

Ana Cláudia Barbosa Rezende

**Avaliação de Propriedades Acustoelásticas
do Polímero Termoplástico
Polimetilmetacrilato por Ultrassom**

Brasil

2017, Goiânia

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação: Mestrado

Nome completo do autor: Ana Cláudia Barbosa Rezende

Título do trabalho: Avaliação de propriedades acustoelásticas do polímero termoplástico polimetilmetacrilato por ultrassom

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 08 / 12 / 17

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

Ana Cláudia Barbosa Rezende

Avaliação de Propriedades Acustoelásticas do Polímero Termoplástico Polimetilmetacrilato por Ultrassom

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação. Área de Concentração: Engenharia da Computação.

Universidade Federal de Goiás - UFG
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Programa de Pós-Graduação

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Leão Vieira

Brasil
2017, Goiânia

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rezende, Ana Cláudia Barbosa

Avaliação de propriedades acustoelásticas do polímero termoplástico polimetilmetacrilato por ultrassom [manuscrito] / Ana Cláudia Barbosa Rezende. - 2017.

108 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Leão Vieira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2017.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Ultrassom. 2. Acustoelasticidade. 3. Polimetilmetacrilato. 4. Ondas longitudinais criticamente refratadas. 5. Birrefringência acústica. I. Vieira, Sílvio Leão, orient. II. Título.

CDU 669



Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado

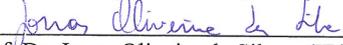
Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração **Engenharia de Computação**, da candidata **Ana Cláudia Barbosa Rezende** realizada em 17 de novembro de 2017.

Aos dezessete dias do mês de novembro de dois mil e dezessete, às 09:00 horas Anfiteatro II do Instituto de Física, Campus Samambaia da Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: os Doutores Sílvio Leão Vieira – Orientador (IF/UFG), Marlipe Garcia Fagundes Neto - EMC/UFG e Jonas Oliveira da Silva - (IF/UFG), para julgar a Dissertação de Mestrado de **Ana Cláudia Barbosa Rezende**, intitulada **"Avaliação de propriedades acustoelásticas do polímero termoplástico polimetilmetacrilato por ultrassom"**, apresentada pela candidata como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Sílvio Leão Vieira, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o candidato que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Marlipe Garcia Fagundes Neto e Jonas Oliveira da Silva. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que a candidata, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerada **aprovada** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo candidato. Goiânia, 17 de novembro de 2017.

Comissão Examinadora designada:


Prof. Dr. Sílvio Leão Vieira – Orientador (IF/UFG) (Avaliação: Aprovada)

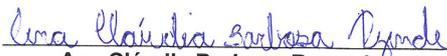

Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto –(EMC/UFG) (Avaliação: Aprovada)


Prof. Dr. Jonas Oliveira da Silva - (IF/UFG) (Avaliação: Aprovada)

Prof. Dr. Ernanni Damiano Vieira - (IF/UFG) (Avaliação: _____)

Prof. Dr. Ademyr Gonçalves de Oliveira- EMC/UFG (Avaliação: _____)

Candidata


Ana Cláudia Barbosa Rezende

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ter sido realizado sem a ajuda de diversas pessoas a quem manifesto meus sinceros agradecimentos:

Aos meus pais Amélia e Mário Lúcio, pelo imenso amor, carinho, incentivo, paciência e apoio em todos os momentos;

Aos meus irmãos Márcio Lúcio e Danilo, por todo carinho, incentivo e compreensão;

Aos meus amigos Gustavo Souza e Gilberto Lopes, por toda amizade, ajuda e companheirismo;

Ao meu orientador, prof. Dr. Sílvio Leão Vieira, pelos ensinamentos, pela compreensão e confiança em mim depositada;

Aos colegas do Laboratório de Ultrassom, pela companhia e disposição em me auxiliar;

Aos parceiros do laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil - LABITECC, prof. Daniel de Lima e ao técnico Vitor Augusto, muito obrigada pela valiosa ajuda, sem a qual parte deste estudo não poderia ter sido realizado;

Ao prof. Igor Kopcak pelo auxílio e disposição em ajudar com equipamentos do Lab de Conversão Eletromecânica em Energia da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação;

Aos professores Ademyr Gonçalves de Oliveira e Ernanni Damião Vieira pelas sugestões ao trabalho, que contribuíram muito para as melhorias do mesmo;

Aos professores Jonas Oliveira da Silva e Marlipe Garcia Fagundes Neto por aceitarem participar da banca avaliadora de defesa e por todas as recomendações;

Ao Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás – UFG pela infraestrutura;

Aos órgãos de fomento Cnpq, Fapeg e à Capes pelo incentivo financeiro;

*"Os livros não são feitos para que alguém acredite neles, mas para serem submetidos à investigação. Quando consideramos um livro, não devemos perguntar o que diz, mas o que significa."
(Umberto Eco, O nome da Rosa)*

Resumo

O ultrassom é uma poderosa ferramenta empregada modernamente tanto em aplicações médicas quanto industriais. A portabilidade, aplicabilidade e facilidade em se trabalhar com ultrassom, aliado ao fato de ser uma técnica não-destrutiva e de custos mais baixos, contribuem para sua utilização. Modernamente, o polímero termoplástico polimetilmetacrilato (acrílico) ou PMMA tem sido utilizado para diversas aplicações, desde componentes aeroespaciais transparentes a equipamentos médico-hospitalares. O estudo da acustoelasticidade do PMMA empregando métodos ultrassônicos possibilita a inspeção indireta de certas características físicas deste material. Sabe-se que as ondas acústicas são afetadas pelas características do meio, como a temperatura, textura e tensões. A pesquisa foi dividida em três etapas, a primeira dedicada a analisar a influência da temperatura sobre a velocidade das ondas ultrassônicas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) no PMMA. Para isso, foi empregado o método de transmissão para três frequências distintas. Na segunda, foi avaliada a anisotropia estrutural empregando a birrefringência acústica por meio do método pulso-eco. Nesta fase uma amostra retangular foi fraturada transversalmente e novamente unida para simular uma quebra de simetria. A terceira e última etapa foi dedicada a caracterizar as constantes acustoelásticas L_{22} , L_{21} e L_{23} de amostras homogêneas por meio de ondas longitudinais e cisalhantes no modo pulso-eco e a aplicação de uma força uniaxial. Os resultados com as ondas L_{cr} mostraram influência significativa da temperatura sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, outro fator de influência foi a frequência dos transdutores. Por sua vez, com a birrefringência acústica foi possível identificar uma grande variação dessa grandeza próxima a zona fraturada, ou seja, de maior anisotropia. As constantes acustoelásticas L_{22} , L_{21} e L_{23} foram caracterizadas e observou-se um crescimento do tempo de propagação da onda de ultrassom em função da deformação para as constantes L_{22} e L_{23} . A constante L_{21} apresentou decréscimo do tempo de propagação da onda cisalhante ultrassônica em função da deformação. As técnicas ultrassônicas empregadas mostraram-se relevantes e possibilitaram a obtenção de novos resultados ainda não descritos na literatura. A caracterização das constantes acustoelásticas também possibilitou estimar as constantes elásticas de terceira ordem (l , m , n e A , B , C). As constantes caracterizadas nesta pesquisa são importantes para se obter uma completa compreensão das propriedades elásticas do polimetilmetacrilato.

Palavras-chave: ultrassom, acustoelasticidade, polimetilmetacrilato, ondas longitudinais criticamente refratadas, birrefringência acústica.

Abstract

Ultrasound is a powerful tool used in modern medical and industrial applications. The portability, applicability and ease of working with ultrasound, together with the fact that it is a non-destructive technique and of lower costs, contribute to its use. Modernly, thermoplastic polymer polymethylmethacrylate (acrylic) or PMMA has been used for a variety of applications, from transparent aerospace components to medical-hospital equipment. The study of PMMA's acoustoelasticity using ultrasonic methods allows the indirect inspection of certain physical characteristics of this material. It is known that acoustic waves are affected by the characteristics of the medium, such as temperature, texture and tension. The research was divided into three stages, the first one to analyze the influence of temperature on the velocity of critically refracted longitudinal ultrasonic waves (L_{cr}) in PMMA. For this, the transmission method was used for three different frequencies. In the second, the structural anisotropy was evaluated using the acoustic birefringence using the pulse-echo method. At this stage a rectangular sample was fractured transversely and rejoined to simulate a symmetry break. The third and final step was devoted to characterizing the acoustoelastic constants L_{22} , L_{21} and L_{23} of homogeneous samples by means of longitudinal and shear waves in the pulse-echo mode and the application of an uniaxial force. The results with the waves L_{cr} showed a significant influence of the temperature on the propagation velocity of the ultrasonic waves, another factor of influence was the frequency of the transducers. On the other hand, with acoustic birefringence it was possible to identify a great variation of this magnitude near the fractured zone, that is, of greater anisotropy. The acoustoelastic constants L_{22} , L_{21} and L_{23} were characterized and an increase in the propagation time of the ultrasound wave as a function of the strain was observed for the constants L_{22} and L_{23} . The constant L_{21} decreased the propagation time of the ultrasonic shear wave as a function of the deformation. The ultrasonic techniques employed were relevant and allowed to obtain new results not yet described in the literature. The characterization of the acoustoelastic constants also made it possible to estimate the third order elastic constants (l, m, n and A, B, C). The constants characterized in this research are important to obtain a complete understanding of the elastic properties of polymethylmethacrylate.

Keywords: ultrasound, acoustoelasticity, polymethylmethacrylate, critically refracted longitudinal waves, acoustic birefringence.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Coordenadas para um material no estado natural, inicial e final. . . .	24
Figura 2.2 – Velocidade de ondas planas e campo de tensões para um sistema de coordenadas ortogonais	28
Figura 2.3 – Mudanças relativas das velocidades das ondas em relação a deformação para aço de trilhos.	32
Figura 2.4 – Distribuição do campo de pressão das ondas L_{cr}	33
Figura 2.5 – Representação dos ângulos e direções de onda provenientes da incidência oblíqua de um feixe ultrassônico.	35
Figura 2.6 – Ângulo crítico com ondas longitudinais.	36
Figura 2.7 – Plano de propagação da onda transversal.	37
Figura 4.1 – Diagrama do sistema ultrassônico de medição.	45
Figura 4.2 – Representação do suporte de acrílico utilizado no arranjo experimental das ondas L_{cr}	46
Figura 4.3 – Representação do caminho percorrido pela onda ultrassônica na água.	48
Figura 4.4 – Representação do caminho percorrido pela onda ultrassônica.	48
Figura 4.5 – Diagrama do sistema ultrassônico utilizado para aquisição dos sinais.	50
Figura 4.6 – Diagrama do corpo de prova de aço para o segundo arranjo experimental.	51
Figura 4.7 – Diagrama do corpo de prova do polimetilmetacrilato.	52
Figura 4.8 – Representação das ondas ultrassônicas cisalhantes percorrendo a amostra nas duas polarizações utilizadas.	52
Figura 4.9 – Diagrama do sistema de medição para avaliação da constante acusto-elástica.	54
Figura 4.10–Representação das ondas ultrassônicas percorrendo o material durante aplicação da força uniaxial.	57
Figura 5.1 – Velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal da água de torneira versus temperatura V_{AG}	60
Figura 5.2 – Arranjo experimental para medições da influência da temperatura na velocidade da onda de ultrassom.	61
Figura 5.3 – Tempo de trânsito da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 2,25 MHz.	63
Figura 5.4 – Tempo de trânsito da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 3,50 MHz.	63
Figura 5.5 – Tempo de trânsito da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 5,00 MHz.	64

Figura 5.6 – Velocidade da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 2,25 MHz.	65
Figura 5.7 – Velocidade da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 3,50 MHz.	65
Figura 5.8 – Velocidade da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 5,00 MHz.	66
Figura 5.9 – Coeficiente térmico do polimetilmetacrilato em função da frequência.	67
Figura 5.10–Arranjo experimental para os ensaios de Birrefringência Acústica.	69
Figura 5.11–Birrefringência Acústica na barra de aço.	70
Figura 5.12–Birrefringência Acústica na barra de polimetilmetacrilato.	72
Figura 5.13–Curva de tensão versus deformação do polimetilmetacrilato (ensaio de compressão).	74
Figura 5.14–Corpos de prova de polimetilmetacrilato.	75
Figura 5.15–Velocidade de propagação da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial nos corpos de prova 1 a 4 e referência.	76
Figura 5.16–Velocidade de propagação da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial no corpo de prova A e referência.	77
Figura 5.17–Velocidade de propagação da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial no corpo de prova B e referência.	77
Figura 5.18–Velocidade de propagação relativa da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial nos corpos de prova 1 a 4.	79
Figura 5.19–Velocidade de propagação relativa da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial no corpo de prova A.	79
Figura 5.20–Velocidade de propagação relativa da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial no corpo de prova B.	80
Figura 5.21–Sistema de medição das contantes acustoelásticas.	81
Figura 5.22–Corpos de prova de polimetilmetacrilato.	82
Figura 5.23–Curva de tensão versus deformação do polimetilmetacrilato (ensaio de compressão).	83
Figura 5.24–Velocidade de propagação relativa das ondas ultrassônicas em função da deformação.	84
Figura 5.25–Velocidade de propagação relativa das ondas ultrassônicas em função da deformação - Ajuste linear curvas parciais.	86
Figura 5.26–Velocidade de propagação relativa das ondas ultrassônicas em função da deformação - Ajuste linear curva completa.	88
Figura A.1–Perspectiva superior do suporte de acrílico.	98
Figura A.2–Perspectiva lateral do suporte de acrílico.	98
Figura A.3–Perspectiva explodida do suporte de acrílico.	99
Figura B.1 – Modelo do corpo de prova utilizado nos testes de tração.	100

Figura B.2 – Tensão versus deformação do polimetilmetacrilato para o ensaio de tração.	100
Figura A.1 – Constantes Acustoelásticas L_{ij} para Ondas Longitudinais e Transversais em Materiais da Engenharia.	102
Figura B.1 – Velocidade do som na água pura [m/s] em função da temperatura [°C]	103
Figura C.1 – Módulo de Young (E[GPa])	104
Figura F.1 – Nota Técnica Transdutores Ultrassônicos Pulso-Eco Olympus Panametrics.	107
Figura G.1 – Velocidade de propagação ultrassônica de ondas longitudinais em materiais.	108

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Coeficientes térmicos.	40
Tabela 4.1 – Especificações dos transdutores de imersão.	45
Tabela 4.2 – Especificações dos transdutores de contato.	55
Tabela 5.1 – Ângulo crítico água/polimetilmetacrilato.	62
Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados na medição da velocidade do som na água e no polimetilmetacrilato em função da temperatura.	62
Tabela 5.3 – Resultados da variação de velocidade com relação à temperatura para as frequências de 2,25, 3,50 e 5,00 MHz.	66
Tabela 5.4 – Tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes com direção de polarização longitudinal (t_{32}) e ortogonal (t_{31}) no aço e birrefringência acústica (B).	70
Tabela 5.5 – Tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes com direção de polarização longitudinal (t_{32}) e ortogonal (t_{31}) no polimetilmetacrilato e birrefringência acústica (B).	72
Tabela 5.6 – Forças utilizadas para cada corpo de prova.	75
Tabela 5.7 – Espessuras dos corpos de prova 1ª bateria de ensaios.	76
Tabela 5.8 – Constantes acustoelásticas L_{22} e K_{22} para o polimetilmetacrilato.	81
Tabela 5.9 – Espessuras dos corpos de prova 2ª bateria de ensaios.	82
Tabela 5.10–Parâmetros das curvas de velocidade de propagação relativa das ondas de ultrassom em função da deformação.	84
Tabela 5.11–Constantes acustoelásticas curvas parciais L_{21} , L_{23} e L_{22}	86
Tabela 5.12–Constantes acustoelásticas curvas completas L_{21} , L_{23} e L_{22}	88
Tabela 5.13–Constantes elásticas de segunda ordem.	89
Tabela 5.14–Constantes elásticas de terceira ordem.	89

Lista de símbolos

ρ	Densidade do material
V_l	Velocidade ultrassônica da onda longitudinal
V_t	Velocidade ultrassônica da onda transversal
μ	Constante elástica de segunda ordem
λ	Constante elástica de segunda ordem
E	Módulo de Young
K	Constante volumétrica
G	Módulo de cisalhamento
$\phi(\varepsilon)$	Energia de deformação por volume
C_{ij}	Tensor de segunda ordem das constantes elásticas do sólido
C_{ijkl}	Tensor de quarta ordem das constantes elásticas do sólido
C_{ijklmn}	Tensor de sexta ordem das constantes elásticas do sólido
$\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{kl}, \varepsilon_{mn}$	Tensores de segunda ordem de deformação elástica
I_1, I_2, I_3	Invariantes do tensor de deformação (Lagrangiano)
l, m, n	Constantes elásticas de terceira ordem (Murnaghan)
ρ_0	Densidade do sólido livre de tensões
V_{11}	Velocidade de propagação de onda puramente longitudinal
V_{12}, V_{13}	Velocidade de propagação de ondas puramente transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente entre si
ε	Deformação elástica
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Componentes de deformação elástica
ν	Coefficiente de Poisson
V_{22}, V_{33}	Velocidade de propagação de ondas puramente longitudinais

V_{21}, V_{23}	Velocidade de propagação de ondas puramente transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente entre si
V_{31}, V_{32}	Velocidade de propagação de ondas puramente transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente entre si
V_{11}^o, V_{22}^o	Velocidade de propagação de ondas puramente longitudinais no material livre de tensões
$V_{12}^o, V_{21}^o, V_{23}^o$	Velocidade de propagação de ondas puramente transversais no material livre de tensões
L_{11}, L_{22}	Constantes acustoelásticas de ondas ultrassônicas puramente longitudinais
L_{12}, L_{21}, L_{23}	Constantes acustoelásticas de ondas ultrassônicas puramente transversais
A, B, C	Constantes elásticas de terceira ordem (Landau)
σ	Tensão
t_0	Tempo de propagação da onda ultrassônica no material livre de tensões
K_{11}	Constante acustoelástica de onda ultrassônica puramente longitudinal
L_{cr}	Ondas longitudinais criticamente refratadas
θ_1	Ângulo de onda incidente
θ_2	Ângulo de onda refratada
V_1	Velocidade de propagação de onda no meio 1
V_2	Velocidade de propagação de onda no meio 2
θ_{CR}	Ângulo crítico
t_{12}, t_{13}	Tempo de propagação de ondas puramente transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente entre si
t_{21}, t_{23}	Tempo de propagação de ondas puramente transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente entre si

t_{31}, t_{32}	Tempo de propagação de ondas puramente transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente entre si
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Componentes de tensão
B	Birrefringência acústica
t	Tempo de propagação da onda ultrassônica
Δt_{RS}	Efeito da tensão residual no tempo de percurso da onda ultrassônica
Δt_T	Efeito da diferença de temperatura em relação à temperatura padrão de medição
Δt_F	Efeito da força aplicada no tempo de percurso da onda
Δt_{TX}	Efeito da textura do material no tempo de percurso da onda
T	Temperatura
d	Distância percorrida pela onda no material
k_T	Coefficiente térmico
V_{AG}	Velocidade da onda ultrassônica longitudinal na água (medições somente com a água)
d_{AG}	Distância percorrida pela onda de ultrassom na água (medições somente com a água)
t_{AG}	Tempo de percurso da onda de ultrassom na água (medições somente com a água)
t_t	Tempo total de percurso da onda ultrassônica na água e no polimetilmetacrilato (medições com a L_{cr} no polimetilmetacrilato)
t_{ac}	Tempo de percurso da onda ultrassônica somente no polimetilmetacrilato (medições com a L_{cr} no polimetilmetacrilato)
t_{ag}	Tempo de percurso da onda ultrassônica somente no água (medições com a L_{cr} no polimetilmetacrilato)
d_{ag}	Distância percorrida pela onda ultrassônica somente no água (medições com a L_{cr} no polimetilmetacrilato)
d_{ac}	Distância percorrida pela onda ultrassônica somente no polimetilmetacrilato (medições com a L_{cr} no polimetilmetacrilato)

V_{ac}	Velocidade de propagação da onda ultrassônica somente no polimetilmetacrilato (medições com a L_{cr} no polimetilmetacrilato)
t_{AG}	Tempo de percurso da onda de ultrassom na água (medições somente com a água)
V	Velocidade de propagação do som no material
D	Distância percorrida pela onda de som no material
V_R	Velocidade relativa de propagação do som
V^0	Velocidade de propagação do som no material livre de tensões

Sumário

TRABALHOS PUBLICADOS	20
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos	23
1.1.1 Objetivo Geral	23
1.1.2 Objetivos Específicos	23
1.2 Estrutura	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1 Teoria Acustoelástica	24
2.1.1 Aplicação do Ultrassom para Medição de Tensão	32
2.1.1.1 Ondas Ultrassônicas Longitudinais Criticamente Refra-	
tadas (L_{cr})	33
2.1.1.2 Birrefringência Acústica	36
2.1.2 Fatores de Influência sobre o Tempo de Trânsito das Ondas Ultras-	
sônicas	38
2.1.2.1 Efeito da Temperatura	39
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
4 MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1 Procedimento Experimental	44
4.1.1 Influência da Temperatura na Velocidade das Ondas L_{cr} no Poli-	
metilmetacrilato	45
4.1.1.1 Medição do Tempo de Trânsito da Onda Ultrassônica . .	47
4.1.2 Birrefringência Acústica	50
4.1.2.1 Medição do Tempo de Trânsito da Onda Ultrassônica . .	52
4.1.3 Constantes Acustoelásticas do Polimetilmetacrilato	54
4.1.3.1 Caracterização da Constante Acustoelástica L_{22} - 1ª Fase	
de Ensaio	54
4.1.3.2 Caracterização das Constantes Acustoelásticas L_{21} , L_{23} e	
L_{22} - 2ª Fase de Ensaio	55
4.1.3.2.1 Caracterização das Constantes Elásticas de Se-	
gunda e Terceira Ordem do Polimetilmetacrilato	56
4.1.3.3 Medição do Tempo de Trânsito da Onda Ultrassônica . .	57
4.1.4 Aquisição do Tempo de Trânsito da Onda de Ultrassom	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1 Influência da Temperatura na Velocidade das Ondas L_{cr} no Polimetilme-	
tacrilato	60
5.2 Birrefringência acústica	69

5.2.1	Birrefringência Acústica no Aço	69
5.2.2	Birrefringência Acústica no Polimetilmetacrilato	71
5.3	Constantes Acustoelásticas do Polimetilmetacrilato	74
5.3.1	Caracterização da Constante Acustoelástica L_{22} - 1ª Fase de Ensaio	74
5.3.2	Caracterização das Constantes Acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} - 2ª	
	Fase de Ensaio	81
5.3.2.1	Caracterização das Constantes Elásticas de Segunda e	
	Terceira Ordem do Polimetilmetacrilato	88
6	CONCLUSÃO	91
7	PERSPECTIVAS FUTURAS	92
	Referências	93
	Apêndices	97
	APÊNDICE A Suporte Acrílico	98
	APÊNDICE B Ensaio de Tração no Polimetilmetacrilato.	100
	Anexos	101
	ANEXO A Constantes Acustoelásticas	102
	ANEXO B Velocidade do Som na Água Pura em função da Temperatura .	103
	ANEXO C Módulo de Young para alguns Polímeros	104
	ANEXO D Propagação de Erros	105
	D.0.1 Soma e subtração de grandezas afetadas por erros	105
	D.0.2 Multiplicação e divisão de grandezas afetadas por erros	105
	ANEXO E Incerteza Tipo B	106
	ANEXO F Nota Técnica Transdutores Ultrassônicos Pulso-Eco Olympus	
	Panameric	107
	ANEXO G Velocidade de Propagação Ultrassônica de Ondas Longitudi-	
	nais em Materiais	108

TRABALHOS PUBLICADOS

REZENDE, A. B.; VIEIRA, S. L. Influência da Temperatura na Propagação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (LCR) em Acrílico. V Congresso Brasileiro de Eletromiografia e Cinesiologia e X Simpósio de Engenharia Biomédica (COBEC-SEB 2017), Uberlândia, p. 1-4, outubro 2017.

REZENDE, A. B.; VIEIRA, S. L. Avaliação de Propriedades Acustoelásticas do Polimetilmetacrilato por meio de Ultrassom. 14º Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão (CONPEEX 2017 - A Matemática está em tudo), Goiânia, outubro 2017.

REZENDE, A. B.; VIEIRA, S. L. Método da birrefringência acústica para avaliação de anisotropia em materiais. Anais do XIII Encontro Anual de Computação (EnAComp), Catalão, p. 143-156, maio 2017.

REZENDE, A. B.; VIEIRA, S. L. Caracterização Acustoelástica de Sólidos por Ultrassom. Anais do XXXIII Semana da Física da Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, outubro 2016.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria a avaliação de tensões em estruturas é de grande importância por fornecer informações importantes acerca da integridade da estrutura avaliada. As tensões residuais influenciam em características importantes como a resistência e o funcionamento dos elementos estruturais. Em aplicações como tubulações utilizadas no transporte de gás e derivados do petróleo, trilhos ferroviários, estruturas metálicas na construção civil, conhecer a magnitude e os tipos de tensões, possibilita um melhor aproveitamento e segurança da estrutura em questão.

Um dos principais causadores de tensões residuais em estruturas é o próprio processo de fabricação da peça ou componente a ser avaliado, como, por exemplo: bolhas de gás fundidas, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escórias em uniões soldadas. A soldagem, por exemplo, é um processo que gera tensões devido a contração e expansão desiguais no cordão de solda, na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de base. O aparecimento de tensões residuais pode gerar diversos problemas, como a formação de trincas, maior tendência da estrutura a apresentar fratura e falta de estabilidade dimensional. Existem vários métodos qualitativos e quantitativos de determinação de tensões residuais. De modo geral, tais métodos podem ser divididos em métodos destrutivos e métodos não destrutivos.

