram apropriadamente selecionadas para a aplicação em NDT. Para isso, utilizou-se um sensor array linear fixado a uma placa de alumínio com defeitos artificiais. Utilizando-se o método de *phased array*, obteve-se a imagem da placa em ar e imersa em água, verificando-se o interesse prático da metodologia proposta.

Quando a placa está em meio ar, as curvas de dispersão constituem uma ferramenta útil

para a adequada seleção de modos de propagação e das bandas de frequências para aplicações NDT. No caso da placa imersa em fluido, analisar as curvas de atenuação em função da frequência também se torna necessário. Com isso, pode-se obter imagens de defeitos usando modos de propagação de ordem superior como o modo S1 utilizado neste trabalho. Aplicações nesse sentido não foram encontradas na literatura, o que permite utilizar esses resultados para uma publicação futura.

6 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÃO

Neste trabalho abordou-se o desenvolvimento de um sensor guia de ondas do tipo placa para a aplicação em caracterização de líquidos. Nesta pesquisa foram realizadas investigações sobre os efeitos da propagação de ondas em placas submersas, verificando a existência de ondas de fuga para o meio fluido ocasionando a atenuação das ondas ao longo da propagação. Sendo as ondas guiadas caracterizadas por serem multimodais e dispersivas procurou-se explorar estes parâmetros para a determinação de propriedades de fluidos.

Assim, para avaliar o efeito de fluido viscoso sobre sólidos, mais especificamente, sobre as propriedades de propagação de ondas de Lamb em placas, modelou-se o fluido viscoso empregando-se a equação de Navier-Stokes. Ênfase foi dada à análise matemática, pois esta constitui uma ferramenta base muito importante para os próximos trabalhos. As condições de contorno necessárias foram aplicadas resultando em um sistema de equações que descreve as características das ondas guiadas. Trata-se de um método eficiente mesmo quando se tem muitas camadas em uma estrutura, pois relaciona as condições de contorno de cada camada de forma a resultar em uma matriz global, o que facilita escrever a equação de dispersão.

A solução numérica das equações características resultou nas curvas de dispersão para uma placa de alumínio imersa em água, sendo possível observar que as curvas de velocidade de fase não mudam significativamente em relação à placa em ar. Porém, quando a placa está em contato com um líquido, há forte atenuação devido as ondas de fuga e perdas por viscosidade.

Durante a análise teórica observou-se nas curvas de dispersão que, para a maioria dos modos guiados, há uma banda de frequência em que ocorre baixa atenuação. Estes mínimos estão relacionados com os zeros da velocidade de partícula *out-of-plane* na superficie da placa e constitui uma característica que pode ser explorada para a caracterização de líquidos e detecção de defeitos em placas.

Conhecendo-se o comportamento de baixa atenuação dos modos guiados pôde-se aplicar esta característca na detecção de defeitos em placas submersas. Além disso, pôde-se escolher um modo de propagação sensível às propriedades do fluido, abordar aspectos acerca da construção do sensor guia de ondas e desenvolver o algoritmo de inversão de dados para a caracterização de líquidos. Em particular, procurou-se aplicar o método desenvolvido na determinação de concentração de etanol em água, com aplicação na detecção de adulteração de etanol combustível.

As simulações numéricas contribuíram para a obtenção das curvas de dispersão dos sistemas que foram abordados. Essa etapa possibilitou também verificar em qual faixa de frequência se poderia trabalhar com os dispositivos de medição e os modos de propagação escolhidos. Além disso, como as ferramentas de simulação permitem modelar sistemas próximos dos casos reais, foi possível obter resultados mais próximos da prática, podendo-se desenvolver técnicas de processamento de sinais para se obter a velocidade de fase e a atenuação, que posteriormente poderiam ser aplicados em dados experimentais.

Experimentalmente mensurou-se a propagação dos modos simétricos (S0, S1 e S2) e antissimétricos (A1 e A2) numa placa de alumínio imersa e com diferentes espessuras. Os resultados para a velocidade de fase e atenuação foram comparados com os dados teóricos obtidos, onde foi possível observar concordância entre eles. Observou-se ainda, que também é possível a propagação de ondas de Lamb em altas frequências quando a placa está imersa, selecionando adequadamente a banda de frequência e o modo de propagação.