As técnicas destrutivas se baseiam na criação de um novo estado de tensões pelo alívio localizado das tensões residuais presentes e na medição da deformação ou dos deslocamentos causados pelo alívio das tensões residuais. Posteriormente, por meio dos dados obtidos as tensões são retrocalculadas, relacionando tensão e deformação através da teoria da elasticidade. As técnicas do furo-cego (anel-usinado), remoção de camadas e seccionamento são algumas das principais técnicas. Entretanto estes métodos tornam-se inviáveis em muitos componentes mecânicos, visto que levam o material à destruição. As técnicas não destrutivas são baseadas na relação entre os parâmetros físicos ou cristalográficos e as tensões residuais. As principais técnicas são: difração de raios X, difração de nêutrons, técnicas magnéticas e ultrassônicas (ROSSINI et al., 2012). Essas técnicas permitem analisar as tensões residuais em pontos específicos no material sem causar danos.

As técnicas ultrassônicas se fundamentam no “Efeito Acustoelástico”, que se baseia nas variações das velocidades de propagação das ondas de ultrassom, que ocorrem, por exemplo, quando estas se propagam através de um material que se submete à tensão. Estas variações de velocidade dependem da direção de propagação e da polarização (movimentação das partículas) das ondas, devido a orientação das ondas

em relação ao estado de tensão no material e os planos cristalinos. Este efeito pode ser relacionado às constantes elásticas de terceira ordem do material, às velocidades de propagação de onda e às tensões residuais (HUGHES; KELLY, 1953).

Entre os métodos de ultrassom para análise de tensões residuais, destacam-se os que utilizam ondas cisalhantes e ondas longitudinais. O primeiro, conhecido como Birrefringência Acústica, baseia-se na variação da diferença de velocidades de duas ondas cisalhantes perpendicularmente polarizadas e propagando-se na direção perpendicular à tensão. O segundo método baseia-se na variação da velocidade de uma onda longitudinal criticamente refratada que se propaga na direção da tensão. As ondas longitudinais criticamente refratadas, cuja sigla é L_{cr} , ou do inglês "critically refracted longitudinal wave", são ondas geradas pela incidência oblíqua de um feixe ultrassônico longitudinal em um ângulo próximo ao primeiro ângulo crítico de refração. As tensões avaliadas por este método são sempre subsuperficiais, visto que as ondas L_{cr} são ondas que se propagam na região subsuperficial no material.

O ensaio por ultrassom caracteriza-se por ser um método não destrutivo capaz de detectar defeitos ou descontinuidades internas presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos. Na literatura, a medição de tensões residuais em materiais metálicos e soldas empregando ultrassom é bem explorada (BRAY, 2000), (KUDRYAVTSEV; KLEIMAN, 2016). Estudar novas aplicações para a técnica ultrassônica é algo motivador, por se tratar de um procedimento relativamente simples, portátil, inócuo ao operador, não ionizante e que pode ser executado de forma rápida. Assim, estudos em outros materiais além dos metais, como polímeros termoplásticos, poderão beneficiar outras áreas como a medicina.

Os polímeros são amplamente utilizados para fazer componentes em veículos aeroespaciais, automóveis e navios, revestimentos, tubos e conexões para água, esgoto e ventilação, carcaças para eletrodomésticos, fibras. O polimetilmetacrilato (PMMA), comercialmente conhecido como acrílico ou "acrylic", "plexiglass" e "perpex" em inglês, é um polímero termoplástico de ampla aplicação, desde componente aeroespacial transparente, a móveis e aplicações médicas. Eles são muito diferentes dos metais em sua elasticidade e resistência, são sensíveis à concentração de tensões e pobres em resistência à rachaduras. Portanto, são vulneráveis aos perigos causados pelo estresse residual. Entretanto oferecem uma série de qualidades, tais como transparência ótica, leveza, alta durabilidade e resistência química. Dentre as aplicações, pode-se destacar seu uso como simulador de tecido biomédico, lentes intraoculares, próteses dentárias, componente para cimento ósseo e implantes estéticos, até a composição de equipamentos hospitalares, como incubadoras (BREUSCH; KUHN, 2003), (LEE; CHOI, 2014).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar as propriedades acustoelásticas do polímero termoplástico polimetilmetacrilato por meio de métodos ultrassônicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Estruturado em quatro etapas, resume-se em:

- Analisar a influência da temperatura sobre a velocidade de propagação da onda ultrassônica L_{cr} no polimetilmetacrilato, para diferentes frequências de excitação;
- Avaliar a anisotropia estrutural, por meio da birrefringência acústica, em uma amostra de polimetilmetacrilato submetida a uma quebra de simetria;
- Caracterizar as constantes acustoelásticas L_{22} , L_{21} e L_{23} para o polimetilmetacrilato, por meio das variações de velocidade das ondas ultrassônicas em função das variações de deformação;
- Estimar as constantes elásticas de terceira ordem (l , m , n e A , B , C) por meio das constantes acustoelásticas L_{22} , L_{21} e L_{23} .

1.2 Estrutura

Com o intuito de melhor esclarecer os tópicos discutidos nessa dissertação, o estudo proposto foi estruturado em 8 seções: Na Seção 1 é descrita a motivação e os objetivos desta pesquisa. A revisão teórica sobre acustoelasticidade e ultrassom é apresentada na Seção 2. A Seção 3 contém uma revisão literária, abordando as duas técnicas ultrassônicas empregadas neste estudo, birrefringência acústica e ondas L_{cr} . Na Seção 4 são descritos os materiais e métodos empregados nos ensaios experimentais. Na Seção 5 são apresentados os resultados, bem como a análise e discussão. Na Seção 6, são apresentadas as conclusões da pesquisa. Finalmente a Seção 8, corresponde às perspectivas futuras do estudo.

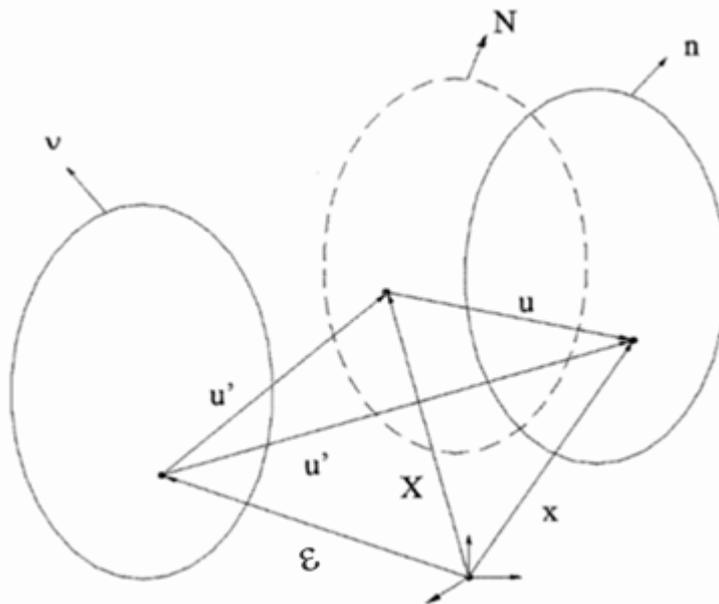
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teoria Acustoelástica

Para a determinação de tensões residuais macroscópicas, que são encontradas em processos de manufatura, deve ser utilizada a teoria das deformações finitas (MURNAGHAN, 1951). Faz-se necessário definir os estados do material antes de alcançar o estado final. Estes estados são: estado natural, estado inicial e estado final.

O estado natural (ν) do corpo refere-se ao estado inicial livre de tensões e deformações, definido por ε na Figura 2.1. O estado inicial (N), definido pelo vetor X refere-se ao corpo deformado ou sobre a ação de alguma carga aplicada. O estado final do corpo (n), definido por x ocorre quando o movimento da onda ou as deformações elásticas, u e u' , são superpostas sobre o corpo no estado natural (ν) ou no estado previamente deformado (N).

Figura 2.1 – Coordenadas para um material no estado natural, inicial e final.



Fonte: Adaptado (LEON-SALAMANCA, 1988).

As ondas elásticas se propagam em materiais sólidos livres de tensões externas (estado natural), com uma velocidade característica do material sob teste. Para as ondas longitudinais as partículas do material vibram na mesma direção em que a onda se propaga, enquanto para as ondas transversais as partículas vibram perpendicularmente

à direção de propagação da onda. Em materiais isotrópicos as propriedades físicas são as mesmas independentemente da direção considerada. Nesses materiais, as velocidades das ondas longitudinal (V_l) e transversal (V_t) são dadas de acordo com as Equações (2.1) e (2.2) (SCHNEIDER, 1997).

$$\rho V_l^2 = \lambda + 2\mu \quad (2.1)$$

$$\rho V_t^2 = \mu \quad (2.2)$$

em que ρ é a densidade do material. As constantes elásticas de segunda ordem, λ e μ , também conhecidas como módulo de Lamé, descrevem o comportamento elástico do material. Na Engenharia as propriedades elásticas são comumente caracterizadas pelos módulos de Young (E), de cisalhamento (G) e a constante volumétrica (K), dadas respectivamente pelas Equações (2.3), (2.4) e (2.5).

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)} \quad (2.3)$$

$$G = \mu \quad (2.4)$$

$$K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3} \quad (2.5)$$

Quando um sólido isotrópico em seu estado natural é submetido a uma tensão externa, as propriedades elásticas são alteradas e a isotropia é perdida. As velocidades das ondas elásticas passam a sofrer influência dos estados de tensão (efeito acustoelástico).

O modelo mais usado para descrição do efeito acustoelástico mostra a influência do estado de tensões na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, dadas por HUGHES e KELLY (1953) e utilizando a teoria das deformações finitas e constantes elásticas de terceira ordem de MURNAGHAN (1951).

A energia de deformação por volume $\phi(\varepsilon)$, representa a energia elástica acumulada pelo trabalho realizado por todas as forças atuando em uma porção em um meio deformável, conforme a Equação (2.6) (SCHNEIDER, 1997).

$$\phi(\varepsilon) = \phi_0 + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \dots \quad (2.6)$$

Reescrevendo a Equação (2.6) em função da deformação elástica ε , $\phi(\varepsilon)$, chega-se a Equação (2.7).

$$\phi(\varepsilon) = \phi_0 + gC_{ij}\varepsilon_{ij} + \frac{1}{2}C_{ijkl}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{kl} + \frac{1}{6}C_{ijklmn}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{kl}\varepsilon_{nm} + \dots \quad (2.7)$$

em que ϕ_0 representa os termos que independem de ε , portanto se a tensão é nula antes da deformação, ϕ_0 é igual a zero. O segundo termo é a energia potencial, que pode ser considerada zero, visto que o nível de referência não é importante. C_{ijkl} e C_{ijklmn} são os tensores de quarta e sexta ordens das constantes elásticas do sólido, respectivamente. Os índices i, j, k, l, m e n representam as direções no plano cartesiano. O número de constantes elásticas é reduzido no caso de sólidos isotrópicos para duas constantes de segunda ordem (μ e λ) e três constantes de terceira ordem (l, m e n). As constantes elásticas são conhecidas pelas suas posições em termos de deformação na Equação (2.7). Os coeficientes dos termos com deformação elevada ao quadrado são constantes de segunda ordem, e as deformações elevadas ao cubo são constantes de terceira ordem. No sólido isotrópico, a densidade de energia de deformação depende apenas dos invariantes I_1, I_2 e I_3 , do tensor de deformação (Lagrangiano), desde que as constantes elásticas sejam invariantes (material isotrópico) sob rotações arbitrárias. Assim, a nova expressão da energia de deformação é dada pela Equação (2.8).

$$\phi(\varepsilon) = \frac{1}{2}(\lambda + 2\mu)I_1^2 - 2\mu I_2 + \frac{1}{3}(l + 2m)I_1^3 - 2mI_1I_2 + nI_3 \quad (2.8)$$

para um sólido isotrópico, a energia de deformação está em função apenas dos invariantes do tensor de deformação, que podem ser definidos pelas Equações (2.9), (2.10) e (2.11):

$$I_1 = tr(\varepsilon) \quad (2.9)$$

$$I_2 = \frac{1}{2}[tr(\varepsilon^2) - (tr(\varepsilon))^2] \quad (2.10)$$

$$I_3 = det(\varepsilon) \quad (2.11)$$

em termos das componentes de deformação, as Equações (2.12), (2.13) e (2.14) :

$$I_1 = \varepsilon_{ii} + \varepsilon_{jj} + \varepsilon_{kk} \quad (2.12)$$

$$I_2 = \varepsilon_{ij}^2 + \varepsilon_{jk}^2 + \varepsilon_{ki}^2 - \varepsilon_{ii}\varepsilon_{jj} - \varepsilon_{jj}\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}\varepsilon_{ii} \quad (2.13)$$

$$I_3 = \varepsilon_{ii}(\varepsilon_{jj}\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{jk}^2) - \varepsilon_{ij}(\varepsilon_{ij}\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{jk}\varepsilon_{ki}) + \varepsilon_{ik}(\varepsilon_{ij}\varepsilon_{jk} - \varepsilon_{jj}\varepsilon_{ki}) \quad (2.14)$$

A densidade do corpo em função da deformação pode ser expressa conforme a Equação (2.15) (SCHNEIDER, 1997):

$$\rho(\varepsilon) = \frac{\rho_0}{1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3} \quad (2.15)$$

em que ρ_0 representa a densidade do sólido livre de deformações.

Considerando-se a propagação de uma onda plana ao longo de um eixo principal de deformação, restam apenas três componentes de deformação não nulas a serem consideradas ε_{ii} , $\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ji}$ e $\varepsilon_{ik}=\varepsilon_{ki}$. Os invariantes são reduzidos às Equações (2.16), (2.17) e (2.18):

$$I_1 = \varepsilon_{ii} \quad (2.16)$$

$$I_2 = -(\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ji} + \varepsilon_{ik}\varepsilon_{ki}) \quad (2.17)$$

$$I_3 = 0 \quad (2.18)$$

Derivando a Equação (2.8) em relação as componentes de deformação ε , a solução das equações de onda resulta em três expressões, conforme as Equações (2.19), (2.20) e (2.21) (BRAY; STANLEY, 1997).

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\varepsilon + (4m + 4\lambda + 4\mu)\varepsilon_1 \quad (2.19)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\varepsilon + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_2 - \frac{1}{2}n\varepsilon_3 \quad (2.20)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\varepsilon + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_3 - \frac{1}{2}n\varepsilon_2 \quad (2.21)$$

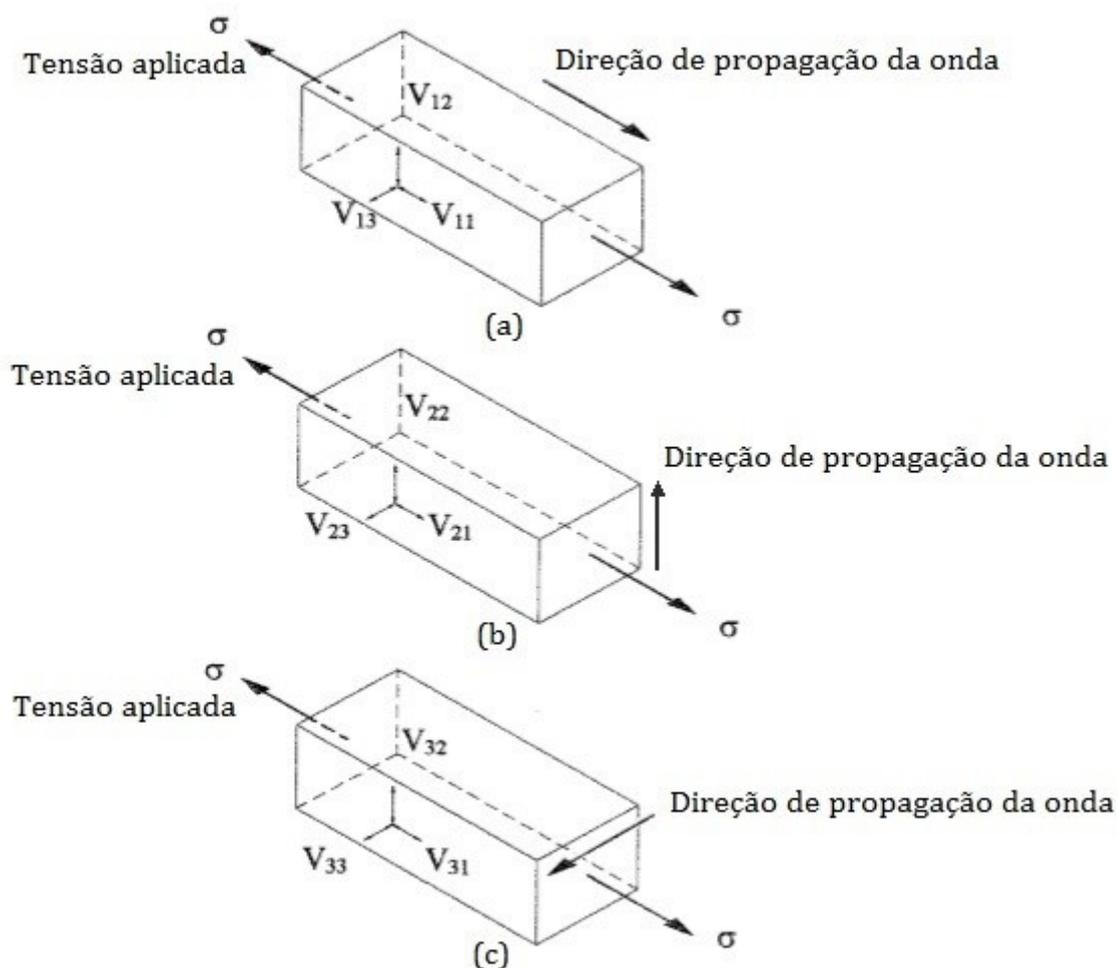
e a Equação (2.22) expressa as relações entre a deformação e suas componentes:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.22)$$

V_{11} , V_{12} e V_{13} expressam as velocidades de propagação de uma onda puramente longitudinal e duas ondas puramente transversais respectivamente, se propagando paralelamente à aplicação da tensão. As ondas transversais se encontram polarizadas

perpendicularmente à direção principal de tensão, ver Figura 2.2(a). O índice 1 refere-se à direção de propagação da onda e os índices 2 e 3 referem-se à direção de movimento das partículas.

Figura 2.2 – Velocidade de ondas planas e campo de tensões para um sistema de coordenadas ortogonais



Fonte: Adaptado (BRAY; STANLEY, 1997).

A Figura 2.2 mostra elementos de uma barra sobre ação de uma tensão uniaxial e ondas que se propagam em três direções perpendiculares. Na Figura 2.2(a) as ondas se propagam paralelas à carga. Nas Figuras 2.2(b) e 2.2(c) as ondas propagam-se em outras direções e as velocidades são também mostradas.

As Equações (2.19), (2.20) e (2.21) demonstradas anteriormente, podem ser simplificadas considerando uma deformação atuando apenas na direção 1 (estado uniaxial).

Portanto, as seguintes considerações podem ser feitas com relação às deformações:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon \quad (2.24)$$

tem-se ν como coeficiente de Poisson. Assim, as Equações se tornam:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + [4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu(1 + \frac{2l}{\lambda})]\varepsilon \quad (2.25)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + [4\mu + \nu\frac{n}{2} + m(1 - 2\nu)]\varepsilon \quad (2.26)$$

A velocidade das ondas planas viajando perpendicularmente ao estado de tensão uniaxial, Figura 2.2(b) e Figura 2.2(c), podem ser expressas pelas Equações (2.27), (2.28) e (2.29).

$$\rho_0 V_{22}^2 = \rho_0 V_{33}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)]\varepsilon \quad (2.27)$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \rho_0 V_{31}^2 = \mu + [(\lambda + 2\mu + m)(1 - 2\nu) + \frac{\nu n}{2}]\varepsilon \quad (2.28)$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \rho_0 V_{32}^2 = \mu + [(\lambda + m)(1 - 2\nu) - 6\nu\mu - \frac{n}{2}]\varepsilon \quad (2.29)$$

A sensibilidade relativa para ondas longitudinais é a variação da velocidade com a deformação ε . Pode ser calculada derivando a Equação (2.25) em relação à ε e dividindo a derivada pela equação original, conforme a Equação (2.30). Para as demais ondas, as Equações (2.31) a (2.34) demonstram a sensibilidade.

$$\frac{dV_{11}/V_{11}^o}{d\varepsilon} = 2 + \frac{(\mu + 2m) + \nu\mu(1 + \frac{2l}{\lambda})}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (2.30)$$

$$\frac{dV_{12}/V_{12}^o}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\nu n}{4\mu} + \frac{m}{2(\lambda + \mu)} = L_{12} \quad (2.31)$$

$$\frac{dV_{22}/V_{22}^o}{d\varepsilon} = -2\nu[1 + \frac{m - \frac{\mu l}{\lambda}}{\lambda + 2\mu}] = L_{22} \quad (2.32)$$

$$\frac{dV_{21}/V_{21}^o}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\nu n}{4\mu} + \frac{\lambda + 2\mu + m}{2(\lambda + \mu)} = L_{21} \quad (2.33)$$

$$\frac{dV_{23}/V_{23}^o}{d\varepsilon} = \frac{m - 2\lambda}{2(\lambda + \mu)} - \frac{n}{4\mu} = L_{23} \quad (2.34)$$

em que V_{11}^o , V_{12}^o , V_{22}^o , V_{21}^o e V_{23}^o são as velocidades de ondas ultrassônicas no material livre de tensão.

Na Equação (2.30), L_{11} é uma constante, conhecida como coeficiente acustoelástico para ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) viajando paralelamente à aplicação da carga. L_{22} é a constante acustoelástica para ondas longitudinais se propagando perpendicularmente à aplicação da carga (Equação (2.32)). As outras constantes acustoelásticas são referentes às ondas cisalhantes se propagando paralelamente (Equação (2.31)) e perpendicularmente à aplicação da carga, polarizadas perpendicularmente entre si (Equações (2.33) e (2.34)).

As Equações (2.32), (2.33) e (2.34) também podem ser rearranjadas de modo que as constantes elásticas de terceira ordem l , m e n (MURNAGHAN, 1951), sejam estimadas a partir das constantes acustoelásticas (SCHNEIDER, 1997).

$$l = \frac{\lambda(\lambda + \mu)}{\mu} \left[\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda} L_{22} + \frac{4(\lambda + \mu)}{(3\lambda + 2\mu)} (L_{21} + \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} L_{23}) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right] \quad (2.35)$$

$$m = \frac{2(\lambda + \mu)}{3\lambda + 2\mu} [\lambda L_{23} + 2(\lambda + \mu) L_{21}] - 2\mu \quad (2.36)$$

$$n = \frac{8\mu(\lambda + \mu)}{3\lambda + 2\mu} [L_{21} - L_{23}] - 4\mu \quad (2.37)$$

As constantes elásticas de terceira ordem podem ser apresentadas de forma alternativa pelos termos A , B , C , introduzidas por LANDAU e LIFSHITZ (1986). A correspondência entre as constantes elásticas de terceira ordem l , m , n e A , B e C , pode ser realizada pelas Equações (2.38), (2.39) e (2.40) (DESTRADE; OGDEN, 2010).

$$l = B + C; \quad (2.38)$$

$$m = \frac{A}{2} + B \quad (2.39)$$

$$n = A \quad (2.40)$$

No Anexo A, encontra-se apresentado valores experimentais para coeficientes acustoelásticos obtidos empregando ondas ultrassônicas em materiais diversos. A variação da velocidade V_{11} , controlada pela constante L_{11} , é muito maior do que nas

demais direções, isso sugere que as ondas que se propagam na mesma direção da aplicação das tensões são as mais indicadas para avaliação das tensões, apresentando assim maior sensibilidade às tensões.

A tensão interna ou residual, pode ser calculada por meio de uma aplicação unidimensional de tensão-deformação em sólidos elásticos. As Equações (2.30) a (2.34) podem ser rearranjadas de modo a fornecer a variação da tensão em função do tempo relativo de percurso da onda (dt/t_0), como mostrado na Equação (2.42). A Equação (2.41) expressa a relação entre a tensão e a deformação (Lei de Hooke).

$$d\sigma = E d\varepsilon \quad (2.41)$$

$$L_{11} = \frac{dV_{11}/V_{11}^o}{d\varepsilon} = \frac{E(dV_{11}/V_{11}^o)}{d\sigma} \quad (2.42)$$

em que $d\sigma$ é a variação da tensão (MPa).

Ao observar a Equação (2.42), nota-se que é desejável que o valor da constante acustoelástica (L_{11}) seja elevado, desta forma há maior sensibilidade do tempo de percurso da onda em relação à mudança de tensão mecânica aplicada. A mesma equação também pode ser utilizada para outras direções ou ondas, notando que o valor de L_{ij} será outro.

A Equação (2.42) pode ser rearranjada para fornecer a variação de tensão ($d\sigma$) em termos do tempo de percurso (dt/t_0), sendo t_0 o tempo de percurso que a onda leva para percorrer um trajeto livre de tensões no material, ver Equação (2.43).

$$d\sigma = \frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (2.43)$$

Na literatura alguns autores preferem trabalhar com a constante K_{ij} , (SCHNEIDER, 1995), ao invés da constante acustoelástica L_{ij} , (ANDRINO, 2003). Assim, a Equação 2.42 também pode ser simplificada como:

$$K_{11} = \frac{(dV_{11}/V_{11}^o)}{d\sigma} \quad (2.44)$$

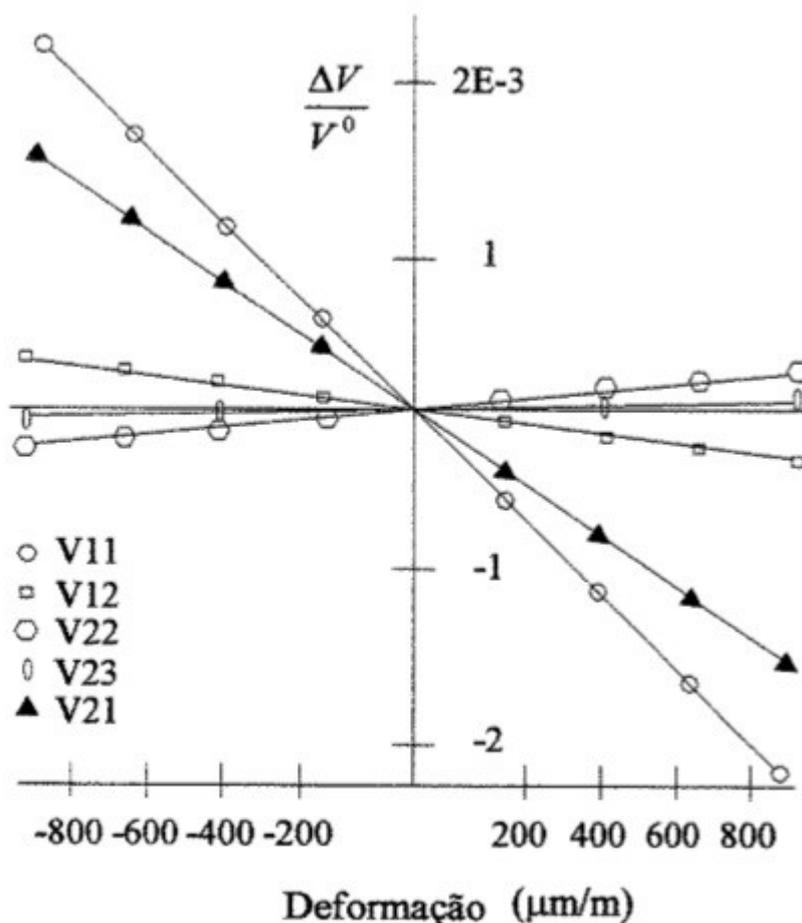
em que:

$$K_{11} = \frac{L_{11}}{E} \quad (2.45)$$

assim o módulo de Young (E) passa a ser incorporado à constante acustoelástica L_{11} , resultando na constante K_{11} . Todas as outras constantes acustoelásticas L_{12} , L_{21} , L_{22} e L_{23} , podem ser reescritas dessa forma.

Na Figura (2.3) é demonstrada a sensibilidade das ondas se propagando nas diversas direções e polarizações para aço de ferrovias. As ondas longitudinais propagando-se na direção da carga apresentaram uma variação mais significativa do tempo de percurso com a deformação. Seguida pelas ondas cisalhantes com as partículas vibrando na direção da carga e se propagando perpendicularmente a esta. As demais ondas não apresentaram sensibilidades significativas a deformação (EGLE; BRAY, 1976).

Figura 2.3 – Mudanças relativas das velocidades das ondas em relação a deformação para aço de trilhos.



Fonte:(EGLE; BRAY, 1976).

2.1.1 Aplicação do Ultrassom para Medição de Tensão

A escolha da técnica para medir quantitativamente tensões residuais depende do tipo de tensão residual que se deseja monitorar, sejam tensões superficiais ou ao longo do volume. As ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) se propagam logo abaixo da superfície, minimizando efeitos de irregularidades superficiais, como a corrosão. Assim a técnica também permite sanar algumas limitações, tais como posicionar o

feixe ultrassônico em posições oblíquas e alcançar regiões de difícil acesso. As ondas longitudinais criticamente refratadas são as mais indicadas para o ensaio de tensões por ultrassom, sua velocidade de propagação é mais sensível às variações de tensão (SRINIVASAN et al., 1991), (LEON-SALAMANCA; BRAY, 1996).

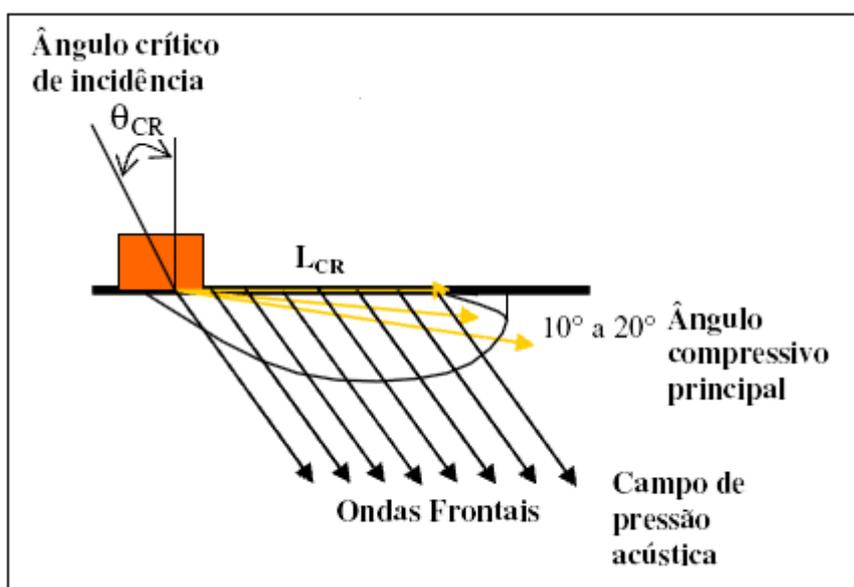
Por outro lado, a técnica da birrefringência acústica também permite quantificar as tensões residuais da região inspecionada. Por meio do efeito acustoelástico é possível quantificar as componentes de tensão no material medindo as velocidades de trânsito de ondas cisalhantes polarizadas perpendicularmente entre si.

2.1.1.1 Ondas Ultrassônicas Longitudinais Criticamente Refratadas (L_{cr})

Conhecidas na literatura inglesa por “subsurface elastic waves”, “headwaves”, “creeping waves” e “lateral waves”, as ondas L_{cr} são ondas sub-superficiais geradas por meio da incidência oblíqua de um feixe ultrassônico longitudinal. As ondas L_{cr} acontecem quando um feixe de ondas longitudinais se propaga de um meio com menor velocidade para outro de maior velocidade com um ângulo de incidência ligeiramente maior do que o ângulo criticamente refratado, chamado de primeiro ângulo crítico. Para isso são utilizados transdutores com inclinação próxima ao primeiro ângulo crítico. As ondas sub-superficiais se movem com velocidade igual à velocidade das ondas longitudinais volumétricas.

A Figura 2.4 apresenta a distribuição de amplitude da pressão acústica das ondas sub-superficiais no plano de incidência.

Figura 2.4 – Distribuição do campo de pressão das ondas L_{cr} .



Fonte: Adaptado (ROSE, 1999).

O feixe ultrassônico incide com um ângulo próximo ao ângulo crítico (θ_{CR}), ocorrendo a propagação de ondas sub-superficiais e ondas frontais refratadas. A máxima sensibilidade para as ondas sub-superficiais acontece quando as ondas estão em um ângulo de 10° a 20° da superfície livre, conforme a Figura 2.4. Esta propriedade faz com que as ondas L_{cr} sejam pouco sensíveis a defeitos superficiais e à rugosidade do material.

Outra característica interessante das ondas L_{cr} está relacionada à frequência e a profundidade em que estas se propagam. Utilizando transdutores do mesmo tamanho porém de frequências diferentes, [BASATSKAYA e ERMOLOY \(1980\)](#) observaram que as ondas criticamente refratadas geradas pelas frequências mais baixas se propagavam com maior profundidade no material.

O conceito de ondas L_{cr} está relacionado ao primeiro ângulo crítico (θ_{CR}), o qual pode ser calculado pela Lei de Snell para meios isotrópicos. Quando uma onda se encontra na interface de dois meios diferentes, ela pode ser parcialmente refletida. A onda refletida retorna em uma direção negativa, através do meio incidente, com a mesma velocidade com a qual ela se aproximou da interface. A onda refratada continua a mover-se no meio na direção positiva. A Lei de Snell, Equação (2.46), relaciona as velocidades das ondas com seus respectivos ângulos de incidência, refração e reflexão. Tal relação é importante no estudo das ondas superficiais, que requerem um cálculo preciso do ângulo de incidência para serem geradas.

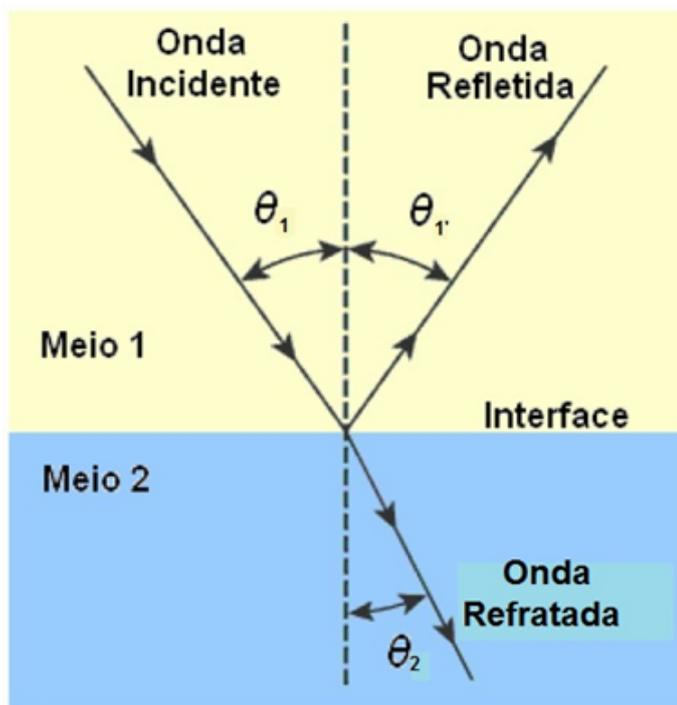
$$\text{sen}\theta_2 V_1 = \text{sen}\theta_1 V_2 \quad (2.46)$$

em que:

- θ_1 - ângulo da onda incidente;
- θ_2 - ângulo da onda refratada;
- V_1 - velocidade de propagação da onda no meio 1;
- V_2 - velocidade de propagação da onda no meio 2;

Na Figura 2.5 um feixe de onda longitudinal incide de forma oblíqua (ângulo θ_1) sobre a interface entre o meio 1 e 2. O feixe é refletido sob um ângulo θ_r e refratado sob um ângulo θ_2 . Quando o ângulo θ_1 (onda incidente) aumenta, a onda refratada se aproxima da superfície. Em determinado momento o aumento de θ_1 aproximará a onda refratada da superfície o suficiente para que $\theta_2 = 90^\circ$. Assim ocorre a formação de ondas longitudinais subsuperficiais. Este ângulo de incidência θ_1 , necessário para tornar θ_2 igual a 90° , é conhecido como primeiro ângulo crítico.

Figura 2.5 – Representação dos ângulos e direções de onda provenientes da incidência oblíqua de um feixe ultrassônico.



Fonte: Adaptado (VIEIRA, 2005).

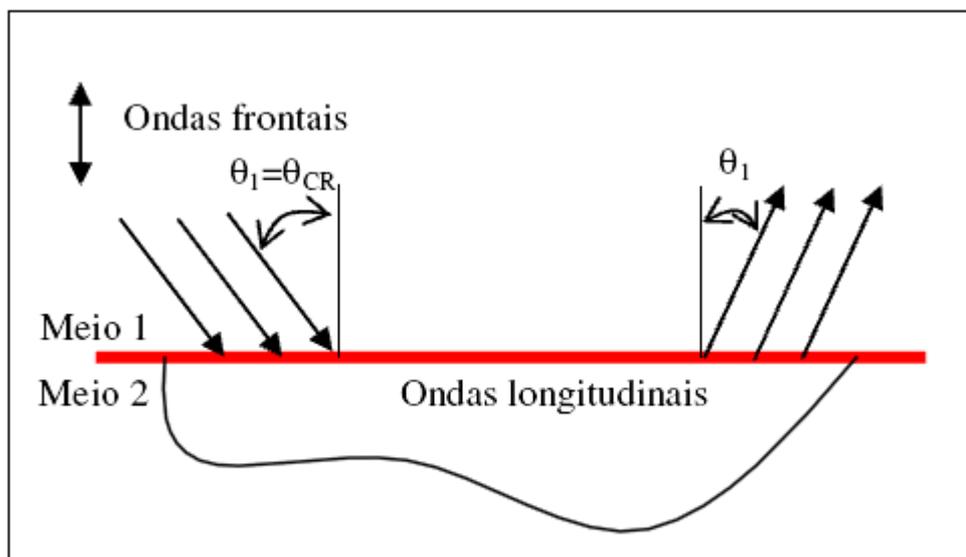
A Figura 2.6 ilustra a propagação de ondas longitudinais sub-superficiais, como as L_{cr} . As ondas frontais incidem do Meio 1 para o Meio 2 com ângulo próximo ao ângulo crítico (θ_{CR}) originando ondas que se propagam sub-superficialmente no Meio 2. Estas ondas podem ser captadas no Meio 1 por transdutores receptores posicionados em um ângulo θ_1 com valor próximo a (θ_{CR}).

A Equação (2.47) demonstra como calcular o ângulo crítico.

$$\theta_{CR} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2.47)$$

As ondas L_{cr} são muito utilizadas para avaliação de tensões. O modo como são geradas, via incidência oblíqua e se propagando sub-superficialmente, permite que estas ondas se propaguem paralelamente à aplicação de uma força externa uniaxial no material. A constante acustoelástica L_{11} , Equação (2.42), relaciona a variação de velocidade de onda com a variação de tensão. Assim, desde que a constante L_{11} do material seja conhecida, é possível medir as variações de tensão utilizando as variações de velocidade de ondas L_{cr} .

Figura 2.6 – Ângulo crítico com ondas longitudinais.



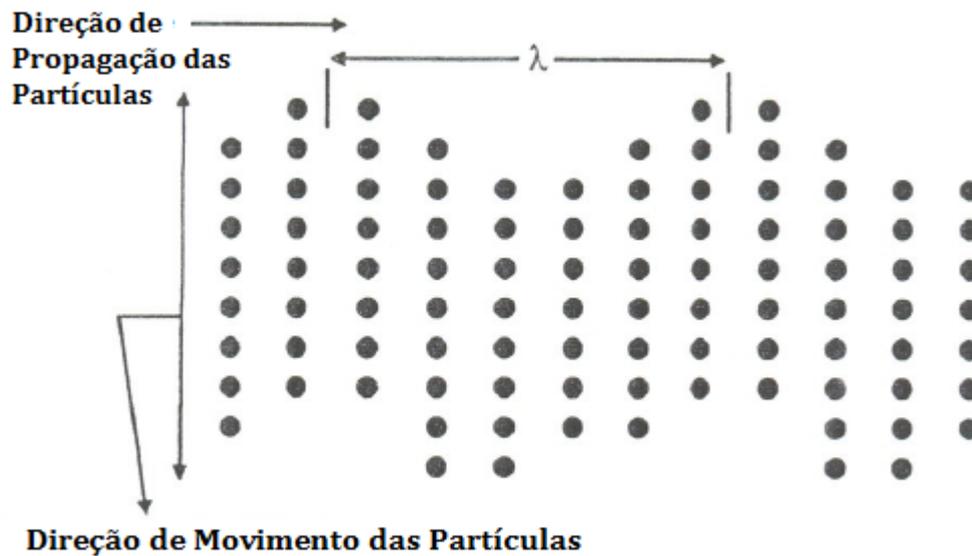
Fonte: Adaptado (ROSE, 1999).

2.1.1.2 Birrefringência Acústica

Quando uma onda ultrassônica se move numa determinada direção em um meio elástico, a sua velocidade de propagação depende, fundamentalmente, das constantes elásticas de segunda ordem do meio e, portanto da sua simetria estrutural. A presença de um estado de tensões elásticas produz pequenas mudanças na velocidade de propagação (efeito acustoelástico) (HUGHES; KELLY, 1953). A velocidade de propagação da onda ultrassônica passa a depender também das constantes elásticas de terceira ordem. Conseqüentemente é possível avaliar o estado de tensões da região percorrida pela onda medindo-se a velocidade de propagação e conhecendo-se as constantes elásticas de segunda e terceira ordem do material.

As ondas cisalhantes ou transversais também são amplamente empregadas para inspeção de materiais e avaliação de tensão. Uma onda é transversal quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda nesse meio. Neste caso, os planos de partículas no meio de propagação mantêm a mesma distância uns dos outros, conforme ilustrado na Figura 2.7. Para que ocorra este tipo de propagação de onda é necessário que as partículas apresentem uma grande força de atração com as partículas próximas, como acontece com os materiais sólidos. Nos líquidos e gases as ondas mecânicas transversais não se propagam em razão da pequena força de coesão existente entre as partículas destes meios. As ondas transversais se propagam com uma velocidade aproximada de 50% da velocidade das ondas longitudinais no mesmo meio.

Figura 2.7 – Plano de propagação da onda transversal.



Fonte: Adaptado (RODRIGUES; SILVA, 2000).

A chamada "polarização" das ondas transversais se refere à direção escolhida para que as partículas vibrem. Na aplicação do ultrassom para medida de tensão utiliza-se o termo da birrefringência ao se empregar ondas cisalhantes e denomina-se birrefringência acústica a diferença fracional da velocidade ou tempo de trânsito da onda ultrassônica polarizada perpendicularmente entre si.

As Equações (2.20) e (2.21) se referem a ondas transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente. Estas diferem entre si apenas nos dois últimos termos, relacionados à deformação nas direções de vibração da onda. Normalizando a diferença de velocidade $V_{12} - V_{13}$, encontra-se a Equação (2.48).

$$\frac{V_{12} - V_{13}}{((V_{12} + V_{13})/2)} = \frac{((4\mu + n)/4\mu)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)} \quad (2.48)$$

Considerando a aproximação $[(V_{12} + V_{13})/((V_{12} + V_{13})/2)] = 2(V_t)^2$, visto que as velocidades V_{12} e V_{13} são velocidades de ondas transversais. As componentes de deformação podem ser substituídas pelas componentes de tensão por meio da Lei de Hooke, ver Equação (2.49).

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_3 = \frac{(1/2\mu)}{(\sigma_2 - \sigma_3)} \quad (2.49)$$

A velocidade pode ser escrita em função do tempo de trânsito da onda e da distância percorrida, como as duas velocidades, V_{12} e V_{13} , são do mesmo tipo de onda

(transversal), as equações podem ser expressas de forma independente da distância, conforme as Equações (2.50), (2.51) e (2.52), (SCHNEIDER et al., 1981).

$$\frac{t_{13} - t_{12}}{((t_{12} + t_{13})/2)} = \frac{(4\mu + n)(\sigma_2 - \sigma_3)}{8\mu^2} \quad (2.50)$$

$$\frac{t_{21} - t_{23}}{((t_{21} + t_{23})/2)} = \frac{(4\mu + n)(\sigma_3 - \sigma_1)}{8\mu^2} \quad (2.51)$$

$$\frac{t_{32} - t_{31}}{((t_{32} + t_{31})/2)} = \frac{(4\mu + n)(\sigma_1 - \sigma_2)}{8\mu^2} \quad (2.52)$$

A birrefringência acústica, como citado anteriormente, é a diferença fracional da velocidade ou tempo de trânsito das ondas transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente, portanto pode ser escrita conforme as Equações (2.53), (2.54) e (2.55).

$$B = \frac{V_{13} - V_{12}}{((V_{13} + V_{12})/2)} = \frac{t_{13} - t_{12}}{((t_{13} + t_{12})/2)} \quad (2.53)$$

$$B = \frac{V_{21} - V_{23}}{((V_{21} + V_{23})/2)} = \frac{t_{21} - t_{23}}{((t_{21} + t_{23})/2)} \quad (2.54)$$

$$B = \frac{V_{32} - V_{31}}{((V_{32} + V_{31})/2)} = \frac{t_{32} - t_{31}}{((t_{32} + t_{31})/2)} \quad (2.55)$$

em que:

- B - birrefringência acústica;
- $V_{12}, V_{13}, V_{21}, V_{23}, V_{31}$ e V_{32} - velocidades de propagação da ondas transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente entre si;
- $t_{12}, t_{13}, t_{21}, t_{23}, t_{31}$ e t_{32} - tempo de propagação da ondas transversais se propagando na mesma direção e polarizadas perpendicularmente entre si;

2.1.2 Fatores de Influência sobre o Tempo de Trânsito das Ondas Ultrassônicas

A variação de tensão no material não é o único fator que provoca variações na velocidade de propagação da onda ultrassônica. Os efeitos da textura e da temperatura também influenciam os dados coletados.

Estudos revelam que o tempo de percurso de ondas longitudinais propagando-se num material apresenta relação linear com a temperatura para alguns materiais, como

o aço (SANTOS, 2007). A quantificação desse fator de influência possibilita corrigir a tensão medida com o conhecimento da temperatura em que se encontra o material.

A Equação (2.56) apresenta a forma de influência dos efeitos da tensão, textura e temperatura no tempo de propagação de onda (BRAY; STANLEY, 1997).

$$t = t_0 + \Delta t_{RS} + \Delta t_T + \Delta t_F + \Delta t_{TX} \quad (2.56)$$

em que:

- t - tempo de percurso da onda;
- t_0 - tempo de percurso da onda na temperatura padrão no material homogêneo, isotrópico e livre de tensões;
- Δt_{RS} - efeito da tensão residual no tempo de percurso da onda;
- Δt_T - efeito da diferença de temperatura em relação à temperatura padrão medida;
- Δt_F - efeito da força aplicada no tempo de percurso da onda;
- Δt_{TX} - efeito da textura do material no tempo de percurso da onda;

2.1.2.1 Efeito da Temperatura

A temperatura induz a diferenças de velocidade na propagação da onda de ultrassom, e este fenômeno ocorre em diversos materiais. A relação da velocidade de propagação da onda e da temperatura (dV/dT) é expressa pela Equação (2.57).

$$\frac{dV}{dT} = k_T \left(\frac{m}{s^\circ C} \right) \quad (2.57)$$

em que k_T é o coeficiente térmico para um material particular.

O efeito da temperatura no tempo de trânsito da onda ultrassônica é calculado conforme a Equação (2.58):

$$\Delta t_T = \frac{d}{k_T \Delta T} \quad (2.58)$$

em que:

- d - distância percorrida pela onda no material;
- ΔT - diferença de temperatura medida;

Na Tabela 2.1 são apresentados alguns valores do coeficiente térmico k_T encontrados na literatura para o aço e o acrílico.

Tabela 2.1 – Coeficientes térmicos.

Material	k_T ($m/s^{\circ}C$)
Aço Perlítico	-0,55
Acrílico (PMMA)	-2,3

Fonte: Adaptado (BRAY (1998)).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aplicação do ultrassom na medição de tensões em materiais, por meio do efeito acustoelástico (isto é, efeito das tensões sobre as velocidades das ondas ultrassônicas), tem uma longa história. Um breve histórico sobre a acustoelasticidade, técnicas ultrassônica de medição de tensão, efeito da temperatura na propagação do ultrassom e aplicação das técnicas ultrassônicas de medição de tensão em polímeros, será apresentado nos parágrafos seguintes.

A moderna teoria da acustoelasticidade foi desenvolvida por [HUGHES e KELLY \(1953\)](#), que embasados na teoria das deformações finitas de [MURNAGHAN \(1951\)](#), desenvolveram as relações básicas entre a velocidade da onda ultrassônica e a deformação que surge quando uma tensão uniaxial é aplicada em um material isotrópico. Alguns anos depois [EGLE e BRAY \(1976\)](#) realizaram medições da variação das velocidades de ondas ultrassônicas devido a uma tensão induzida em aços tipicamente usados em trilhos ferroviários. As constantes elásticas de terceira ordem foram calculadas por meio dos dados acustoelásticos e das velocidades de ondas obtidas. Já nos anos 2000, [ORTEGA et al. \(2003\)](#) apresentaram um método de determinação das constantes elásticas em materiais isotrópicos e levemente ortotrópicos baseado na medida da velocidade de fase de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais. Nesse trabalho, eles apresentaram resultados obtidos em três materiais metálicos diferentes e discutiram os problemas da aplicação ultrassônica nas peças, referentes a dimensões, frequência e atenuação. Além de estudarem a homogeneidade do material, a precisão dos sistemas de medidas dimensionais e de tempo de percurso da onda ultrassônica.

A utilização do ultrassom para medição de tensões empregando-se as ondas cisalhantes veio por [BENSON e RAELSON \(1959\)](#). Estes aplicaram uma das primeiras técnicas experimentais utilizando o ultrassom como forma de mensurar a tensão, por meio da variação da velocidade de onda transversal quando o sentido da onda coincidia com o da tensão aplicada, e quando lhe era perpendicular. Tal fenômeno ficou conhecido como birrefringência acústica. Desde então a técnica ultrassônica passou a ser explorada por vários autores. [LAMY et al. \(2002\)](#) demonstraram o potencial da técnica ultrassônica da birrefringência acústica na análise de tensões residuais. A técnica ultrassônica foi empregada na análise do tratamento térmico para alívio de tensões em chapas de aço estrutural unidas por uma solda de topo.