As bandas de baixa atenuação de alguns modos de propagação foram utilizadas experimentalmente para a detecção de defeitos de uma placa de alumínio imersa em água. As imagens foram realizadas usando um *array* linear de transdutores de 5 MHz para a excitação dos modos A1 e S1 em uma placa de 1 mm de espessura, a qual continha defeitos artificiais. Enquanto o sistema estava no meio ar, com os dois modos de propagação foi possível obter a imagem dos defeitos. No caso imerso, a imagem da placa para a verificação da presença dos defeitos foi obtida somente com o modo S1 operando na região de baixa atenuação, enquanto que o modo A1 foi fortemente atenuado.

Sabe-se que quanto mais alta é a frequência, maior o número de modos de Lamb que se propagam pela estrutura gerando interferência modal ao longo da popagação. Este problema não ocorre em condições de imersão devido ao fato de somente um modo apresentar um valor mínimo de atenuação para uma dada frequência. Esta característica pode favorecer os testes não-destrutivos por ultrassom na detecção de defeitos em placas submersas.

No desenvolvimento do sensor guia de ondas o modo quase Scholte foi de grande interesse, pois apresenta maior interação com o material a ser analisado. Para a caracterização de líquidos procurou-se desenvolver um sensor versátil e de configuração fácil de ser implementada. A possibilidade de fazer um monitoramento remoto em ambientes de risco e a não necessidade de se manter o alinhamento entre transdutores, são algumas das vantagens. Além disso, pode-se obter dois parâmetros (densidade e velocidade longitudinal) ao se mensurar somente a velocidade de fase.

Ainda que a concepção do sensor não é inédita, mas adaptada de Cegla (2006), neste trabalho foram feitos importantes estudos relacionados à otimização a geometria da placa para diminuir a quantidade de amostra, bem como o efeito das paredes do recipiente nos resultados. Estruturalmente, o sensor é composto basicamente de placa e cerâmica piezoelétrica, a qual fica posicionada em uma das extremidades longitudinal da placa e separada da amostra, não havendo a necessidade do sensor estar totalmente imerso. Para se trabalhar com quantidade reduzida de amostra verificou-se a influência das paredes do recepiente, a partir do qual foi produzido um recipiente com capacidade de 9 ml.

Durante os experimentos os líquidos puros e misturas de água e etanol em diversas concentrações foram mantidos a uma temperatura controlada de 20 °C. A velocidade de fase foi obtida mensurando-se o eco do modo QSCH ao passo que o nível da amostra aumentava dentro do recipiente. Dessa maneira, o tempo de trânsito das ondas recebidas se alterava como resultado dos diferentes comprimentos de propagação através da placa.

Sendo uma das propostas para este trabalho o uso do sensor para se determinar uma característica de líquidos, desenvolveu-se o algoritmo de inversão de dados. O termo inversão se refere ao uso da velocidade de fase experimental para se calcular a densidade e a velocidade longitudinal do fluido, constituindo o processo inverso ao que vinha sendo realizado.

A elaboração do algoritmo foi realizada usando um método de otimização, o qual foi escolhido definindo o tipo de função objetiva e restrição do problema. A busca por soluções atua dentro de uma região factível definida pelos limites das restrições. Para se analisar a funcionalidade, os primeiros testes foram realizados com valores teóricos de velocidade de fase e suas variações, pois na prática os dados experimentais podem apresentar flutuações. Nos casos analisados verificou-se que a porcentagem de erro se torna significativa para uma variação de ± 1 % na velocidade de fase.

As medições com o sensor QSCH foram realizadas repetidas vezes (10 aquisições) para uma mesma amostra encontrando-se uma variação máxima de 0,67 % entre os dados experimentais e teóricos para a velocidade de fase. O algoritmo de inversão de dados primeiramente foi aplicado nos dados referentes aos líquidos puros, pois possuem propriedades conhecidas na literatura podendo-se verificar a funcionalidade do método. Ao se analisar os erros máximos obtidos para a densidade (<3 %) e velocidade longitudinal (<0,5 %), verificou-se a possibilidade de se usar o AID para se determinar a concentração de etanol em água.