Outra técnica ultrassônica aplicada na medição de tensões faz uso de ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}). Autores como [SRINIVASAN et al. \(1991\)](#) demonstraram que as ondas longitudinais criticamente refratadas são as mais sensíveis

a variações de tensões, sendo portanto, as mais indicadas para medição de tensão utilizando-se da teoria acustoelástica. Posteriormente, [BRAY \(2000\)](#) descreveu aplicações da técnica ultrassônica para medição de tensão superficial ao longo de elementos de comprimentos finitos. Materiais comumente utilizados na engenharia, como alumínio e algumas qualidades de aço, foram analisados. Aplicações específicas foram discutidas na laminação, em placas de alumínio soldadas, em vasos de pressão e em rotores de turbina. O autor mediu a sensibilidade da variação da velocidade de propagação da onda nos corpos de prova conforme a direção de propagação foi alterada. A variação mais significativa ocorreu com as ondas longitudinais se propagando na mesma direção das tensões. O tipo de onda utilizada foi a onda longitudinal criticamente refratada (L_{cr}). As medições experimentais foram realizadas por dois transdutores de transmissão (emissor e receptor) separados por uma distância fixa. No ano seguinte, [ORTEGA \(2001\)](#) desenvolveu um método de medição de tensões residuais por ultrassom baseado no ângulo de refração, através da utilização de ondas de incidência oblíqua. O autor demonstrou a mudança da velocidade em relação a vários ângulos de refração. Destacaram-se duas grandes vantagens: primeiro, para a determinação da tensão residual não existe a necessidade do conhecimento prévio da espessura do material, segundo, não é necessário determinar as velocidades de propagação das ondas.

Na França, o laboratório de Engenharia da Universidade de Tecnologia de Troyes ([BELAHCENE; LU, 2002](#)), determinaram as tensões residuais utilizando-se ondas longitudinais criticamente refratadas no modo de imersão. A técnica requeria um conhecimento prévio das constantes acustoelásticas para o cálculo das tensões residuais, que foram fornecidas por uma máquina de testes de tensão. Apesar do processo de calibração do equipamento demandar um tempo maior, o processo de medida de tempo foi curto, possibilitando um rápido controle de medida da tensão residual.

No Brasil, [ANDRINO \(2003\)](#) avaliou as tensões residuais por meio do efeito acustoelástico em juntas soldadas de placas de aço API 5L X65 e API 5L X70. Também foi determinado a relaxação em placas de aço API 5L X70, utilizadas em dutos. Foram utilizadas ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) e ondas transversais. As tensões longitudinais foram determinadas nas juntas soldadas após a soldagem e após o alívio de tensões. Os perfis de tensão longitudinal, obtidos para os dois aços avaliados, API 5L X65 e API 5L X70, apresentaram concordância com o perfil de tensões esperado. Verificou-se uma região de tração no cordão de solda e em regiões mais afastadas, as tensões foram diminuindo. Os resultados após o alívio de tensões demonstraram coerência. O autor afirma que o método ultrassônico foi efetivo para a obtenção dos perfis de tensão residual para materiais usados na confecção de gasodutos e para medir a relaxação de tensão residual em chapas soldadas.

Alguns estudos foram realizados explorando a temperatura como fator de

influência na propagação das ondas ultrassônicas. FRAGA, SANTOS e ANDRINO (2008) realizaram um estudo com amostras de aço API 5L X70, muito utilizado em tubulações, para avaliar os efeitos da temperatura nas medições de tensão. No trabalho também foi avaliada a influência da frequência na variação da velocidade de propagação da onda com a temperatura. Os autores trabalharam com três frequências diferentes, 2,25, 3,50 e 5,00 MHz, durante as medições. Dois anos depois SANTOS et al. (2010) apresentaram a influência da temperatura na velocidade de propagação de ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) no aço API 5L X70. Foram realizadas medições da velocidade da onda ultrassônica, sob diferentes temperaturas, no aço e na sapata de acrílico utilizada como base para os transdutores. O estudo foi realizado somente com a frequência de 5,00 MHz.

No campo de atuação do ultrassom na medição de tensões em polímeros, destacam-se alguns trabalhos. BRAY, VELA e AL-ZUBI (2005) analisaram a tensão e efeitos da temperatura por meio do ultrassom em amostras de polietileno de alta densidade (HDPE) e no polietileno do tipo "cross-linked". Os resultados foram obtidos para ondas longitudinais criticamente refratadas se propagando em uma frequência de 2,25 MHz. Os ensaios de análise do efeito da temperatura apresentaram um coeficiente térmico de $-3,5263 [(m/s)/^{\circ}C]$ para o HDPE. A constante acustoelástica L_{11} foi caracterizada para dois tipos diferentes do polietileno "cross-linked", "cross-linked"natural (CLN) e "cross-linked"preto (CLB). Foram apresentados os valores de $L_{11} = -0,85$ para o CLN e $L_{11} = -1,2$ para o CLB. JIA et al. (2014) realizaram um estudo da tensão e efeitos da temperatura nas ondas longitudinais em polímeros. Foram avaliados quatro polímeros diferentes: poliamida (PA), policarbonato (PC), poliestireno (PS) e o polibutileno tereftalato (PBT). As constantes acustoelásticas dos materiais para as ondas longitudinais criticamente refratas K_{11} e para as ondas longitudinais volumétricas K_{22} foram caracterizadas. As constantes térmicas também foram estimadas para cada um dos polímeros.

Os pesquisadores ZHU et al. (2015) também apresentaram resultados envolvendo a aplicação do ultrassom no estudo de tensões em polímeros. O método da birrefringência acústica foi empregado na análise de tensões residuais em polímeros termoplásticos isotrópicos e levemente anisotrópicos. O acrílico foi escolhido como material a ser caracterizado, isso porque este é um material isotrópico, mais fácil de ser analisado. Foi utilizado o processo de "Frozen Stress", os estados de tensão podem ser paralisados deformando o material em uma temperatura elevada com a aplicação de uma força moderada. No processo blocos do mesmo material foram submetidos ao mesmo processo, porém sob a aplicação de forças constantes diferentes, 0,5 kN, 5 kN e 10 kN. Foram obtidos valores de 0% a -0.202% de birrefringência. Devido a maior atenuação do sinal acústico nos polímeros, a técnica ultrassônica que é amplamente utilizada na análise de tensões residuais em metais, não é muito aplicada em polímeros termoplásticos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Procedimento Experimental

O material analisado nesta pesquisa foi o polimetilmetacrilato, como mencionado anteriormente. Em um dos ensaios foram realizadas medições também em uma amostra de aço, um material já muito explorado, buscando comparar os resultados obtidos para o polimetilmetacrilato e o aço.

Três tipos de ensaios experimentais foram desenvolvidos:

- O primeiro procedimento descreveu a influência da temperatura sobre a velocidade de propagação de ondas L_{cr} no polimetilmetacrilato. Foram empregados três conjuntos de transdutores de diferentes frequências, 2,25, 3,50 e 5,00 MHz. Os coeficientes térmicos foram estimados para cada uma das frequências.

- O segundo analisou a anisotropia estrutural por meio dos índices de birrefringência acústica. Ondas ultrassônicas cisalhantes polarizadas perpendicularmente entre si foram empregadas no estudo em dois materiais isotrópicos distintos, polimetilmetacrilato e aço.

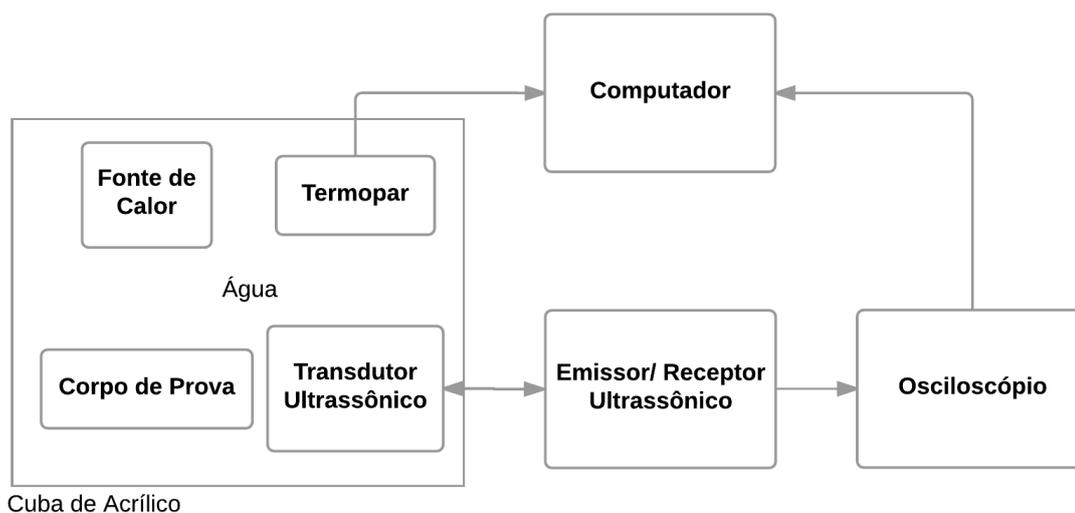
- O terceiro procedimento caracterizou as constantes acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} do material de interesse, polimetilmetacrilato. O procedimento foi dividido em duas fases: 1ª e 2ª fase. Na 1ª fase foram realizados testes de caracterização apenas da constante L_{22} , testando duas metodologias diferentes. Na 2ª fase foram realizados ensaios para caracterização das constantes L_{21} , L_{23} e L_{22} . Os ensaios dessa 2ª fase foram realizados de forma mais acurada, empregando um micrômetro para aferir a espessura das amostras e uma pinça de nylon para manter a pressão sob os transdutores constante para todo o ensaio. Neste estudo foram aplicadas diferentes tensões uniaxiais sobre peças de polimetilmetacrilato e realizadas medições do tempo de trânsito da onda de ultrassom longitudinal durante o processo.

Por último foram estimadas as constantes elásticas de terceira ordem do polimetilmetacrilato (l , m , n e A , B , C), por meio das constantes acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} caracterizadas.

4.1.1 Influência da Temperatura na Velocidade das Ondas L_{cr} no Polimetilmetacrilato

O sistema de medição utilizado nesta pesquisa com as ondas L_{cr} , para avaliar a influência da temperatura na velocidade da onda ultrassônica, está ilustrado no fluxograma da Figura 4.1.

Figura 4.1 – Diagrama do sistema ultrassônico de medição.



Fonte: Próprio Autor.

Transdutores de imersão de ondas longitudinais, para as frequências de 2,25, 3,50 e 5,00 MHz foram selecionados para as medições (método de transmissão). Os transdutores foram diretamente conectados, via cabo coaxial, ao gerador de pulsos (Pulser/Receiver 5072PR, Olympus, PA, USA). Na Tabela 4.1 são descritas as características dos transdutores. O transdutor de maior raio foi utilizado como transmissor e o de menor raio como receptor.

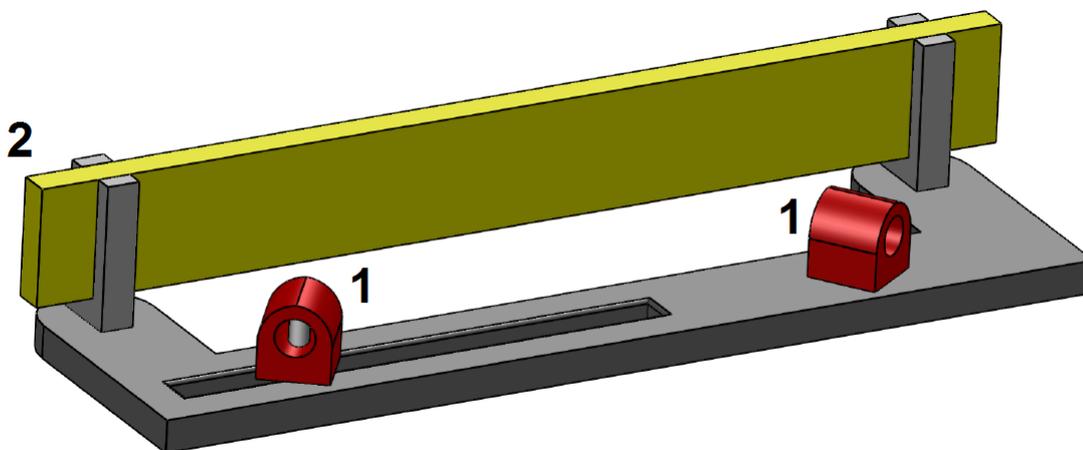
Tabela 4.1 – Especificações dos transdutores de imersão.

Frequência dos Transdutores de Imersão (MHz)	Raio (cm)	Olympus Panameric
2,25	12,70	NDT A309S
	6,35	NDT V310
3,50	12,70	NDT A382S
	6,35	NDT V384
5,00	12,70	NDT 306S
	6,35	NDT 323S

Fonte: Próprio Autor.

O suporte na Figura 4.2 foi confeccionado em acrílico e utilizado para posicionar os transdutores com o ângulo de incidência adequado (Tabela 5.1) e apoiar o corpo de prova. O suporte possibilitava alterar o ângulo de incidência, a distância entre os transdutores, e a distância entre os transdutores e o corpo de prova. Os cabeçotes em vermelho (1) serviram para posicionar os transdutores, e a placa em amarelo (2) representa o corpo de prova, posicionado na vertical em frente aos transdutores. As cores são meramente ilustrativas. No Apêndice A encontra-se mais ilustrações do suporte de acrílico desenvolvido e utilizado no presente estudo.

Figura 4.2 – Representação do suporte de acrílico utilizado no arranjo experimental das ondas L_{cr} .



Fonte: Próprio Autor.

Para obter variações na temperatura que pudessem influenciar nos resultados, foi adotado um procedimento de controle utilizando como fonte de calor um aquecedor termostático de imersão (A100, Lauda-Brinkmann, Lauda, Königshofen, Alemanha, precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$). A fonte de calor estava imersa em água, dentro de uma cuba de acrílico de $[(34,80 \pm 0,03) \text{ cm} \times (20,80 \pm 0,03) \text{ cm} \times (19,00 \pm 0,03) \text{ cm} \times (1,00 \pm 0,03) \text{ cm}]$ (comprimento \times altura \times largura \times espessura). O controle de aquecimento da fonte possibilitou elevar gradualmente a temperatura durante o experimento. Inicialmente o sistema estava a uma temperatura de 24°C . As medições foram realizadas a medida que a temperatura era elevada na fonte de calor (cerca de 2°C) atingindo um valor máximo de aproximadamente 39°C . Realizou-se cinco medições de tempo de trânsito da onda para cada temperatura.

O monitoramento da temperatura do sistema foi realizado por um sistema de medição de temperatura por termopares (National Instruments, TX, EUA). O termopar empregado foi do tipo K, cuja faixa de medição varia entre -40 a 204°C (MTK-01, Minipa,

SP, Brasil), interligado a um módulo de condicionamento de sinais (NI DAQ-9212) integrado a um módulo de comunicação (NI DAQ-9171), conectado a um computador via cabo USB. Este estava imerso na cuba de acrílico, próximo ao corpo de prova. Considerou-se o sistema em equilíbrio térmico (temperatura aferida era a mesma em todas as regiões) cerca de 15 minutos após elevar a temperatura na fonte de calor. Os valores de temperatura adotados foram obtidos por meio da estimativa do valor médio e desvio padrão de cinco aferições realizadas pelo termopar. O termopar empregado possui limite padrão de erro de $\pm 2,2$ °C ou 0,75% do valor medido. Por exemplo, adotando-se 0,75% do maior valor medido que foi 39°C estimou-se uma incerteza de $\pm 0,3$ °C. Um termômetro de bulbo, precisão $\pm 0,5$ °C foi utilizado previamente para a calibração da leitura obtida pelo termopar. A exatidão das medidas ficou dentro do limite de precisão do termômetro de bulbo.

O corpo de prova avaliado foi uma única barra retangular de polimetilmetacrilato, de dimensões [(260,00 \pm 0,03) mm x (32,00 \pm 0,03) mm x (9,50 \pm 0,03) mm] (comprimento x altura x espessura), de faces planas paralelas e superfícies polidas. As incertezas das medições das dimensões foram calculadas conforme Anexo E.

Os coeficientes térmicos foram obtidos da curva de velocidade de propagação do som no acrílico em função da temperatura.

4.1.1.1 Medição do Tempo de Trânsito da Onda Ultrassônica

Inicialmente foram realizadas medições somente com a água, buscando avaliar a influência da temperatura na velocidade de propagação do som na água de torneira (curva de caracterização da água utilizada). Empregou-se um transdutor ultrassônico de imersão de 3,50 Mhz de frequência (Olympus Panameric, NDT A382S, raio de 12,70 mm), por meio do método pulso-eco. Neste método é utilizado apenas um transdutor para transmitir e receber as ondas ultrassônicas. O pulso elétrico é aplicado no transdutor emissor, gerando uma onda ultrassônica que se propaga através do meio e é captada pelo mesmo transdutor, que atua também como receptor. O tempo de trânsito da onda representa o atraso temporal para que a onda percorra o caminho de ida e volta até o transdutor.

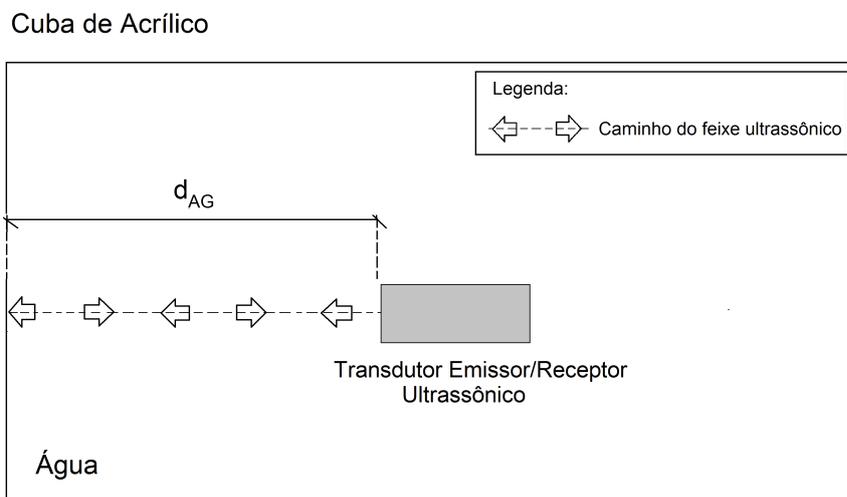
A velocidade do som na água foi obtida pela Equação (4.1), por meio do método pulso-eco, ver Anexo F.

$$V_{AG} = 2 \frac{d_{AG}}{t_{AG}} \quad (4.1)$$

em que V_{AG} é a velocidade de propagação do som na água, d_{AG} a distância percorrida pela onda na água e t_{AG} o tempo de propagação da onda. Os dados de velocidade do som na água calculados foram utilizados para construir a curva de caracterização da

água em função da temperatura. A Figura 4.3 representa o caminho percorrido pelo feixe ultrassônico na água.

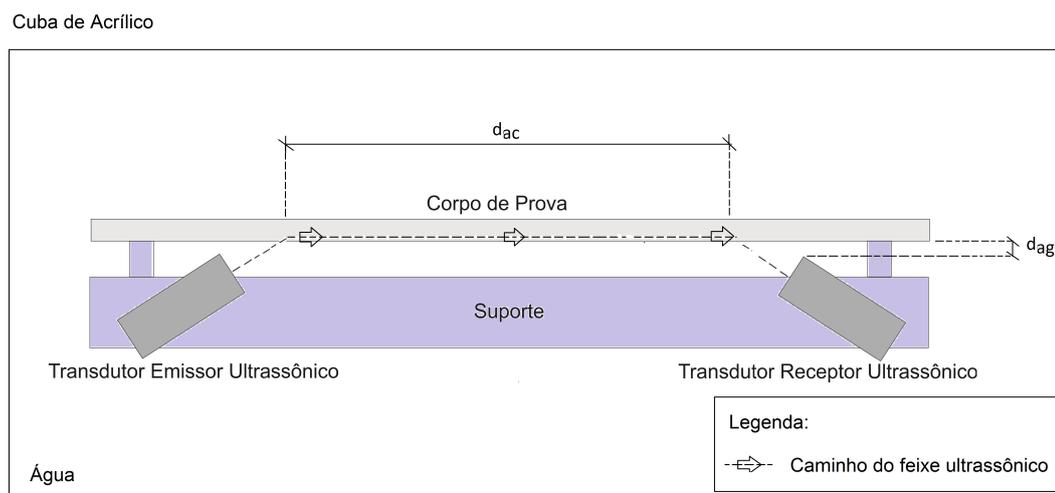
Figura 4.3 – Representação do caminho percorrido pela onda ultrassônica na água.



Fonte: Próprio Autor.

Em seguida foram realizadas as medições para avaliar a influência da temperatura na velocidade das ondas Lcr no polimetilmetacrilato. Na Figura 4.4 é apresentado o esquema do caminho percorrido pela onda Lcr na água e no polimetilmetacrilato.

Figura 4.4 – Representação do caminho percorrido pela onda ultrassônica.



Fonte: Próprio Autor.

Um par de transdutores de mesma frequência foram empregados para gerar as ondas ultrassônicas (método de transmissão). Neste método são utilizados dois

transdutores, um para transmitir e outro para receber as ondas ultrassônicas. O pulso elétrico é aplicado no transdutor emissor, gerando uma onda ultrassônica que se propaga através do meio e é captada pelo transdutor receptor.

O tempo de trânsito da onda somente no polimetilmetacrilato (t_{ac}), foi obtido pela Equação 4.2.

$$t_{ac} = t_t - t_{ag} = t_t - \frac{d_{ag}}{V_{AG}} \quad (4.2)$$

em que t_t é o tempo total de trânsito da onda de ultrassom na água e no polimetilmetacrilato, t_{ag} o tempo de propagação da onda na água e d_{ag} a distância percorrida na água. Os valores de V_{AG} foram extraídos da curva de caracterização da água, construída previamente (Equação (4.1)).

A velocidade de propagação da onda somente no polimetilmetacrilato é determinada pela Equação (4.3).

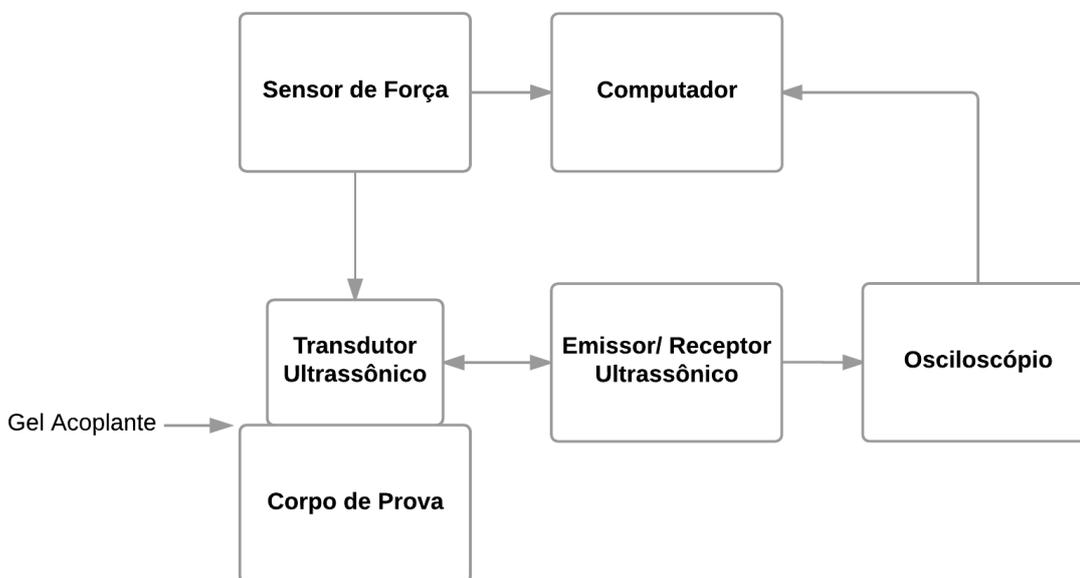
$$V_{ac} = \frac{d_{ac}}{t_{ac}} \quad (4.3)$$

em que d_{ac} é a distância percorrida pela onda ultrassônica no polimetilmetacrilato e t_{ac} o tempo de trânsito da onda no mesmo.

4.1.2 Birrefringência Acústica

O sistema de medição empregado para estimar os índices de Birrefringência Acústica, está ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Diagrama do sistema ultrassônico utilizado para aquisição dos sinais.



Fonte: Próprio Autor.

O transdutor de contato de ondas transversais, incidência normal, frequência 5,00 MHz (Olympus Panameric, V110-RM, raio de 6,35 mm) foi utilizado para gerar as ondas transversais nas duas polarizações desejadas. O transdutor foi diretamente ligado, via cabo coaxial, ao gerador de pulsos (Pulser/Receiver 5072PR, Olympus, PA, USA). Foi empregado o método pulso-eco para geração e recepção das ondas de som.

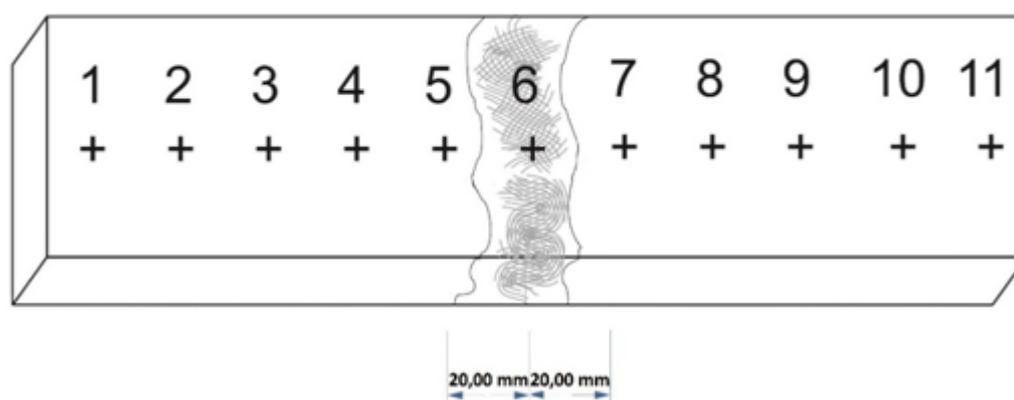
O material acoplante (Shear Gel - acoplante ambientalmente correto para ultrassom, Sonotech) proporcionou o acoplamento das ondas de cisalhamento geradas pela incidência normal (zero grau) com o corpo de prova. O gel foi aplicado, e reaplicado quando necessário, em todas as regiões do material em que foram realizadas medições.

Um sensor de força (Pasco, Economy Force Sensor, CI-6746) foi utilizado para medir a força aplicada ao transdutor, de modo a garantir que todas as medidas fossem realizadas sobre as mesmas condições. Adotou-se o valor de $(7,00 \pm 0,03)$ N de força para as medições.

Dois corpos de prova de materiais diferentes foram utilizados. Inicialmente uma barra de aço, material já muito explorado na literatura, e o polimetilmetacrilato, material de interesse desse estudo. A barra de aço, de dimensões $[(245,00 \pm 0,30) \text{ mm} \times (75,00 \pm 0,30) \text{ mm} \times (9,00 \pm 0,30) \text{ mm}]$ (comprimento x altura x espessura) foi cortada ao meio, em seguida as suas faces novamente unidas por meio de soldagem elétrica (expressões

para o cálculo das incertezas no Anexo E). Assim, o corpo de prova utilizado foi uma barra retangular, usinada de forma que suas faces ficassem paralelas e com a superfície devidamente polida. Em seguida, foram demarcadas regiões ao longo do comprimento da barra, sendo uma no centro (na solda) e as outras dez equidistantes da região central. Em cada região, foram marcados pontos para indicar os locais de acoplamento do transdutor, como ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Diagrama do corpo de prova de aço para o segundo arranjo experimental.

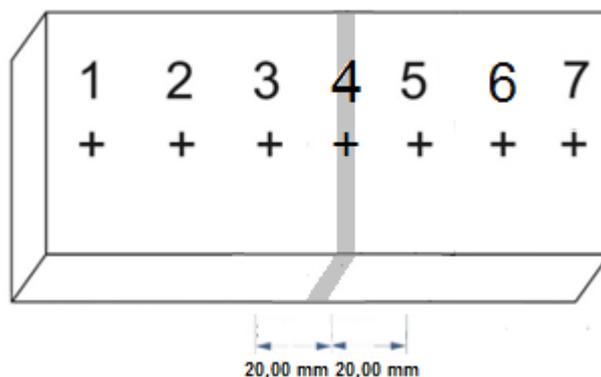


Fonte: Próprio Autor.

O segundo corpo de prova era de polimetilmetacrilato, dimensões [(139,00 ± 0,03) mm x (29,00 ± 0,03) mm x (21,00 ± 0,03) mm] (comprimento x altura x espessura), de faces planas paralelas e superfícies polidas (ver Anexo D para cálculo das incertezas). Assim como no aço, também foi submetido a uma ruptura transversal na região central e posteriormente unido com o auxílio de uma substância química (triclorometano). Definiram-se regiões ao longo do comprimento da barra, estando uma região no centro (região da junção) e as outras seis equidistantes, representadas de forma semelhante ao que foi ilustrado na Figura 4.7.

Para cada região, foram realizadas oito medições, quatro na direção de polarização paralela à solda/junção e outras quatro na direção de polarização perpendicular. Os índices de birrefringência acústica foram obtidos por meio dos tempos de propagação do som nas duas polarizações.

Figura 4.7 – Diagrama do corpo de prova do polimetilmetacrilato.

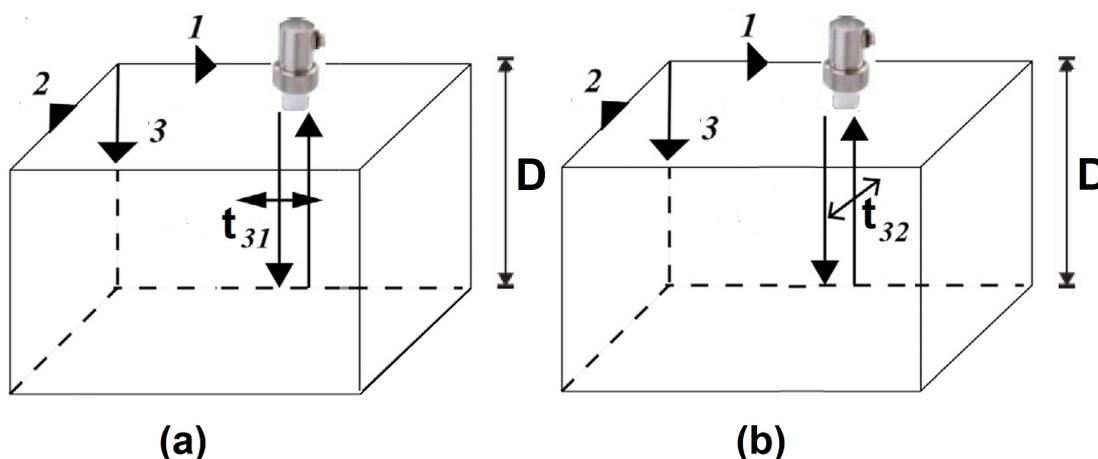


Fonte: Próprio Autor.

4.1.2.1 Medição do Tempo de Trânsito da Onda Ultrassônica

Na Figura 4.8 é apresentado o plano de referência e as direções de propagação das ondas cisalhantes nas duas polarizações utilizadas (ver diagramas das regiões nas Figuras 4.6 e 4.7). A parte (a) da Figura 4.8 ilustra a propagação da onda cisalhante polarizada na direção perpendicular, denominada t_{31} no material. Enquanto a parte (b) da Figura 4.8 ilustra a propagação da onda cisalhante polarizada na direção paralela, t_{32} , no mesmo ponto da Figura 4.8 (a).

Figura 4.8 – Representação das ondas ultrassônicas cisalhantes percorrendo a amostra nas duas polarizações utilizadas.



Fonte: Próprio Autor.

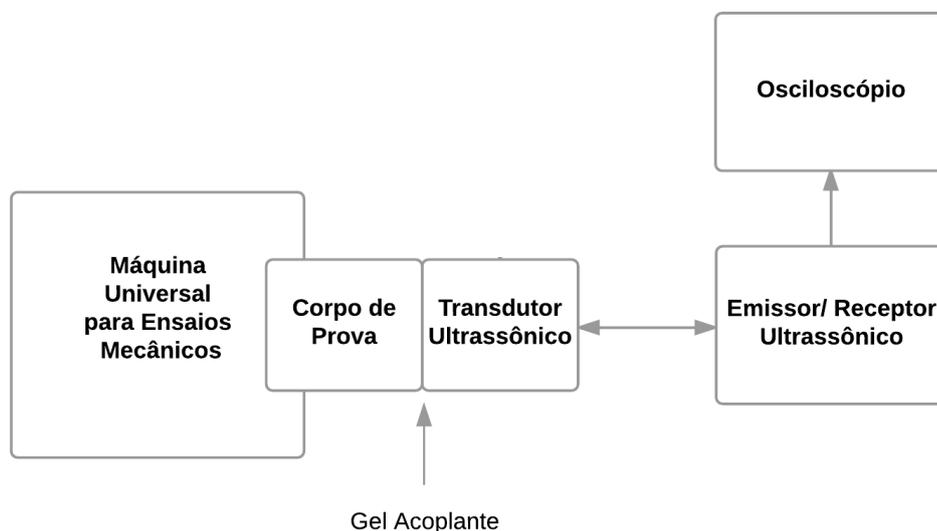
No método pulso-eco, ilustrado na Figura 4.8, o mesmo transdutor atua como transmissor e como receptor de ondas ultrassônicas. O tempo de trânsito (t_{31} e t_{32}) representa o atraso temporal para que a onda percorra uma distância de duas vezes o comprimento da amostra (D).

A técnica da birrefringência acústica permite estudos com a velocidade de propagação ou diretamente com o tempo de propagação da onda. Como os dados coletados do osciloscópio são de natureza temporal, nessa investigação optou-se pelo estado do tempo de propagação do som. Os valores de birrefringência foram calculados conforme Equação (2.55).

4.1.3 Constantes Acustoelásticas do Polimetilmetacrilato

O sistema de medição empregado para estimar as constantes acustoelásticas L_{22} , L_{21} e L_{23} está ilustrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Diagrama do sistema de medição para avaliação da constante acustoelástica.



Fonte: Próprio Autor.

4.1.3.1 Caracterização da Constante Acustoelástica L_{22} - 1ª Fase de Ensaios

O transdutor de contato de ondas longitudinais (Olympus Panameric, V110-RM, raio de 6,35 mm) foi utilizado nas medições para estimar a constante acustoelástica L_{22} . O método utilizado foi o pulso-eco e o transdutor foi diretamente ligado ao gerador de pulsos (Pulser/Receiver 5072PR, Olympus, PA, USA).

A máquina universal para ensaios mecânicos de tração (EMIC 23-300, INSTRON/EMIC), do Laboratório de Inovação Tecnológica (LABITECC) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG, foi utilizada para aplicar cargas sobre os corpos de prova de polimetilmetacrilato, por meio do teste de compressão.

Os corpos de prova utilizados eram de polimetilmetacrilato em formato cilíndrico [(25,00 ± 0,03) mm × (50,00 ± 0,03) mm] (diâmetro × altura). Foi feito um chanfro de (10,00 ± 0,03) mm na lateral das peças, para que o transdutor pudesse ter a superfície totalmente em contato com o corpo de prova. Trabalhou-se com seis corpos de prova, todos oriundos da mesma barra de polimetilmetacrilato. As amostras foram denominadas como A, B, 1, 2, 3 e 4, e no centro de cada peça foi feita uma marcação para identificar o local das medições.

O procedimento para avaliação das propriedades acustoelásticas (obtenção das contantes), consistiu em aumentar progressivamente a carga sobre o corpo de prova e

medir a variação do tempo de percurso das ondas ultrassônicas.

Trabalhou-se com duas metodologias diferentes, na primeira foram utilizadas quatro peças, as peças 1, 2, 3 e 4, em que cada peça recebeu uma carga diferente. Primeiramente, para o estado livre de tensões, foram realizadas dez medições dos tempos de percurso. O corpo de prova 1 foi submetido à uma força de valor pré-definido e novas dez medições do tempo de percurso foram feitas. O corpo de prova 1 foi trocado pelo corpo de prova 2, aplicou-se uma carga maior do que a anterior e realizaram-se mais dez medições temporais. Repetiu-se este procedimento, trocando as amostras e aumentando a carga, até a carga máxima desejada. Para cada conjunto de medições em cada peça foi aplicado nova camada de gel acoplante (Shear Gel - acoplante ambientalmente correto para ultrassom, Sonotech).

Na segunda metodologia a carga também foi dividida em patamares, entretanto uma única peça foi utilizada ao longo de todo o ensaio. Para cada patamar de força o transdutor foi colocado e retirado, aplicando uma nova camada de gel acoplante e realizando dez medições temporais. Esta segunda metodologia foi realizada duas vezes, em duas amostras diferentes, A e B. Cada um destes corpos de prova foi submetido a quatro níveis de cargas diferentes, em cada ensaio.

As constantes acustoelásticas indicam a sensibilidade entre a variação das velocidades ultrassônicas em relação à deformação. A constante acustoelástica L_{22} foi caracterizada conforme a Equação (2.32), enquanto a constante K_{22} foi calculada segundo a Equação (2.45), ambas apresentadas anteriormente.

4.1.3.2 Caracterização das Constantes Acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} - 2ª Fase de Ensaio

Nesta segunda fase de avaliação das constantes acustoelásticas foram realizados três ensaios. Dois ensaios empregando o transdutor de contato de ondas cisalhantes, modo pulso-eco, para estimar as constantes acustoelásticas L_{21} e L_{23} . Um ensaio para estimar a constante L_{22} empregando o transdutor de ondas longitudinais, modo pulso-eco, Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Especificações dos transdutores de contato.

Frequência do Transdutor de Contato (MHz)	Raio (mm)	Olympus Panameric	Constante Acustoelástica	
5,00	Transversal	6,35	V110-RM	L_{21} e L_{23}
5,00	Longitudinal	6,35	V110-RM	L_{22}

Os corpos de prova utilizados eram de polimetilmetacrilato em formato cilíndrico [(25,00 ± 0,03) mm x (70,00 ± 0,03) mm] (diâmetro x altura). Semelhantes às amostras A,

B, 1, 2, 3 e 4, utilizadas na 1ª fase, todos os corpos de prova eram oriundos da mesma barra de polimetilmetacrilato e foram chanfrados lateralmente. Entretanto os corpos de prova empregados nesta 2ª fase de caracterização das constantes acustoelásticas (L_{21} , L_{23} e L_{22}) possuíam comprimento maior do que os corpos de prova da 1ª fase (L_{22}). A alteração do comprimentos das amostras ocorreu para que durante o ensaio de caracterização da constante L_{21} o transdutor pudesse ser posicionado na posição correta para a polarização da onda cisalhante. As amostras foram denominadas como C, D, E e F, e no centro de cada peça foi feita uma marcação para identificar o local das medições. O corpo de prova C foi empregado no teste de compressão para obtenção da curva de tensão versus deformação, D foi utilizado no ensaio de caracterização da constante L_{21} , o corpo de prova E foi empregado na obtenção da constante L_{23} e F foi utilizado na caracterização da constante L_{22} .

O procedimento de estimativa das constantes acustoelásticas foi o mesmo já utilizado anteriormente. Aumento progressivo da carga por meio do teste de compressão, máquina universal para ensaios mecânicos de tração (EMIC 23-300, INSTRON/EMIC), nos corpos de prova de polimetilmetacrilato.

A metodologia utilizada para aplicação da carga foi similar à adotada para os ensaios da 1ª fase com os corpos de prova A e B. Aplicou-se dez níveis de forças uniaxiais diferentes em cada uma das amostras D, E e F. As dez medições do tempo de propagação da onda foram realizadas em um intervalo fixo de cinco minutos para cada nível de força aplicada.

Buscando aprimorar os ensaios da 2ª fase, foi utilizado um grampo de nylon para fixar o transdutor em contato com os corpos de prova. O transdutor foi posicionado e levemente tensionado pelo grampo de nylon, de modo que pudesse permanecer na mesma posição durante todo o ensaio. Entretanto o modelo do grampo de nylon empregado impossibilitou mensurar a força aplicada sob o transdutor, apenas fixá-lo e tensioná-lo de modo homogêneo para um mesmo ensaio.

A constante acustoelástica L_{22} foi calculada por meio da Equação (2.32), assim como na 1ª fase. As constantes L_{21} e L_{23} foram calculadas conforme as Equações (2.33) e (2.34).

4.1.3.2.1 Caracterização das Constantes Elásticas de Segunda e Terceira Ordem do Polimetilmetacrilato

As constantes elásticas de segunda ordem (λ e μ) foram estimadas por meio das Equações (2.1) e (2.2).

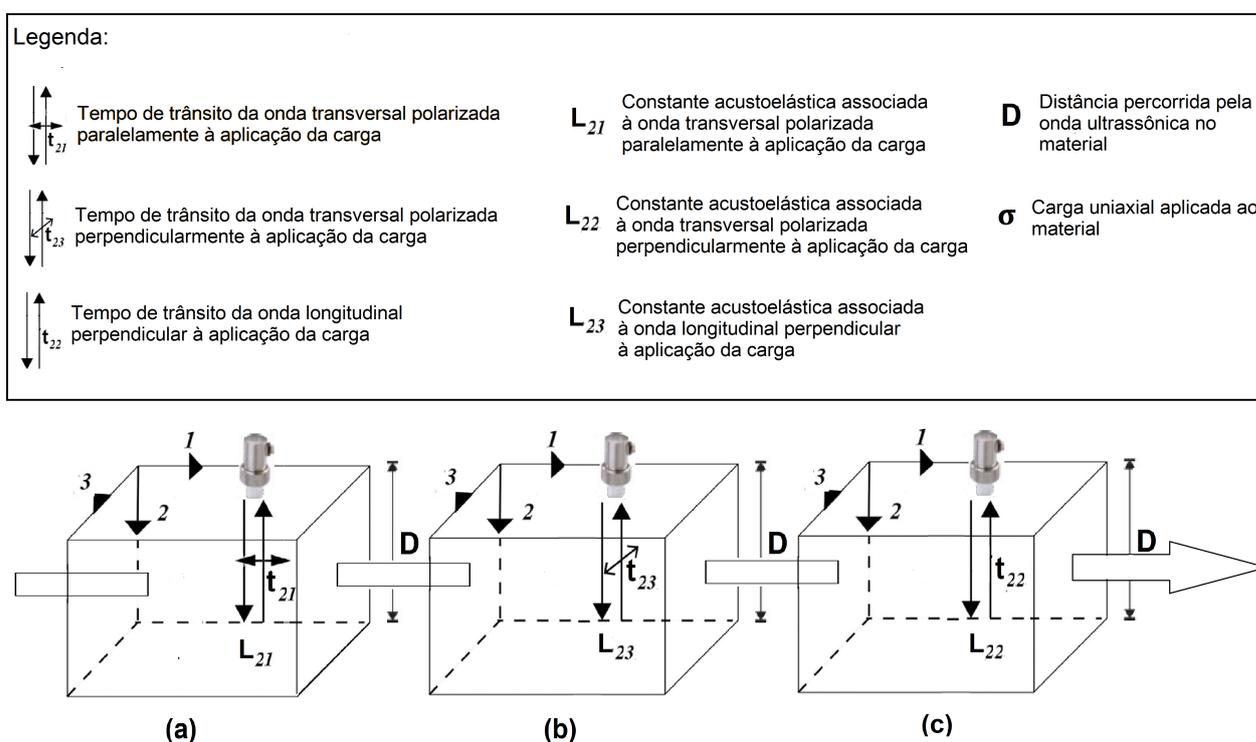
As constantes elásticas de terceira ordem l, m e n foram calculadas segundo as Equações (2.35), (2.36) e (2.37). Enquanto as constantes elásticas de terceira ordem A, B e

C foram calculadas segundo as Equações (2.38), (2.39) e (2.40). Todas já apresentadas anteriormente na Seção 2.

4.1.3.3 Medição do Tempo de Trânsito da Onda Ultrassônica

As medições do tempo de trânsito da onda ultrassônica foram realizadas por transdutores de ondas longitudinais e transversais, método pulso-eco, ilustrado anteriormente na Figura 4.8.

Figura 4.10 – Representação das ondas ultrassônicas percorrendo o material durante aplicação da força uniaxial.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.10 está ilustrada a propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais no corpo de prova de polimetilmetacrilato durante os ensaios.

A velocidade de propagação do som foi calculada de acordo com a Equação (4.4):

$$V = \frac{2D}{t} \tag{4.4}$$

em que V é a velocidade de propagação do som, D a distância percorrida pela onda no material e t o tempo de trânsito da onda em cada um dos planos.

A velocidade relativa de propagação do som foi obtida da Equação (4.5):

$$V_R = \frac{V - V^o}{V^o} \quad (4.5)$$

em que V^o é a velocidade de propagação do som no material livre de tensões e V é a velocidade de propagação no material sob tensão.

4.1.4 Aquisição do Tempo de Trânsito da Onda de Ultrassom

Os sinais foram visualizados e adquiridos por um osciloscópio (TDS2024C, Tektronix, OR, USA). A base de tempo do osciloscópio foi ajustada para trabalhar em alta taxa de resolução temporal, da ordem de 5,00 [ns]. O processamento do sinal ultrassônico foi realizado por meio de uma rotina desenvolvida em ambiente computacional com comunicação direta com o osciloscópio. Trabalhou-se com um valor médio de 128 medições do sinal ultrassônico adquirido, buscando assim, minimizar flutuações.

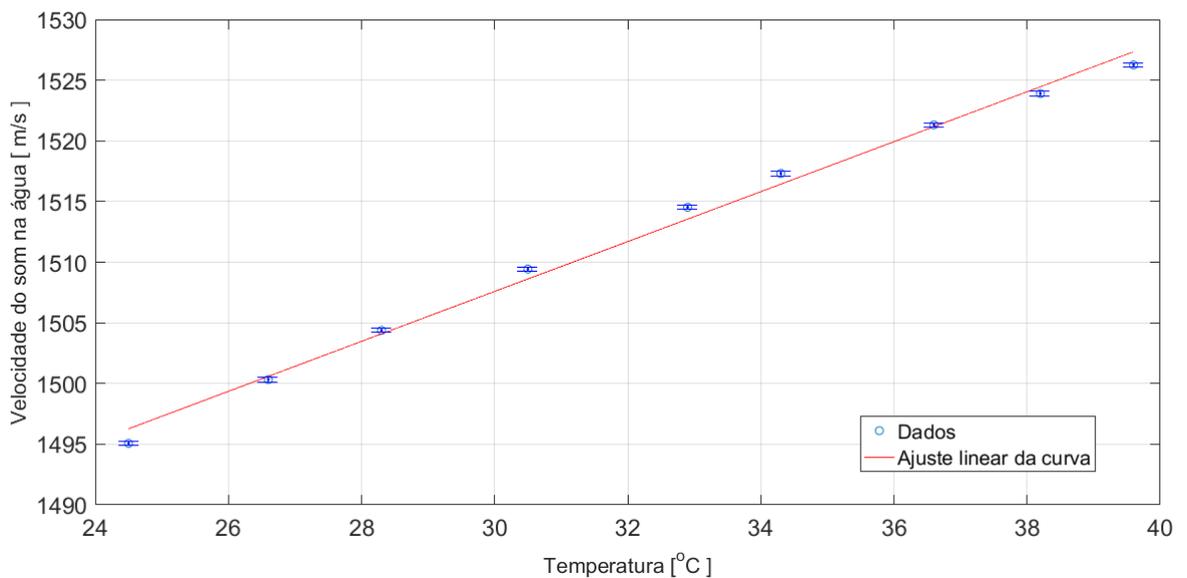
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados. O primeiro tópico aborda a influência da temperatura na velocidade da onda de ultrassom no polimetilmetacrilato, empregando as ondas L_{cr} . O segundo tópico apresenta os resultados da birrefringência acústica no aço e polimetilmetacrilato. Por último, a obtenção das constantes acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} para o polimetilmetacrilato.

5.1 Influência da Temperatura na Velocidade das Ondas L_{cr} no Polimetilmetacrilato

Na Figura 5.1 são apresentados os valores experimentais da velocidade de propagação da onda longitudinal em função da temperatura na água, o ajuste linear dos dados e as barras de erro da velocidade. A distância percorrida pela onda ultrassônica na água (d_{AG}) foi de $20,20 \pm 0,05$ mm, os tempos de trânsito da onda (t_{AG}) foram obtidos por meio do osciloscópio e as velocidades de propagação na água (V_{AG}) foram calculados por meio da Equação (4.1).

Figura 5.1 – Velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal da água de torneira versus temperatura V_{AG} .



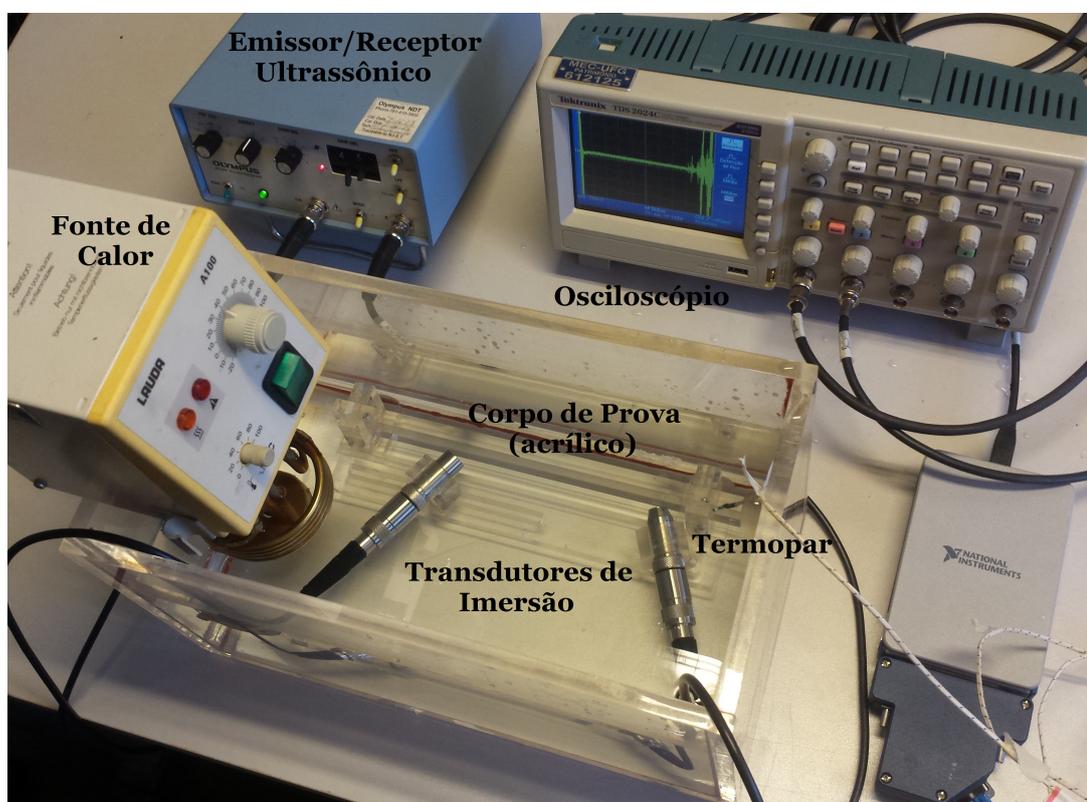
Fonte: Próprio autor

O desvio padrão das medições de velocidade foram calculadas levando-se em consideração o desvio padrão das medidas de tempo e a incerteza das medidas de distância percorrida, Anexos D e E. O desvio padrão está representado na forma de barras de erros verticais. Foram utilizados os valores médios das cinco medições de temperatura registrados pelo termopar para cada velocidade.