Os valores de densidade fornecidos pelo AID para as diversas concentrações foram comparados com os valores mensurados pelo densímetro, observando-se a concordância entre os resultados. Para o cálculo da concentração de etanol em água da amostra utilizou-se o software AlcoDens, no qual inseriu-se a temperatura e a densidade experimental. Embora não se tenha encontrado na literatura valores de velocidade longitudinal para as concentrações abordadas na temperatura de 20 °C, fez-se uma análise dos resultados para a sua utilização no cálculo da concentração. Para isso curvas de ajustes foram traçadas para os dados de densidade e velocidade longitudinal do fluido, e, através da concordância entre os resultados verificou-se que o uso conjunto dessas duas propriedades reduz o erro máximo para 0,44 %.

Portanto, a partir dos resultados experimentais envolvendo o sensor guia de onda e o algoritmo de inversão de dados, observou-se que há a possibilidade de usá-los na obtenção de características de líquidos. Os valores de concentração obtidos para as diferentes amostras de etanol em água, são um grande indicativo da viabilidade de uso do sensor na aferição de quantidade de água no etanol combustível.

Além disso, o sensor QSCH possui características favoráveis para essa aplicação, como, por exemplo, elaborado com dimensões reduzidas e, portanto, requer pequeno volume de amostra (9 ml), é portátil e de fácil manueio, e, pode ser implementado para se trabalhar fora do laboratório.

As pesquisas e atividades desenvolvidas ao longo deste trabalho proporcionaram contribuições para o desenvolvimento teórico e aplicações práticas, as quais merecem ser destacadas:

- Para a caracterização de líquidos desenvolveu-se um sensor que permite determinar a densidade e a velocidade longitudinal de um fluido, a partir da velocidade de fase do modo QSCH mensurada numa faixa de frequências. Assim, o sensor QSCH e o algoritmo de inversão de dados proporcionaram a determinação de concentração de etanol em água. O uso de técnicas numéricas e experimentais permitiram desenvolver um sensor versátil, que utiliza pouca quantidade de amostra (9 ml) e com incertezas menores do que 0,44 %. Embora refinamentos ainda sejam necessários para um melhor ajuste à normativa de concentrações de água em etanol (±0,1 %), os resultados obtidos se encontram na mesma ordem de magnitude do que se tem verificado em trabalhos previos, e, ainda podem ser melhorados, o que indica que sensor QSCH pode ser usado na determinação de propriedades de fluidos.
- No que se refere ao modelamento matemático, o uso da equação de Navier-Stokes tornou mais completa a descrição do fluido, pois leva em consideração os dois coeficientes de viscosidade, o volumétrico e o de cisalhamento. Ao contrário dos modelamentos de sistemas sólido-fluido encontrados na literatura, os quais tratam o fluido como um sólido equivalente fazendo-se apenas as constantes de Lamé similares para os dois meios, neste trabalho descreve-se o fluido como um fluido propriamente dito. Isso permite obter resultados mais próximos da prática, principalmente quando se deseja trabalhar com fluidos muito viscosos, em que a segunda viscosidade (ζ) também terá maior importância.
- O uso das bandas de frequências de baixa atenuação dos modos de Lamb em placas submersas possibilitaram a detecção de defeitos em placas. A maioria dos trabalhos existentes na literatura, somente abordam os cálculos da forte atenuação das ondas que se propagam na placa devido a fuga de onda para o fluido. Além disso, não se tem encontrado trabalhos relacionados à inspeção de estuturas do tipo placa submersas com modos guiados de maior ordem, como o S1, operando nessas regiões de baixa atenuação. Em baixas frequências há trabalhos usando o modo S0. Também não se tem encontrado imagens ecográficas de defeitos em placas imersas obtidas com um *array* operando em pulso-eco.

6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

As características de propagação de ondas guiadas foram estudadas para o caso de placas imersas em fluido, as quais foram importantes para as aplicações envolvidas neste trabalho. Sendo o principal objetivo a determinação de concentração de etanol em água para a aplicação na detecção de adulteração de etanol combustível, buscou-se embasamento em técnicas experimentais e numéricas para se obter as propriedades do fluido.