Os dados experimentais da velocidade de propagação na água descreveram um comportamento linear, por meio de uma regressão linear obteve-se a constante de determinação $R^2 = 0,9942$. Esse valor numérico representa uma ótima correlação entre os dados experimentais e o ajuste linear utilizado. A equação da reta ajustada obtida para os dados experimentais da água foi $v(T) = 2,058T + 1446,000$, o coeficiente térmico k_T foi de $2,058 \pm 0,140 \text{ m}/(s^\circ\text{C})$, ou seja um acréscimo de $2,058 \text{ [m/s]}$ na velocidade a cada elevação de 1°C . Os valores experimentais de velocidade do som na água apresentaram proximidade com os valores da literatura para a água pura na faixa de temperatura avaliada (Anexo B).

O arranjo experimental empregado nas medições da influência da temperatura na velocidade da onda ultrassônica (L_{cr}) no polimetilmetacrilato está ilustrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Arranjo experimental para medições da influência da temperatura na velocidade da onda de ultrassom.



Fonte: Próprio autor

Para a determinação do ângulo crítico em que os transdutores deveriam ser posicionados, foram substituídos na Equação (2.47) os valores das velocidades de cada meio, água e polimetilmetacrilato (Anexo G). Na Tabela 5.1 são apresentados os valores nominais das velocidades e o ângulo crítico.

Tabela 5.1 – Ângulo crítico água/polimetilmetacrilato.

Material	Velocidade do Som (m/s)	Ângulo Crítico
Polimetilmetacrilato (PMMA)	2730	32,82°
Água	1480	

Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 5.2 estão descritas as informações referentes as distâncias percorridas no polimetilmetacrilato e na água pelas ondas de ultrassom.

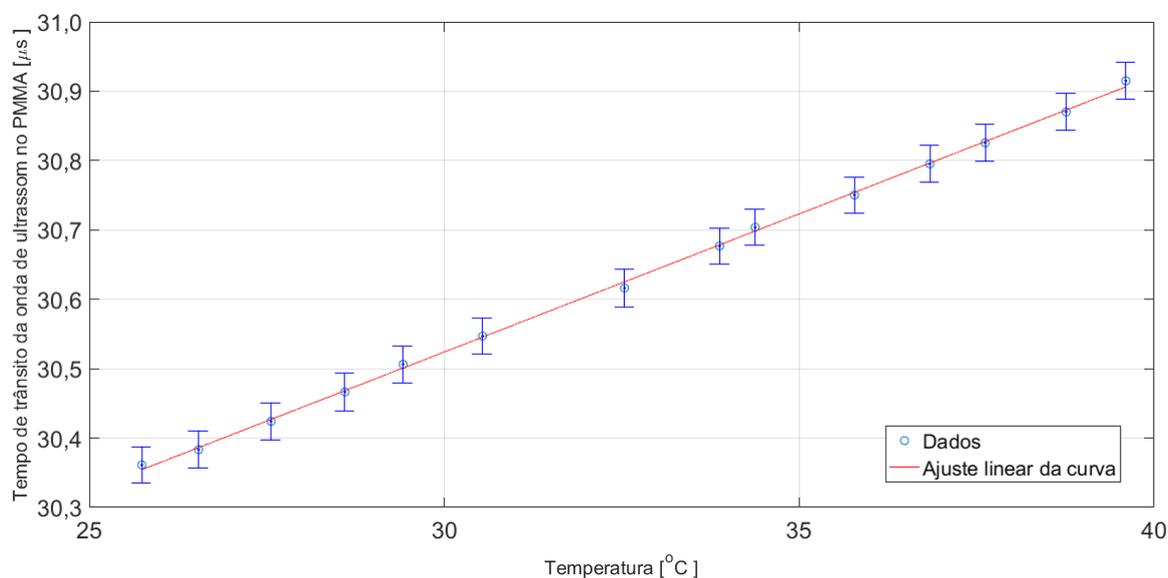
Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados na medição da velocidade do som na água e no polimetilmetacrilato em função da temperatura.

Transdutores (MHz)	Distância percorrida na água (d_{ag})(mm)	Distância percorrida no polimetilmetacrilato (d_{ac})(mm)
2,25	12,00 ±0,03	83,00 ±0,03
3,50	11,00 ±0,03	90,00 ±0,03
5,00	11,00 ±0,03	91,00 ±0,03

Fonte: Próprio Autor.

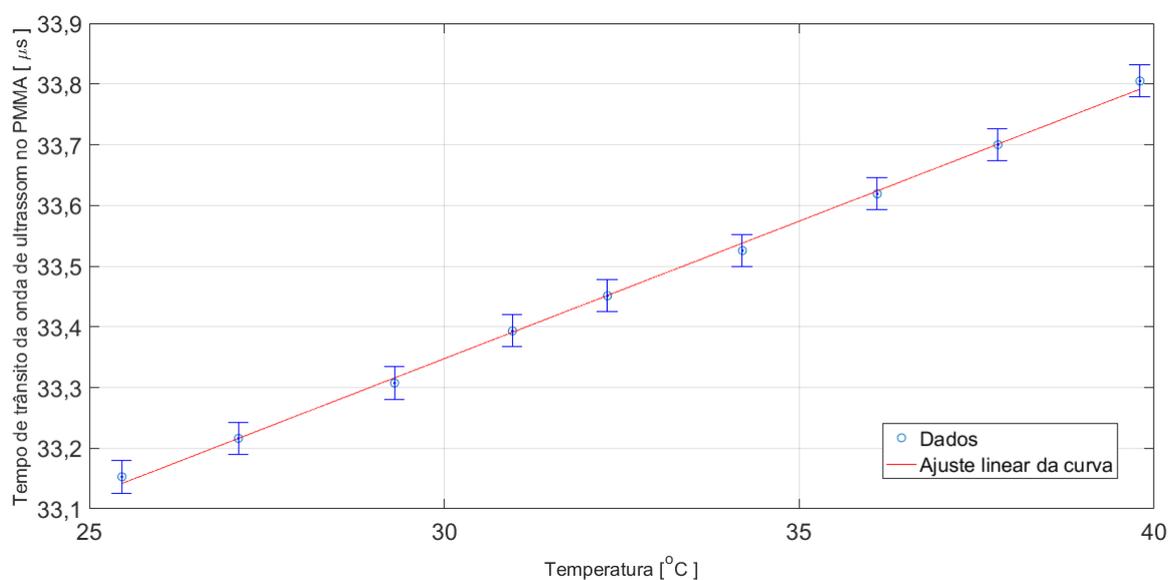
Nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 são apresentados os resultados da medição do tempo de propagação da onda (Equação (4.2)) em função da temperatura para as três frequências ultrassônicas analisadas. O desvio padrão das medidas de tempo foi obtido das cinco medidas de tempo de ultrassom coletadas para cada temperatura. Foram considerados os valores médios de cinco medições de temperatura realizadas pelo termopar.

Figura 5.3 – Tempo de trânsito da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 2,25 MHz.



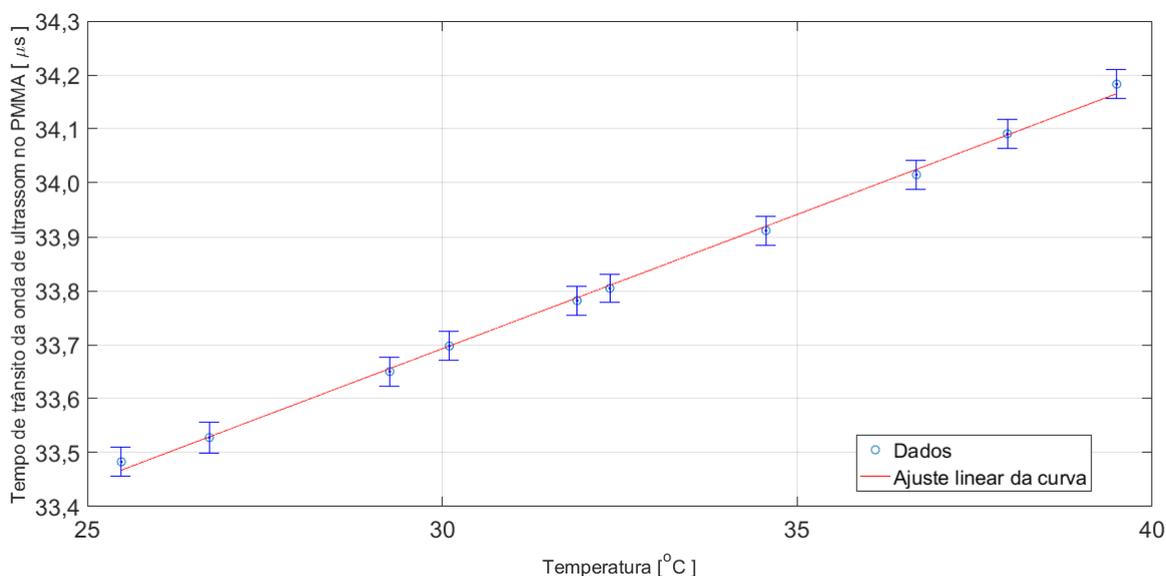
Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.4 – Tempo de trânsito da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 3,50 MHz.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.5 – Tempo de trânsito da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 5,00 MHz.

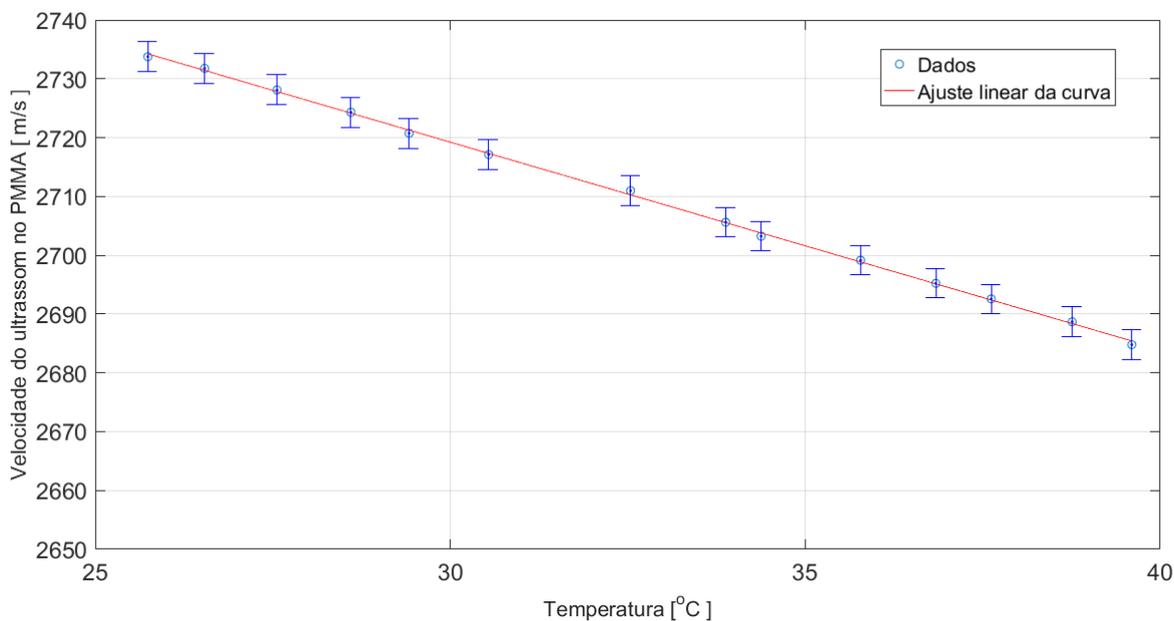


Fonte: Próprio Autor.

As curvas das Figuras 5.3, 5.4 e 5.5, mostram um aumento no tempo de propagação da onda de ultrassom com a elevação da temperatura. A regressão linear do gráfico na Figura 5.3 forneceu uma constante de determinação de $R^2 = 0,997$ e a equação ajustada $t(T) = 39,81 \times 10^{-9}T + 29,33 \times 10^{-6}$. Resultando em um acréscimo de 39,81 ns no tempo de trânsito da onda para cada 1°C elevado, para a frequência de 2,25 MHz. Para o gráfico da Figura 5.4, frequência de 3,50 MHz, obteve-se uma constante de determinação $R^2 = 0,996$ e equação da reta $t(T) = 45,31 \times 10^{-9}T + 31,99 \times 10^{-6}$, um acréscimo de 45,31 ns/ $^\circ\text{C}$. A constante de determinação $R^2 = 0,998$ e equação da reta $t(T) = 49,77 \times 10^{-9}T + 32,20 \times 10^{-6}$ para a curva da Figura 5.5, revelaram um aumento de 49,77 ns/ $^\circ\text{C}$ para a frequência de 5,00 MHz.

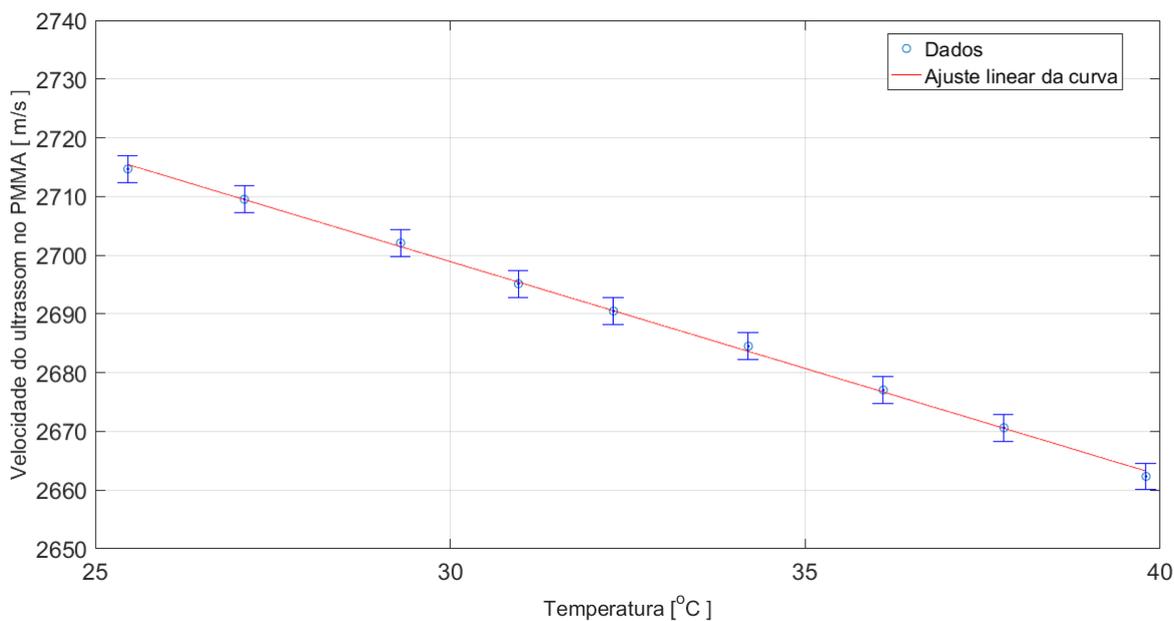
As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam os valores da velocidade da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura para as três frequências estudadas. Os valores das velocidades foram calculados por meio da Equação (4.3) e foram utilizados os dados de V_{AG} da curva caracterizada anteriormente (Figura 5.1). O desvio padrão das medições de velocidade do polimetilmetacrilato foram calculadas com a propagação de erros do desvio padrão das medidas de tempo, incerteza das medidas de distância percorrida e desvio padrão das medidas de velocidade de propagação na água, Anexo E. Nos gráficos são apresentados os valores experimentais, a curva de ajuste linear dos dados e as barras verticais indicam a incerteza das medições de velocidade.

Figura 5.6 – Velocidade da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 2,25 MHz.



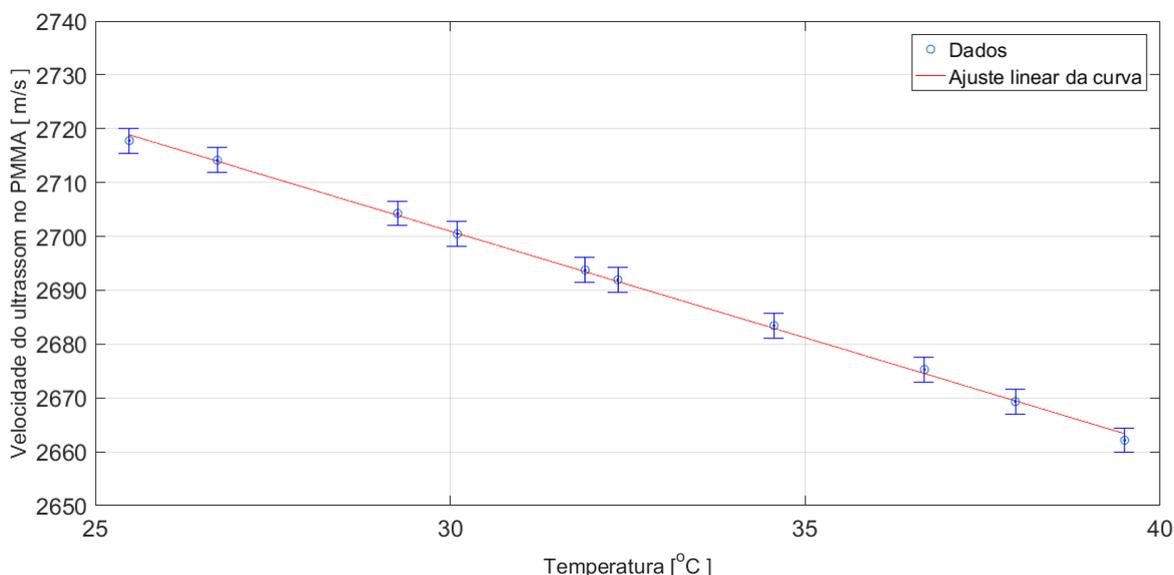
Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.7 – Velocidade da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 3,50 MHz.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.8 – Velocidade da onda L_{cr} no polimetilmetacrilato em função da temperatura utilizando transdutores de 5,00 MHz.



Fonte: Próprio Autor.

Observou-se o mesmo comportamento decrescente da curva de velocidade de propagação ultrassônica versus temperatura para as três frequências exploradas. Por meio de uma regressão linear, verificou-se que os dados referentes à velocidade do som no polimetilmetacrilato apresentaram linearidade para a faixa de temperatura analisada. A Tabela 5.3 resume as informações obtidas pelo ajuste linear e o coeficiente térmico para as três frequências utilizadas.

Tabela 5.3 – Resultados da variação de velocidade com relação à temperatura para as frequências de 2,25, 3,50 e 5,00 MHz.

Transdutores (MHz)	Equação da Retra Ajustada	Constante de Determinação (R^2)	Coeficiente Térmico (k_T)($m/s^{\circ}C$)
2,25	$v(T) = -3,522T + 2825,000$	0,999	$-3,522 \pm 0,032$
3,50	$v(T) = -3,641T + 2808,000$	0,999	$-3,641 \pm 0,062$
5,00	$v(T) = -3,958T + 2820,000$	0,998	$-3,958 \pm 0,065$

Fonte: Próprio Autor.

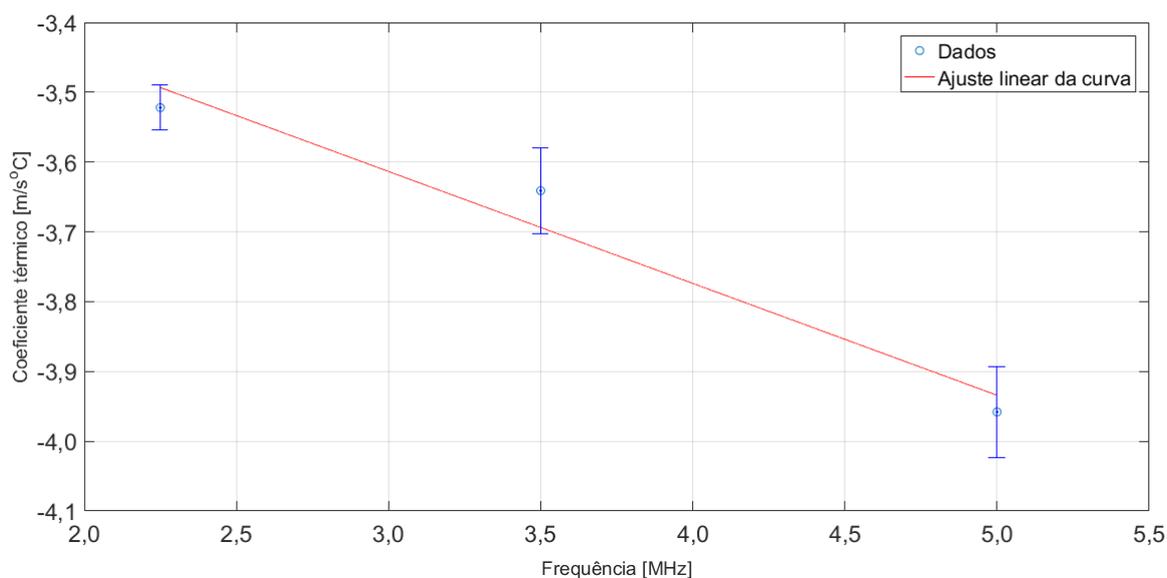
As constantes de determinação R^2 das medições realizadas apresentaram valores acima de 0,998, indicando ótima correlação entre os dados experimentais e o ajuste linear.

O coeficiente térmico encontrado para a frequência de 2,25 MHz foi de $k_T = -3,522 m/s^{\circ}C$. Na literatura foram encontrados alguns valores controversos do coeficiente térmico para o acrílico. BRAY (1998) (Tabela 2.1) descreveu um valor de $k_T = -2,33 m/s^{\circ}C$

para o PMMA. Isto resulta em um erro relativo percentual de 51,58% em relação ao valor encontrado nesta pesquisa para a frequência de 2,25 MHz. No entanto, o autor não informa qual foi a frequência, tipo de onda e método de aquecimento do material, dimensões da peça e nem maiores detalhes da medição. SANTOS et al. (2010) reportou um valor de $k_T = -4,52 \text{ m/s}^\circ\text{C}$ para o polimetilmetacrilato, utilizando um transdutor longitudinal emissor/receptor, método (pulso-eco), de 5,00 MHz. O aquecimento não foi especificado e as medições foram realizadas durante o resfriamento do acrílico. Uma variação de 12,43% com o valor encontrado experimentalmente neste estudo para tal frequência. AOKI e IHARA (2015) descreveu um valor de $k_T = -2,46 \text{ m/s}^\circ\text{C}$. Um transdutor longitudinal de 2,00 MHz como emissor/receptor, método (pulso-eco) foi utilizado no estudo. O aquecimento do acrílico foi feito por meio da fricção deste com um disco de aço e as medições realizadas durante a fase de aquecimento. Comparado ao valor encontrado nesta pesquisa para 2,25 MHz, uma discrepância de 43,17%. Observou-se uma não homogeneidade dos valores de k_T reportados na literatura. A mudança nos métodos de aquecimento do material e o tipo de onda (subsuperficiais ou volumétricas) mostraram alterar a obtenção dos coeficientes térmicos.

Os valores dos coeficientes térmicos apresentados na Tabela 5.3 sugerem uma tendência de decrescimento do coeficiente térmico com o aumento da frequência dos transdutores, conforme visto na Figura 5.9. A regressão linear da curva forneceu uma equação da reta $k_T(f) = -1,603 \times 10^{-7}f - 3,133$ e constante de determinação $R^2 = 0,959$.

Figura 5.9 – Coeficiente térmico do polimetilmetacrilato em função da frequência.



Fonte: Próprio Autor.

A curva da Figura 5.9 apresenta um resultado semelhante ao coeficiente de atenuação, o qual depende da frequência. Entretanto não foi possível estabelecer um

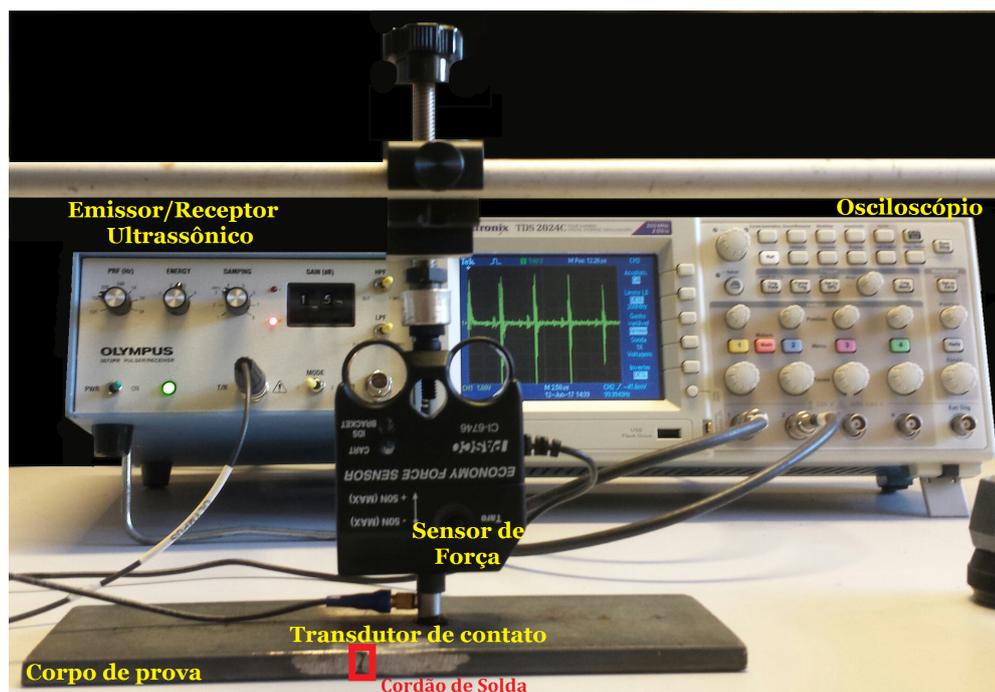
efeito direto e proporcional da frequência sobre o coeficiente térmico, visto que trabalhou-se com apenas uma peça de referência. Além disso, o coeficiente térmico é um termo que depende da velocidade de propagação da onda e da temperatura. Ou seja, por velocidade têm-se tempo de propagação do som e distância percorrida pelo mesmo. Um dos fatores que podem vir a afetar significativamente as medições dos coeficientes térmicos são as imprecisões nos valores de distância percorridos pelo ultrassom no polimetilmetacrilato e na água durante os ensaios. Enquanto as medições do tempo foram da ordem de nanosegundos, as medições da distância foram de milímetros. Assim, quaisquer alterações no arranjo experimental que afetassem a distância contribuíam de forma significativa no coeficiente térmico. Um estudo semelhante foi realizado por [FRAGA, SANTOS e ANDRINO \(2008\)](#) com o aço, contudo também não foi estabelecido nenhuma relação direta entre a frequência e o coeficiente térmico.