Diante dos resultados obtidos para a detecção de defeito em placas submersas e para a caracterização de líquidos, propõe-se sugestões para os próximos trabalhos que podem ocasionar melhorias:

- Cita-se o refinamento das técnicas experimentais empregadas para a obtenção da velocidade de fase do modo quase Scholte. Uma alternativa é o aumento do comprimento longitudinal da placa para se fazer medições com maior nível da amostra. Assim, pode-se obter maior quantidade de sinais detectados devido ao aumento do tempo de trânsito, e, consequentemente pode-se alcançar melhor precisão nos resultados.
- Além disso, durante as medições das amostras, pode-se definir de forma mais precisa a distância e o intervalo de aquisição fazendo com que o nível se estabilize por um determinado tempo, diminuindo o movimento de fluido próximo à placa.
- Propõe-se também uma readequação do cálculo experimental da atenuação do modo QSCH, a qual se apresentou com valores muito altos, e, aparentemente, com ruído. Acredita-se que as propostas de melhoria descritas acima poderão contribuir, e, sugere-se ainda a análise da influência da espessura da placa na atenuação das ondas guiadas.
- Com relação ao algoritmo de inversão de dados, este ainda está sendo executado de forma semi-automática, pois ainda é necessário a intervenção do operador para a inserção da faixa de frequência para a busca de soluções. Assim, sugere-se a implementação de métodos numéricos para a seleção automática das velocidades de fase experimentais e frequências, os quais são usados como dados de entrada no AID.
- Para se melhorar em precisão no cálculo de concentração usando o AID, propõe-se a inserção da atenuação experimental para a busca de soluções, pois, de acordo com a previsão teórica, o valor de atenuação aumenta a medida que a concentração de etanol em água também é maior. Com isso, acredita-se que o par velocidade de fase e atenuação experimentais pode melhorar a busca por soluções.

6.2 PUBLICAÇÕES

Durante o período deste doutoramento, as pesquisas e resultados experimentais proporcionaram a elaboração de trabalhos que foram submetidos e apresentados em congressos internacionais conforme estão relacionados abaixo:

- TAKIY, A. E.; GRANJA, S. C. G.; HIGUTI, R. T.; KITANO, C.; ELVIRA, L.; MARTÍNEZ-GRAULLERA, O. F. Low attenuation frequency bands for Lamb waves immersed in viscous fluids: theoretical analysis and experimental validation. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ULTRASONICS (ICU 2013), 2013, Singapore. Proceedings... Singapore: ICU, 2013. p. 233-238.
- GRANJA, S. C. G.; TAKIY, A. E.; HIGUTI, R. T.; KITANO, C.; SEGURA, L. E. Guided waves on a quasi-isotropic plain woven carbon epoxy fabric: theoretical analysis and experimental validation. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ULTRASONICS (ICU 2013), 2013, Singapore. Proceedings... Singapore: ICU, 2013. p. 784-789.
- TAKIY, A. E.; GRANJA, S. C. G.; HIGUTI, R. T.; KITANO, C.; SEGURA, L. E.
 ; MARTÍNEZ-GRAULLERA, ÓSCAR ;MONTERO DE ESPINOSA, F. *Theoretical* Analysis and Experimental Validation of the Scholte Wave Propagation in Immersed Plates for the Characterization of Viscous Fluids. In: IEEE INTERNATIONAL ULTRASO-NICS SYMPOSIUM - IUS 2013, Praghe. Proceedings... Praghe: IUS, 2013. p. 1-4.

REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables.* [S.1.]: U.S. Govt. Print. Off., 1964. (Applied mathematics series, v. 55, n. 1972).

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA - ANVISA. *Tabela Internacional de Alcoometria*. 2010. Disponível em: http://www.anvisa.gov.br/hotsite/farmacopeiabrasileira/arquivos/cp38_2010_anexos/alcoometria.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2015.

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

ASSOCIATES, W. PZFlex: user's manual. Version 2.2. Mountain View, 2009. v. 1.

AULD, B. A. Acoustic fields and waves in solids. [S.l.]: Krieger, 1990.

BILLY, M. D.; QUENTIN, G. Experimental study of the Scholte wave propagation on a plane surface partially immersed in a liquid. *Journal of Applied Physics*, Melville, v. 54, n. 8, p. 4314–4322, 1983.

BRASIL. *Bioetanol de cana-de-açúcar*: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. *Resolução ANP Nº 7, DE 9.2.2011 - DOU 10.2.2011 - Retificada DOU 14.4.2011.* 2011. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/ resolucoes_anp/2011/fevereiro/ranp%207%20-%202011.xml>. Acesso em: 25 ago. 2014.

BUENO, L.; PAIXÃO, T. R. L. C. A copper interdigitated electrode and chemometrical tools used for the discrimination of the adulteration of ethanol fuel with water. *Talanta*, Amsterdam, v. 87, p. 210–215, 2011.