5.2 Birrefringência acústica

5.2.1 Birrefringência Acústica no Aço

O arranjo experimental utilizado para as medições da birrefringência acústica está ilustrado na Figura (5.10).

Figura 5.10 – Arranjo experimental para os ensaios de Birrefringência Acústica.



Fonte: Próprio Autor.

As medições dos tempos de propagação das ondas cisalhantes nas duas polarizações (longitudinal (t_{32}) e ortogonal (t_{31})) foram adquiridas para cada ponto da placa de aço, conforme o diagrama da Figura 4.6 e plano de referência da Figura 4.8. As orientações das polarizações de onda foram feitas conforme as marcações (+). Os valores de birrefringência acústica (B) calculados a partir da Equação (2.55) são apresentados na Tabela 5.4 e na Figura 5.11. A incerteza do osciloscópio utilizado para aquisição dos valores temporais foi de $\pm 0,0004$ [μ s], Anexo E.

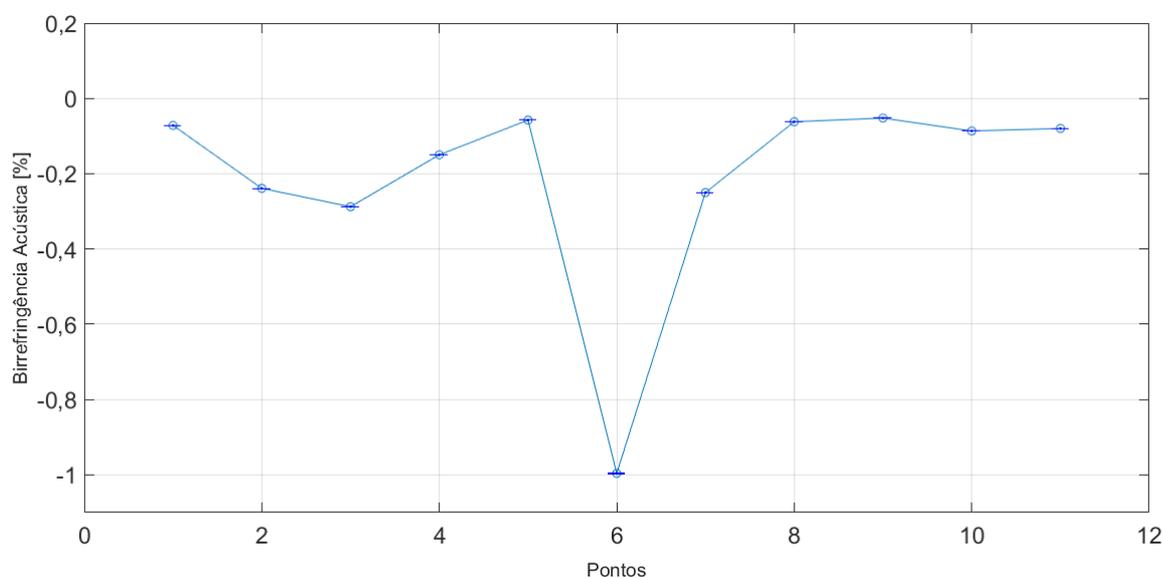
O desvio padrão da birrefringência acústica foi calculado considerando a incerteza do osciloscópio para as medições do tempo de trânsito da onda. Os valores encontrados foram baixos, porque durante o experimento optou-se por realizar as cinco medições de tempo em uma mesma posição sem remover o transdutor, buscando minimizar interferências externas nas medidas. Dificilmente os transdutores seriam reposicionados precisamente no mesmo local, induzindo assim medidas de tempo discrepantes decorrentes da localização.

Tabela 5.4 – Tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes com direção de polarização longitudinal (t_{32}) e ortogonal (t_{31}) no aço e birrefringência acústica (B).

Pontos	Tempo de percurso longitudinal (t_{32})(μ s)	Tempo de percurso ortogonal (t_{31})(μ s)	Birrefringência Acústica (B)(%)
1	6,1431	6,1387	-0,0716
2	6,1554	6,1407	-0,2388
3	6,1557	6,1380	-0,2875
4	6,1456	6,1364	-0,1497
5	6,0887	6,0852	-0,0575
6	6,0631	6,0027	-0,9962
7	6,1184	6,1031	-0,2501
8	6,1329	6,1291	-0,0620
9	6,1409	6,1377	-0,0521
10	6,1315	6,1282	-0,0864
11	6,1402	6,1353	-0,0798

Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.11 – Birrefringência Acústica na barra de aço.



Fonte: Próprio autor

Uma análise qualitativa dos pontos permite observar na Figura 5.11, no ponto 6 (cordão de solda), o maior valor de birrefringência acústica $|B| = 0,9962\%$. Neste ponto ocorre a maior diferença temporal entre as ondas cisalhantes, fato associado à anisotropia acústica do material. Assim observa-se que esta região foi a mais afetada pelas tensões induzidas pelo processo da soldagem. As demais regiões fora do cordão de solda apresentaram uma distribuição mais heterogênea das tensões induzidas no

material, não ultrapassando um valor médio de $B = 0,1335\%$.

Os pontos 2 e 3, mesmo localizados mais distantes da região de solda, apresentaram valores significativos de birrefringência acústica. Apesar de não serem diretamente afetados pelo processo de soldagem no ponto 6 da barra, estão sob influência de erros grosseiros da medição. Os transdutores foram manualmente rotacionados na mesma posição para as duas polarizações desejadas. Como mencionado anteriormente, quaisquer modificações na posição do transdutor levam a alterações nas medições que não são provenientes do fenômeno de birrefringência. A técnica da birrefringência acústica faz a análise da diferença temporal entre duas ondas cisalhantes perpendicularmente polarizadas entre si propagando-se no mesmo local. Alterações na posição do transdutor resultam na análise de diferença temporal entre duas ondas cisalhantes que não estão se propagando no mesmo local. Assim, erros durante as medições podem ter contribuído para os valores de birrefringência encontrados nos pontos 2 e 3.

O sinal negativo encontrado para os valores de birrefringência está provavelmente associado à presença de uma elevada componente de tensão σ_1 (perpendicular ao cordão de solda) trativa(+) e uma componente de tensão σ_2 (paralela à solda) podendo ser trativa(+), menor do que σ_1 , ou compressiva(-) (Equação (2.52)). Verificou-se uma diferença percentual de 86,59% entre a birrefringência acústica na região do cordão de solda (ponto 6) e nas demais regiões fora da solda (pontos 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 e 11).

5.2.2 Birrefringência Acústica no Polimetilmetacrilato

O arranjo experimental utilizado para as medições da birrefringência acústica no polimetilmetacrilato foi o mesmo apresentado anteriormente para o aço (Figura 5.10).

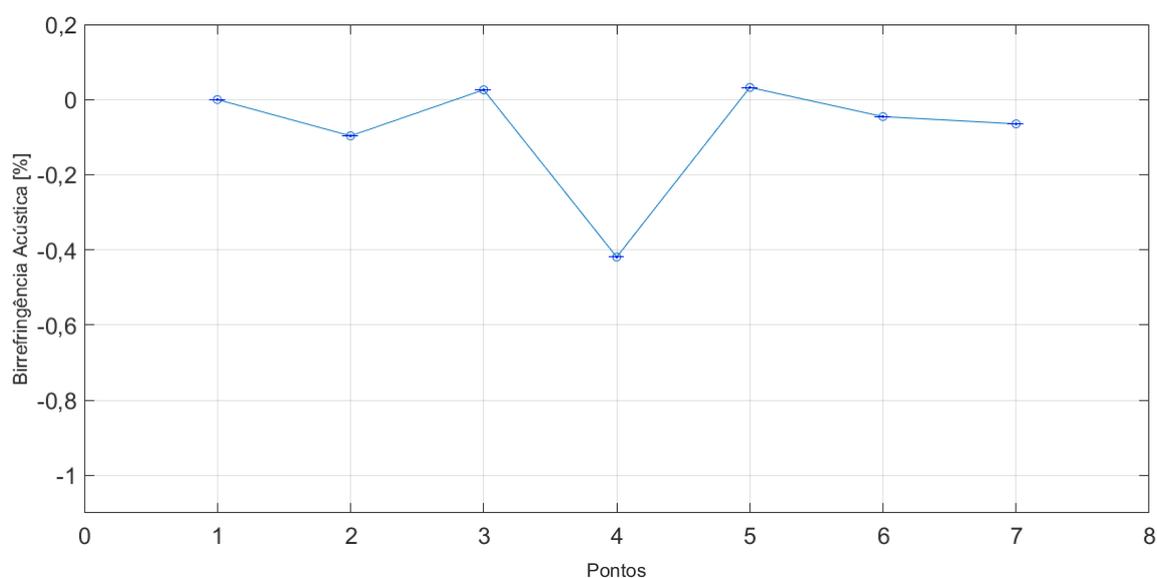
Os tempos de propagação das ondas cisalhantes nas duas polarizações (longitudinal (t_{32}) e ortogonal (t_{31})) foram adquiridos para cada um dos pontos demarcados na barra de polimetilmetacrilato (Figura 4.7), similar ao que foi feito anteriormente para o aço. Os valores de birrefringência acústica (B) calculados a partir da Equação (2.55) são apresentados na Tabela 5.5 e na Figura 5.12.

Tabela 5.5 – Tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes com direção de polarização longitudinal (t_{32}) e ortogonal (t_{31}) no polimetilmetacrilato e birrefringência acústica (B).

Pontos	Tempo de percurso longitudinal (t_{32})(μ s)	Tempo de percurso ortogonal (t_{31})(μ s)	Birrefringência Acústica (B)(%)
1	15,4310	15,4313	0,0000
2	15,5223	15,5372	-0,0965
3	15,4235	15,4191	0,0259
4	15,4464	15,5110	-0,4191
5	15,4532	15,4482	0,0324
6	15,4450	15,4528	-0,0453
7	15,4557	15,4653	-0,0647

Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.12 – Birrefringência Acústica na barra de polimetilmetacrilato.



Fonte: Próprio autor

Similar ao procedimento com a barra de aço, o polimetilmetacrilato apresentou o maior índice de birrefringência para a região central (ponto 4), onde houve a junção do material após a ruptura. Observou-se que esta foi a região de maior anisotropia estrutural, as demais regiões não apresentaram um valor médio de birrefringência superior a $B = 0,0441\%$. Os pontos 3 e 5, próximos a junção, apresentaram menor sensibilidade às tensões induzidas comparado ao ponto 4 (região da junção).

O ponto 2 apresentou valor de birrefringência $|B| = 0,0965\%$. O maior valor dentre os pontos fora da junção, pontos 1, 3, 5 6 e 7. Assim como na barra de aço, a rotação do transdutor para a polarização de interesse foi realizada manualmente. Alterações na

posição do transdutor durante o processo de rotação do mesmo, podem ter contribuído para erros nas medições da birrefringência no ponto 2. Resultando em um módulo de birrefringência mais elevado do que o valor correto.

Os valores negativos de birrefringência sugerem uma componente de tensão σ_1 (perpendicular à junção) trativa(+) e uma componente de tensão σ_2 (paralela à região da junção) podendo ser trativa(+), menor do que σ_1 , ou compressiva(-) (Equação (2.52)). Os valores positivos sugerem uma componente de tensão σ_1 compressiva(-) e uma componente σ_2 podendo ser compressiva(-), menor do que σ_1 , ou trativa(+). Verificou-se uma diferença percentual de 89,47% entre a birrefringência acústica na junção (ponto 4) e nos demais pontos fora da junção (pontos 1, 2, 3, 5, 6 e 7).

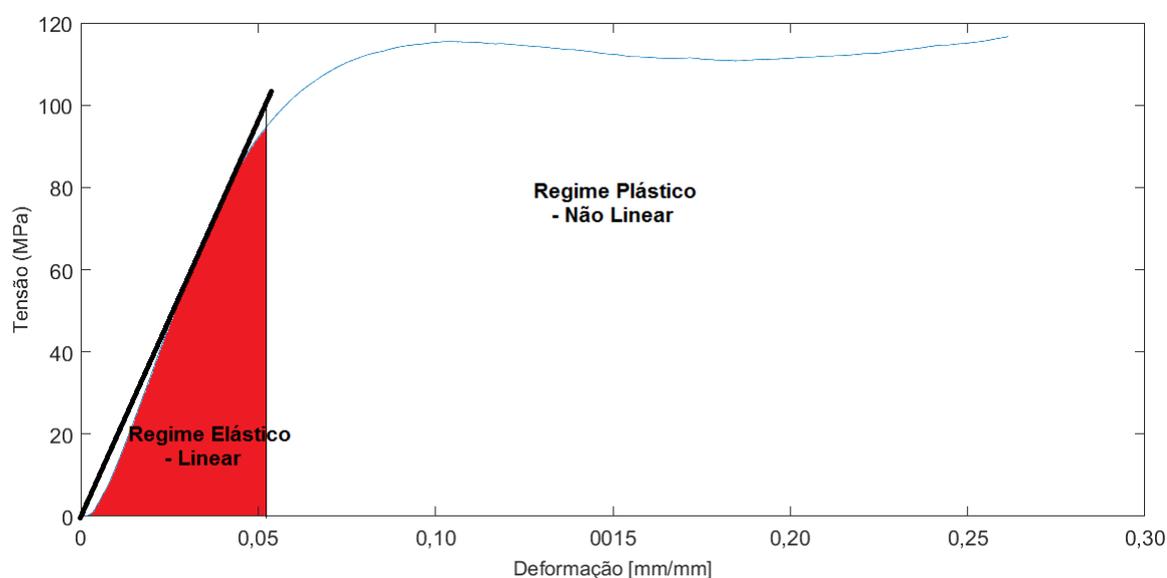
Comparando-se os valores de birrefringência na região de maior anisotropia no aço (ponto 6, $|B| = 0,9962$) e no polimetilmetacrilato (ponto 4, $|B| = 0,4161$), observou-se um valor maior para o aço. Isso ocorre devido a atenuação do sinal acústico, que sofre maior atenuação no polimetilmetacrilato do que no aço.

5.3 Constantes Acustoelásticas do Polimetilmetacrilato

5.3.1 Caracterização da Constante Acustoelástica L_{22} - 1ª Fase de Ensaio

Inicialmente foram realizados testes de tração no polimetilmetacrilato. Os corpos de prova foram preparados de acordo com o formato padrão dos ensaios, ver Apêndice B. O material apresentou um comportamento frágil para este tipo de ensaio, As peças rompiam subitamente após algum tempo de aplicação da força. O módulo de Young (E) caracterizado pela máquina universal para ensaios mecânicos (EMIC) foi de $E = 2,975$ GPa, na literatura são reportados valores de E variando de 2,24 a 3,80 GPa para o polimetilmetacrilato, ver Anexo C. Um grupo de corpos de prova de formato cilíndrico foi preparado para testes de compressão. O polimetilmetacrilato demonstrou um comportamento mais dúctil para o teste de compressão em comparação ao teste de tração. O Apêndice B apresenta a curva de tensão deformação do polimetilmetacrilato para o teste de tração. A Figura 5.13 apresenta a curva de tensão deformação do polimetilmetacrilato no ensaio de compressão.

Figura 5.13 – Curva de tensão versus deformação do polimetilmetacrilato (ensaio de compressão).



Fonte: Próprio Autor.

Um ensaio realizado com um corpo de prova de referência originou a curva tensão versus deformação da Figura 5.13. No gráfico é possível identificar uma faixa linear de regime elástico seguida de uma faixa não linear de regime plástico. A aplicação da Lei de Hooke e das equações importantes para este trabalho, apresentadas na Seção 2, são válidas apenas para o regime linear, região que o material apresenta comportamento

elástico. Os patamares de força da Tabela 5.6, utilizados para a caracterização da constante acustoelástica, foram estimados com base na região linear da curva da Figura 5.13. Trabalhou-se com uma força máxima de 3600,00 kgf, que corresponde a uma tensão máxima aplicada na peça de polimetilmetacrilato de aproximadamente 85,00 MPa. Assim a pressão máxima utilizada no ensaio se encontrava ainda dentro do região elástica do material. A imprecisão da célula de carga empregada nos ensaios era de 0,02 kgf.

Tabela 5.6 – Forças utilizadas para cada corpo de prova.

Corpo de prova	Patamares de Força (kgf)
1	900,00
2	1800,00
3	2700,00
4	3600,00
A	830,00 - 3320,00
B	900,00 - 3600,00

Na Figura 5.14 são apresentadas as amostras de polimetilmetacrilato utilizadas nos ensaios de compressão.

Figura 5.14 – Corpos de prova de polimetilmetacrilato.



Fonte: Próprio Autor.

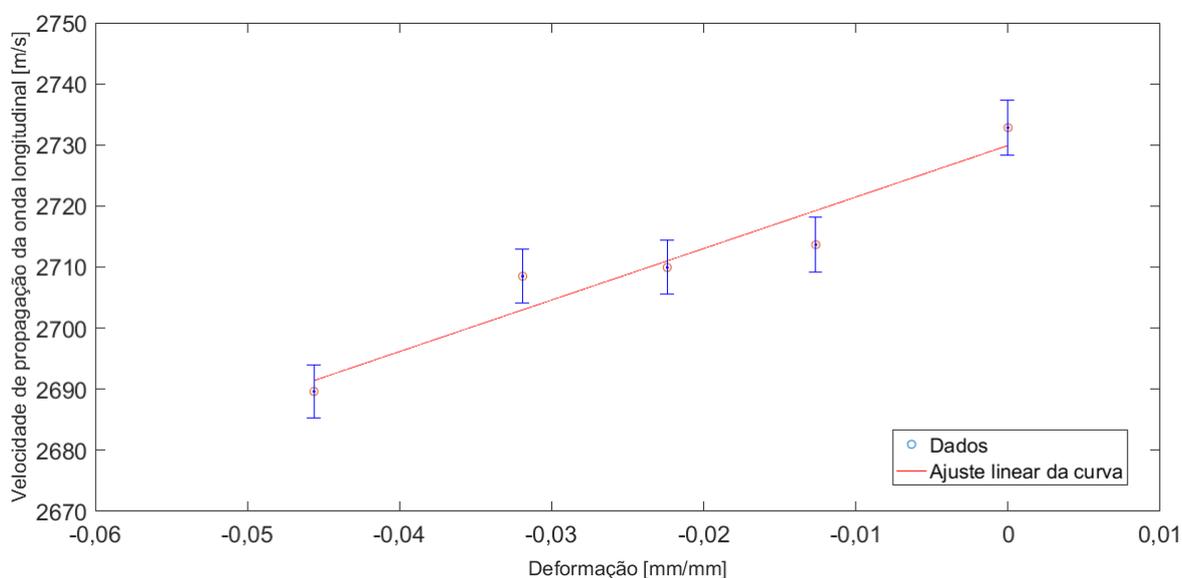
Na Tabela 5.7 estão registradas as espessuras de cada corpo de prova. As medições das espessuras dos corpos de prova foram realizadas por meio de um paquímetro, assim a incerteza foi de $\pm 0,03$ mm, calculada conforme Anexo E.

Tabela 5.7 – Espessuras dos corpos de prova 1ª bateria de ensaios.

Corpo de prova	Espessura (D) (mm)
1	23,50
2	23,55
3	23,50
4	23,55
A	23,00
B	21,50

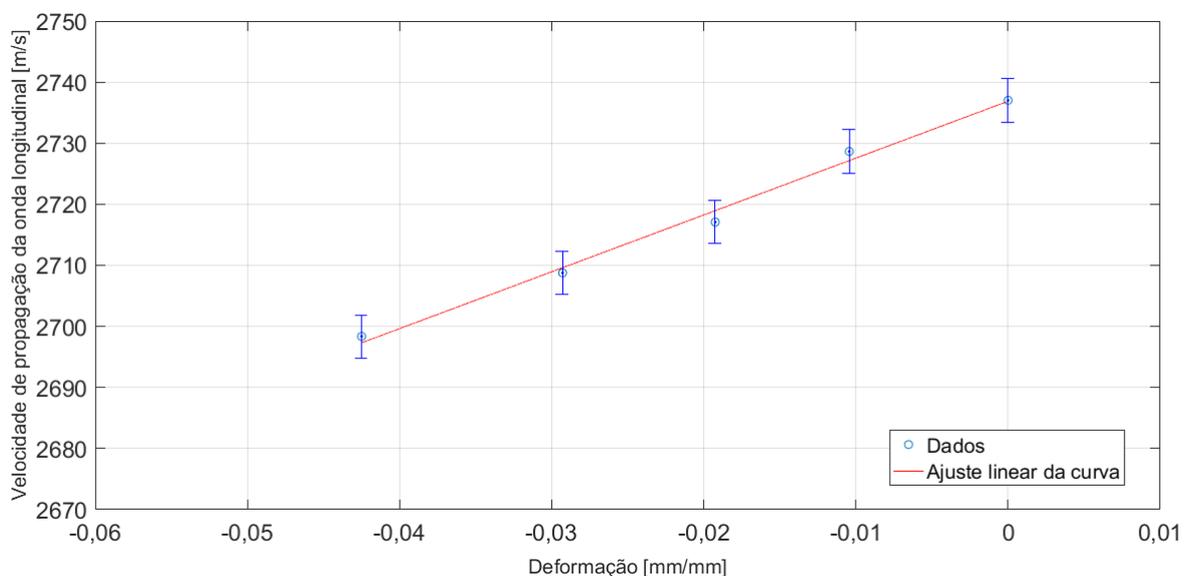
As velocidades da onda longitudinal se propagando ao longo do volume do material foram calculadas para cada patamar de força aplicado, assim como a velocidade de propagação do material livre de tensões (Equação (4.4)). O desvio padrão das medições temporais e a incerteza da espessura das peças foram empregados no cálculo do desvio padrão das velocidades, para propagação de erros ver Anexo D. Os resultados das velocidades de trânsito da onda longitudinal nos corpos de prova em função da deformação são apresentadas nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17. As barras verticais representam o desvio padrão das medições.

Figura 5.15 – Velocidade de propagação da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial nos corpos de prova 1 a 4 e referência.



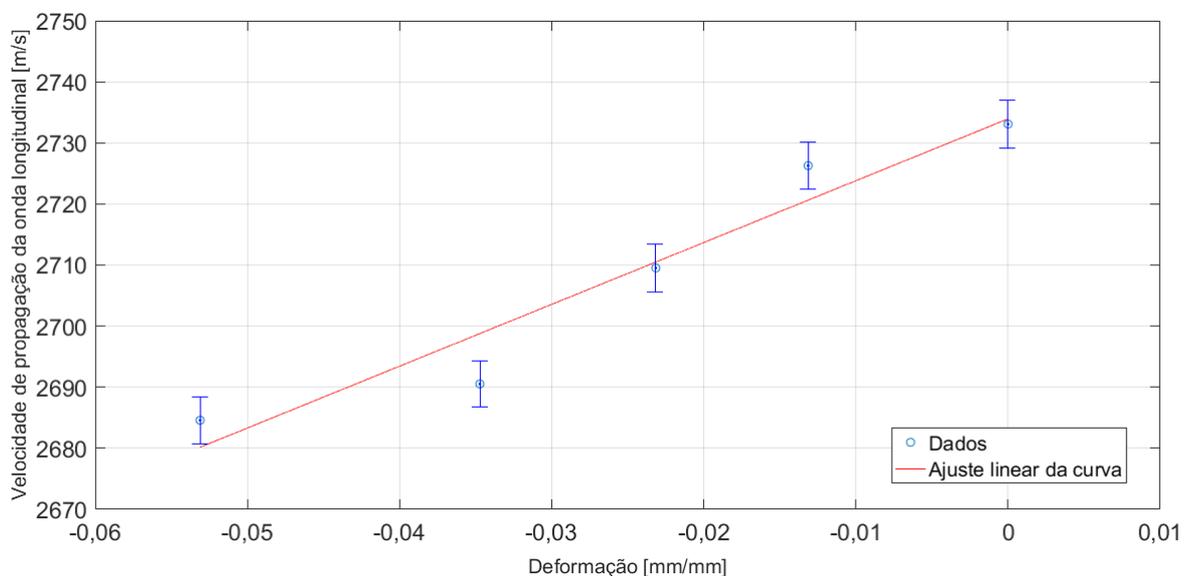
Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.16 – Velocidade de propagação da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial no corpo de prova A e referência.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.17 – Velocidade de propagação da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial no corpo de prova B e referência.