CAWLEY, P.; ALLEYNE, D. The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures. *Ultrasonics*, v. 34, n. 2, p. 287–290, 1996.

CEGLA, F. B. Ultrasonic waveguide wensors for fluid characterization and remote sensing. 2006. 248 f. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecanica) — Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, 2006.

CEGLA, F. B.; CAWLEY, P.; LOWE, M. J. S. Material property measurement using the quasi-Scholte mode: a waveguide sensor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 117, n. 3, p. 1098–1107, 2005.

CHEEKE, J. D. N. Fundamentals and applications of ultrasonic waves. [S.l.]: CRC Press, 2002. 462 p.

CHEN, J.; SU, Z.; CHENG, L. Identification of corrosion damage in submerged structures using fundamental anti-symmetric Lamb waves. *Smart Mater. Struct.*, Bristol, v. 19, n. 1, p. 1–12, 2010.

CHEN, Z.; HAN, T.; JI, X.; GUO, H.; SHI, W. Lamb wave sensors array for nonviscous liquid sensing. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, Beijin, v. 49, n. 4, p. 461–472, 2006.

CHIMENTI, D.; MARTIN, R. W. Nondestructive evaluation of composite laminates by leaky Lamb waves. *Ultrasonics*, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 13 – 21, 1991.

CHIMENTI, D. E. Guided wave in plates and their use in materials characterization. *Applied Mechanics Reviews*, New York, v. 50, n. 5, p. 247–284, 1997.

CYBERLOGIC. *Wave 2000*: software for computational ultrasonics. 2013. Disponível em: http://www.cyberlogic.org/wave2000.html. Acesso em: 3 jun. 2013.

DAYAL, V.; KINRA, V. K. Leaky Lamb waves in an anisotropic plate. i: an exact solution and experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 85, n. 6, p. 2268–2276, 1989.

DEBLOCK, Y.; CAMPISTRON, P.; NONGAILLARD, B. A continuous wave method for ultrasonic characterization of liquid materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 118, n. 3, p. 1388–1393, 2005.

DJILI, S.; BENMEDDOUR, F.; MOULIN, E.; ASSAAD, J.; BOUBENIDER, F. Notch detection in copper tubes immersed in water by leaky compressional guided waves. *NDT&E International*, London, v. 54, p. 183 – 188, 2013.

FAVRETTO-ANRèS, N.; RABAU, G. Excitation of the Stoneley-Scholte wave at the boundary between an ideal fluid and a viscoelastic solid. *Journal of Sound and Vibration*, London, v. 203, n. 2, p. 193 – 208, 1997.

FIGUEIREDO, M. K.-K.; COSTA-FELIX, R. P.; MAGGI, L. E.; ALVARENGA, A. V.; ROMEIRO, G. A. Biofuel ethanol adulteration detection using an ultrasonic measurement method. *Fuel*, v. 91, n. 1, p. 209 – 212, 2012.

FUJIWARA, E.; TAKEISHI, R. T.; HASE, A.; ONO, E.; SANTOS, J. S.; SUZUKI, C. K. Real-time optical fibre sensor for hydro-alcoholic solutions. *Measurement Science and Technology*, Bristol, v. 21, n. 9, p. 1–5, 2010.

GHOSH, T.; KUNDU, T.; KARPUR, P. Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plates. *Ultrasonics*, Amsterdam, v. 36, n. 7, p. 791–801, 1998.

GóMEZ-ULLATE, Y.; CHINCHURRETA, F. J.; ESPINOSA, F. Montero de. Lamb waves generation on thin plates using piezocomposites. *Journal of the European Ceramic Society*, London, v. 27, n. 13-15, p. 4147–4151, 2007.

GóMEZ-ULLATE, Y. R.; ESPINOSA, F. F. M. de. Piezoelectric modelling using a time domain finite element program. *Journal of the European Ceramic Society*, London, v. 27, n. 13-15, p. 4153 – 4157, 2007.

HERSKOVITS, J. A view on nonlinear optimization. *Norwell: Kluwer Academic, 1995*, p. 71–117.

HYDRO, R. *RS Hydro*. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <http://www.rshydro.co.uk/ sound-speeds.shtml>. Acesso em: 10 mar. 2015.

KAATZE, U.; KUHNEL, V.; MENZEL, K.; SCHWERDTFEGER, S. Ultrasonic spectroscopy of liquids. extending the frequency range of the variable sample length pulse technique. *Measurement Science and Technology*, Bristol, v. 4, n. 11, p. 1257, 1993.

KAUFMAN, J. J.; LUO, G.; BIANCO, B.; CHIABRERA, A.; SIFFERT, R. S. Computational methods for NDT. *Spie Proceedings, Belingham*, v. 3585, p. 173–181, 1999.

KAZYS, R.; SLITERIS, R.; RAISUTIS, R.; ZUKAUSKAS, E.; VLADISAUSKAS, A.; MAZEIKA, L. Waveguide sensor for measurement of viscosity of highly viscous fluids. *Applied Physics Letters*, Melville, v. 103, n. 20, 2013.

KHAN, V. H.; SUBRAHMANYAM, S. Sound velocity dispersion in acetic acid. *Chemical Physics Letters*, Amsterdam, v. 17, n. 2, p. 231 – 234, 1972.

KINO, G. S. *Acoustic waves*: devices, imaging, and analog signal processing. [S.l.]: Prentice-Hall, 1987.

LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. Fluid mechanics. [S.l.]: Pergamon Press, 1966.

LEE, Y.-C.; CHENG, S. W. Measurement of leaky Lamb wave dispersion curves with application on coating characterization. *AIP Conference Proceedings*, Melville, v. 557, n. 1, p. 196–203, 2001.

LIDE, D. R. CRC Handbook of chemistry and physics. 9. ed. [S.1.], 2010.

LINDNER, G. Sensors and actuators based on surface acoustic waves propagating along solid–liquid interfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bristol, v. 41, n. 12, p. 1–13, 2008.

LOWE, M. J. S. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, v. 42, n. 4, p. 525–542, 1995.

LOWE, M. J. S.; ALLEYNE, D. N.; CAWLEY, P. Defect detection in pipes using guided waves. *Ultrasonics*, Amsterdam, v. 36, p. 147–154, 1998.

LUANGVILAI, K. Attenuation of Ultrasonic Lamb Waves with Applications to Material Characterization and Condition Monitoring. 2017. 283 f. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — School of Civil and Environmental Engineering. Georgia Institute of Technology, 2007.

MARTIN, B. A.; WENZEL, S. W.; WHITE, R. M. Viscosity and density sensing with ultrasonic plate waves. *Sensors and Actuators A: Physical*, Amsterdam, v. 22, n. 1-3, p. 704 – 708, 1989.

MAŽEIKA, L.; KAŽYS, R.; RAIŠUTIS, R.; DEMČENKO, A.; ŠLITERIS, R. Long-range ultrasonic non-destructive testing of fuel tanks. In: CITESEER, 11, 2006, BERLIN. *EC&NDT Proceedings*. [S.I.], 2006. p. 1–8.

MCCLEMENTS, D.; FAIRLEY, P. Ultrasonic pulse echo reflectometer. *Ultrasonics*, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 58 – 62, 1991.

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

NAYFEH, A. H. *Wave propagation in layered anisotropic media: with application to composites.* [S.1.]: Elsevier Science, 1995. (North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics).

NAYFEH, A. H.; NAGY, P. B. Excess attenuation of leaky lamb waves due to viscous fluid loading. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 101, n. 5, p. 2649–2658, 1997.

NIETHAMMER, M.; JACOBS, L. J.; QU, J.; JARZYNSKI, J. Time-frequency representations of Lamb waves. *Journal of the Acoustical Society of America*, ASA, v. 109, n. 5, p. 1841–1847, 2001.

PELLAM, J. R.; GALT, J. K. Ultrasonic propagation in liquids: I. application of pulse technique to velocity and absorption measurements at 15 megacycles. *The Journal of Chemical Physics*, Melville, v. 14, n. 10, p. 608–614, 1946.

POVEY, M. Ultrasonic techniques for fluids characterization. [S.1.]: Academic, 1997.

QI, Q. Attenuated leaky Rayleigh waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 95, n. 6, p. 3222–3231, 1994.

RIZZO, P.; HAN, J.-G.; NI, X.-L. Structural health monitoring of immersed structures by means of guided ultrasonic waves. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, London, v. 21, n. 14, p. 1397–1407, 2010.

ROEVER, W. L.; VINING, T. F.; STRICK, E. Propagation of elastic wave motion from an impulsive source along a fluid/solid interface. I. experimental pressure response. II. theoretical pressure response. III. the pseudo-Rayleigh wave. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, v. 251, n. 1000, p. 455–523, 1959.

ROSE, J. L. Ultrasonic waves in solid media. New York, NY: Cambridge University, 1999.

ROSE, J. L. *Ultrasonic waves in solid media*. New York: Cambridge University, 2004. 476 p. Disponível em: http://books.google.com/books?id=DEtHDJJ-RS4C>.

SACHSE, W.; PAO, Y.-H. On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids. *Journal of Applied Physics*, Melville, v. 49, n. 8, p. 4320–4327, 1978.

SIMONETTI, F.; CAWLEY, P. On the nature of shear horizontal wave propagation in elastic plates coated with viscoelastic materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, London, v. 460, n. 2048, p. 2197–2221, 2004.

SOFTWARE, K. *AlcoDens*. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <http://www.katmarsoftware.com/alcodens.htm>. Acesso em: 1 mar. 2015.

SRIVASTAVA, S. K.; VERMA, R.; GUPTA, B. D. Surface plasmon resonance based fiber optic sensor for the detection of low water content in ethanol. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Amsterdam, v. 153, n. 1, p. 194 – 198, 2011.

VOGT, T. K. *Determination of material properties using guided waves*. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecanica) — Imperial College of Science, Technology and Medicine. University of London, 2002. 205 p.

WATKINS, R.; COOPER, W.; GILLESPIE, A.; PIKE, R. The attenuation of Lamb waves in the presence of a fluid. *Ultrasonics*, Amsterdam, v. 20, n. 6, p. 257 – 264, 1982.

WENZEL, S.; WHITE, R. Analytic comparison of the sensitivities of bulk-wave, surface-wave, and flexural plate-wave ultrasonic gravimetric sensors. *Applied Physics Letters*, Melville, v. 54, n. 20, p. 1976–1978, 1989.

WHITE, R.; WENZEL, S. Fluid loading of a Lamb-wave sensor. *Applied Physics Letters*, Melville, v. 52, n. 20, p. 1653–1655, 1988.

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

WILKIE-CHANCELLIER, N.; MARTINEZ, L.; SERFATY, S.; GRIESMAR, P. Lamb wave sensor for viscous fluids characterization. *Sensors Journal, IEEE*, Piscataway, v. 9, n. 9, p. 1142–1147, 2009.

WU, J.; ZHU, Z. The propagation of Lamb waves in a plate bordered with layers of a liquid. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 91, n. 2, p. 861–867, 1992.

WU, J.; ZHU, Z. An alternative approach for solving attenuated leaky Rayleigh waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 97, n. 5, p. 3191–3193, 1995.

WU, J.; ZHU, Z. Sensitivity of Lamb wave sensors in liquid sensing. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Piscataway, v. 43, n. 1, p. 71–72, 1996.

XIONG, F.; SISLER, D. Determination of low-level water content in ethanol by fiber-optic evanescent absorption sensor. *Optics Communications*, Amsterdam, v. 283, n. 7, p. 1326 – 1330, 2010.

XU, B.; GIURGIUTIU, V.; YU, L. Lamb waves decomposition and mode identification using matching pursuit method. In: SPIE, 2009. *Proceedings*... [S.1.], 2009, San Diego. v. 7292, p. 72920I–72920I–12.

YU, L.; GIURGIUTIU, V. In situ optimized PWAS phased arrays for Lamb wave structural health monitoring. *J. Mech. Mater. Struct.*, Berkeley, v. 2, n. 3, p. 459–487, 2007.

YU, L.; GIURGIUTIU, V. Multi-mode damage detection methods with piezoelectric wafer active sensors. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Berkeley, v. 20, p. 1329–1341, 2009.

ZHU, Z.; WU, J. The propagation of Lamb waves in a plate bordered with a viscous liquid. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 98, n. 2, p. 1057–1064, 1995.

ZHU, Z.; WU, J.; LI, J.; ZHOU, W. A general dispersion relation for Lamb-wave sensors with liquid-layer loading. *Sensors and Actuators A: Physical*, Amsterdam, v. 49, n. 1-2, p. 79 – 84, 1995.