Fonte: Próprio Autor.

Os valores de deformação presentes nos gráficos foram obtidos da curva de força versus deformação fornecida pela máquina universal para ensaios mecânicos. A máquina fornece os dados de tempo, força e deformação dos ensaios. Utilizou-se o valor médio de dez medições de deformação correspondente a cada uma das forças aplicadas.

Os valores de deformação negativa são decorrentes do ensaio de compressão em que ocorre diminuição do comprimento longitudinal. Para ensaios de tração são obtidos valores positivos de deformação.

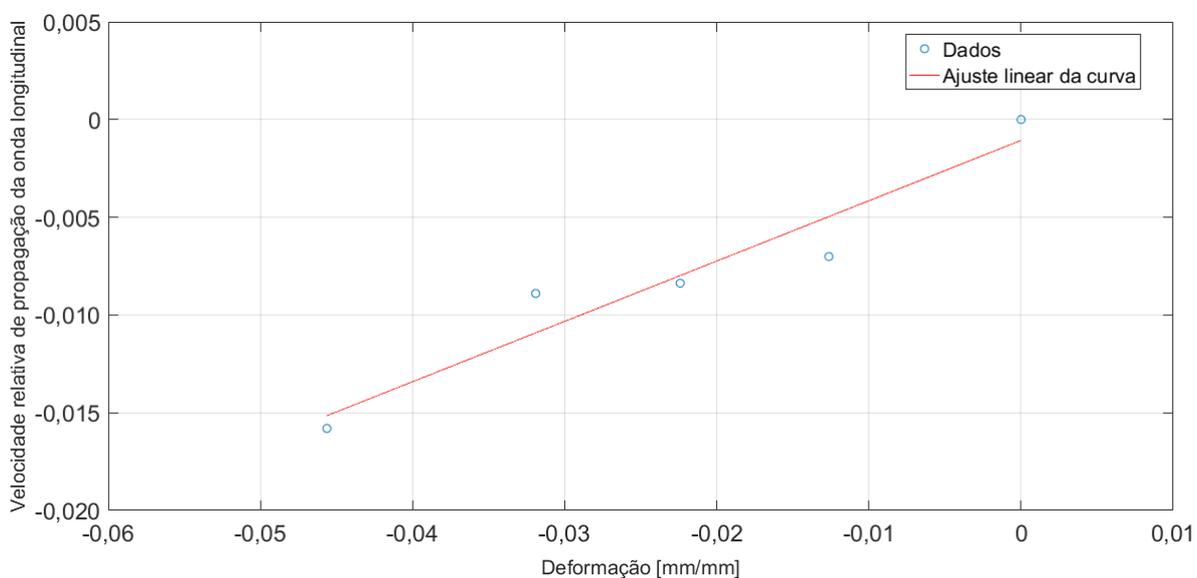
Identificou-se nos três gráficos o mesmo comportamento, uma tendência linear de diminuição da velocidade de propagação da onda longitudinal proporcional ao aumento da força aplicada uniaxialmente no corpo de prova. A curva de velocidade de propagação versus deformação para o corpo de prova A (Figura 5.16) foi a que apresentou maior linearidade. O coeficiente de determinação R^2 da curva da Figura 5.16 foi de 0,992, enquanto a curva da Figura 5.15 (corpos de prova 1 a 4) apresentou $R^2 = 0,921$ e a curva da Figura 5.17 (corpo de prova B) apresentou $R^2 = 0,933$. Nos ensaios com os corpos de provas A e B as forças foram aplicadas todas sobre o mesmo corpo de prova, diferentemente do ensaio da Figura 5.15 em que foram empregados 4 corpos de prova, como explicado na Seção 4.1.3.1.

O ensaio da Figura 5.15 estava mais sujeito a imprecisões, tanto da pressão aplicada sobre os transdutores quanto da espessura dos corpos de prova. Os corpos de prova foram trocados a medida que um patamar de força maior era aplicado (corpos de prova 1 a 4) e o transdutor foi posicionado e pressionado manualmente aos corpos de prova, sem que houvesse controle da pressão aplicada. Outro fator de imprecisão foi a dimensão das peças 1 a 4, estas não eram perfeitamente idênticas e o instrumento utilizado para a medição das dimensões (paquímetro) não dispunha da resolução necessária para a obtenção das espessuras. Resultando em diferenças de velocidade de propagação da onda ultrassônica decorrentes não do fenômeno acustoelástico, mas sim de alterações na espessura dos corpos de prova em um mesmo ensaio.

Os ensaios com os corpos de prova A (Figura 5.16) e B (Figura 5.17) tiveram como maior fator de imprecisão a pressão aplicada aos transdutores. O ensaio todo foi realizado sobre a mesma peça, anulando os problemas de diferença de espessuras entre corpos em um mesmo ensaio. Entretanto não houve controle da pressão aplicada sobre os transdutores durante todo o processo. Tais fatores podem ter afetado negativamente as medições e conseqüentemente a linearidade das curvas. Uma observação importante a respeito do corpo de prova B é que este já havia sido utilizado anteriormente em outro teste de compressão, entretanto fora submetido à uma carga baixa e não sofrera deformação plástica. Entretanto ao comparar as curvas das Figuras 5.16 (corpo de prova A) e Figura 5.17 (corpo de prova B), observou-se uma resposta mais linear para o corpo de prova A ($R^2 = 0,992$) em comparação a B ($R^2 = 0,933$). Indicando que a reutilização do corpo B também pode ter influenciado nos resultados obtidos neste.

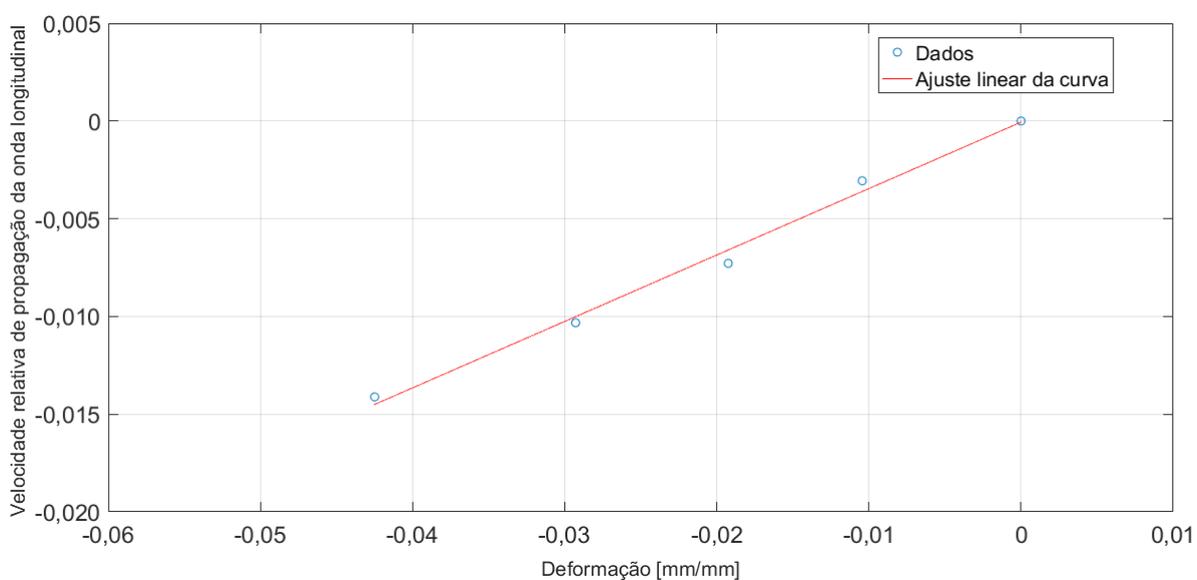
Nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 são apresentadas as curvas de velocidade relativa de propagação da onda longitudinal versus a deformação. Os valores de velocidade relativa foram calculados (Equação 4.5) para cada um dos níveis de força aplicados.

Figura 5.18 – Velocidade de propagação relativa da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial nos corpos de prova 1 a 4.



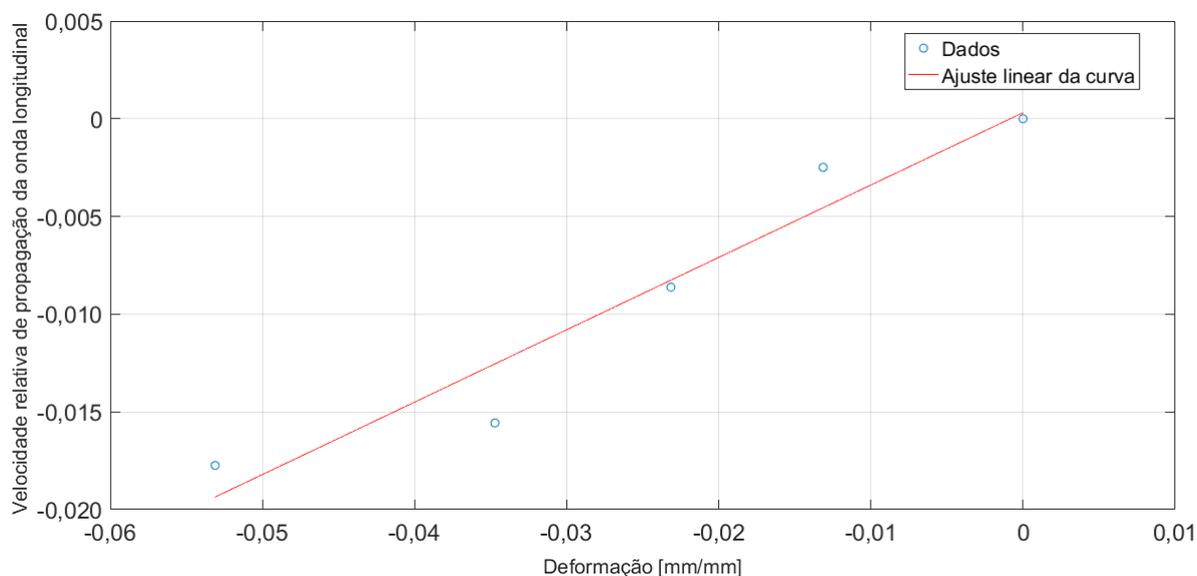
Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.19 – Velocidade de propagação relativa da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial no corpo de prova A.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.20 – Velocidade de propagação relativa da onda longitudinal em função da aplicação de uma força uniaxial no corpo de prova B.



Fonte: Próprio Autor.

Os valores negativos de velocidade relativa indicam que o tempo de trânsito da onda longitudinal cresceu conforme a força era aumentada, resultando em uma velocidade de propagação menor do que a velocidade de propagação da onda em estado livre de tensões (referência), ver Figuras 5.15, 5.16 e 5.17. Isso resultou em um crescimento negativo da curva de velocidade relativa. O polimetilmetacrilato demonstrou o mesmo comportamento para a curva de velocidade de onda longitudinal volumétrica versus deformação dos metais (EGLE; BRAY, 1976).

O coeficiente angular da curva de velocidade relativa da onda de ultrassom em função da deformação é a própria constante acustoelástica. Na literatura a constante obtida pelas ondas longitudinais se propagando ao longo da espessura do material (volumétrica) é denominada L_{22} . O ajuste linear dos dados foi realizado com um polinômio de primeira ordem. As constantes de determinação (R^2) das curvas de velocidade relativa de propagação em função da deformação (Figuras 5.18, 5.19 e 5.20) foram respectivamente 0,921, 0,992 e 0,933. Os mesmos valores foram encontrados para as respectivas curvas de velocidade por deformação (Figuras 5.15, 5.16 e 5.17). Na Tabela 5.8 são apresentados os resultados das constantes acustoelásticas caracterizadas para cada curva.

Os valores encontrados para a constante acustoelástica L_{22} para o polimetilmetacrilato demonstram sensibilidade da onda longitudinal se propagando perpendicularmente à aplicação da força uniaxial. Entretanto essa sensibilidade é inferior em módulo à sensibilidade da onda longitudinal se propagando paralelamente à força,

Tabela 5.8 – Constantes acustoelásticas L_{22} e K_{22} para o polimetilmetacrilato.

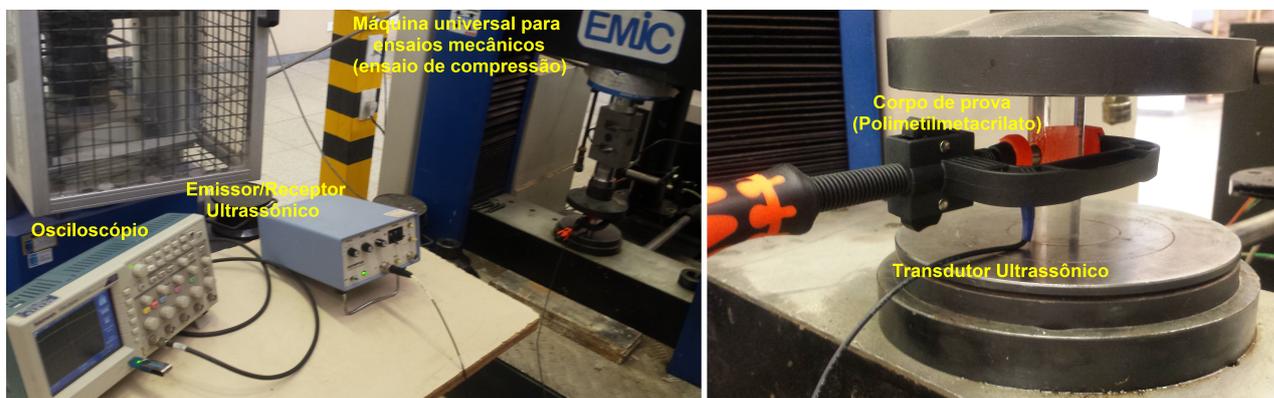
Corpo de prova	L_{22}	K_{22} (GPa^{-1})
1 a 4	$+0,3086 \pm 0,0950$	$0,1037 \pm 0,0950$
A	$+0,3400 \pm 0,0324$	$0,1142 \pm 0,0324$
B	$+0,3703 \pm 0,1050$	$0,1244 \pm 0,1050$
Valor Médio	$+0,3396 \pm 0,0178$	$0,1141 \pm 0,0103$

reportada na literatura como $L_{11} = -2,14$ (BRAY, 2012). Outros trabalhos com materiais metálicos também apresentaram valores positivos e menos sensíveis da constante L_{22} em relação a constante L_{11} . Na Tabela 5.8 também foram inseridos os valores obtidos para a constante K_{22} . Esta foi calculada utilizando os valores caracterizados de L_{22} e o módulo de Young ($E = 2,975$ GPa) fornecido pela máquina de ensaios mecânicos (EMIC). Até a realização desta pesquisa não foram encontrados registros da caracterização de L_{22} para o polimetilmetacrilato.

5.3.2 Caracterização das Constantes Acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} - 2ª Fase de Ensaios

O arranjo experimental empregado na caracterização das constantes acustoelásticas está representado na Figura 5.21.

Figura 5.21 – Sistema de medição das constantes acustoelásticas.

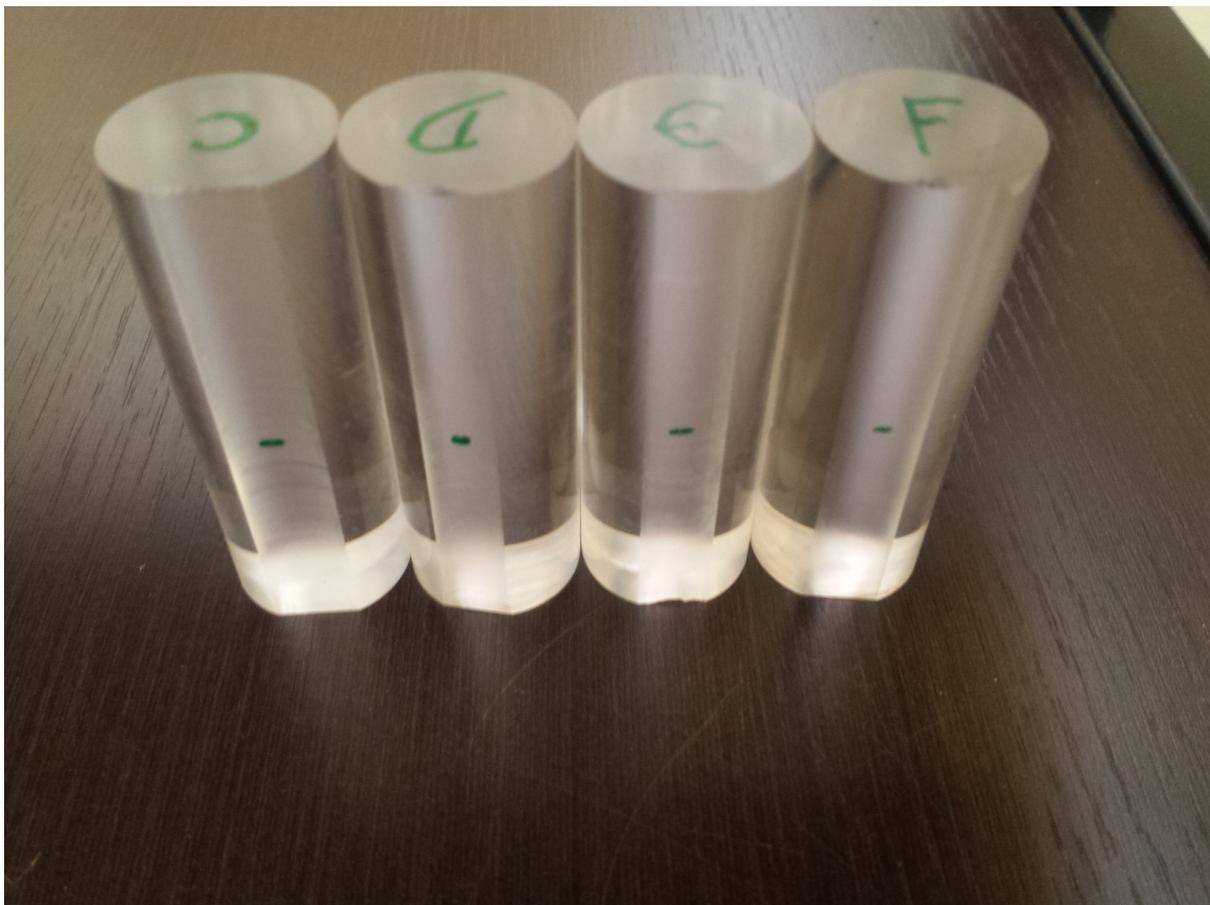


Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 5.22 são apresentadas as amostras de polimetilmetacrilato utilizadas na 2ª fase de caracterização das constantes acustoelásticas.

Na Tabela 5.9 estão registradas as espessuras de cada corpo de prova depois que foi realizado o chanfro na lateral. As medições das espessuras dos corpos de prova foram realizadas por meio de um micrômetro, assim a incerteza foi de $\pm 0,003$ mm, ver Anexo E para cálculo da incerteza.

Figura 5.22 – Corpos de prova de polimetilmetacrilato.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 5.9 – Espessuras dos corpos de prova 2ª bateria de ensaios.

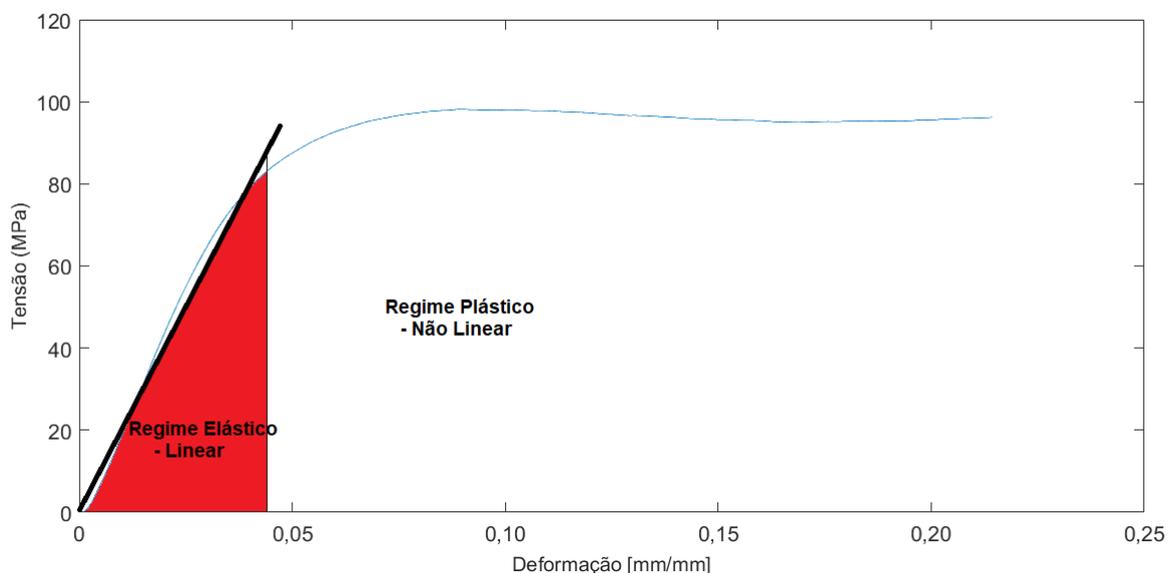
Corpo de prova	Espessura (D) (mm)
C	23,750
D	24,450
E	24,060
F	23,990

Repetiu-se o ensaio de compressão com um corpo de prova de referência (corpo de prova C) para obtenção da curva de tensão versus deformação, ver Figura 5.23.

No gráfico da Figura 5.23 é possível identificar a faixa linear (regime elástico), seguida de uma faixa não linear (regime plástico). Como explicado anteriormente, a aplicação da Lei de Hooke e das outras equações importantes para este trabalho são válidas apenas para o regime linear, região que o material apresenta comportamento elástico. Assim os patamares utilizados na 2ª fase dos ensaios para a caracterização das constantes acustoelásticas (L_{21} , L_{23} e L_{22}) foram estimados com base na região linear da curva da Figura 5.23. Nos três ensaios trabalhou-se com o mesmo intervalo de forças.

Iniciando com uma carga de 1250,00 kgf (27,75 MPa) e aumentado progressivamente em 250 kgf até a carga máxima de 3500,00 kgf (77,75 MPa).

Figura 5.23 – Curva de tensão versus deformação do polimetilmetacrilato (ensaio de compressão).



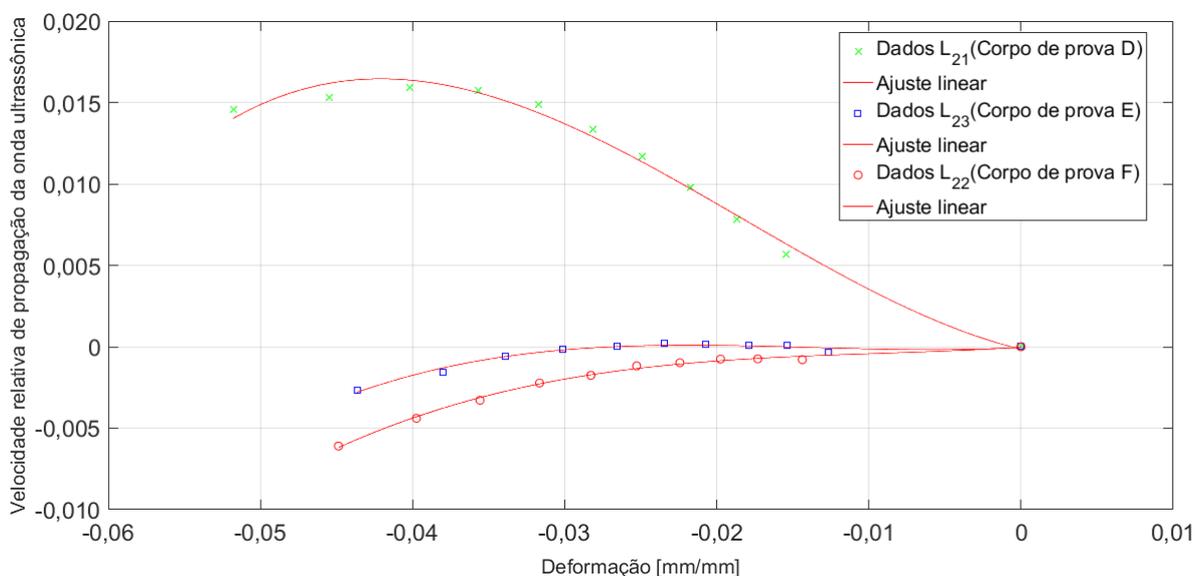
Fonte: Próprio Autor.

O valor inicial de tensão aplicado aos corpos de prova foi de 27,75 MPa, um valor de aproximadamente 36% da tensão máxima aplicada de 77,75 MPa. Buscando assim, iniciar o ensaio com um valor de tensão fora da região inicial de acomodação do material. O valor máximo de tensão aplicado no polimetilmetacrilato foi de 77,75 MPa. Percebe-se que a transição do regime elástico para o regime plástico começa a acontecer para valores próximos a 80,00 MPa.

Comparando-se os dois ensaios de compressão máxima, mostrados nas Figura 5.13 e na Figura 5.23, observou-se um suave deslocamento do nível de tensão máxima. O ensaio com o corpo de prova de comprimento $50,00 \pm 0,03$ mm (Figura 5.13) apresentou valores mais elevados de tensão na região de transição entre os regimes elástico e plástico do que o corpo de prova de comprimento $70,00 \pm 0,03$ mm (Figura 5.23).

As curvas de velocidade de propagação relativa das ondas de ultrassom em função da deformação apresentaram um comportamento não linear, ver Figura 5.24. Os parâmetros das curvas da Figura 5.24 estão apresentados na Tabela 5.10, todos para o mesmo intervalo de forças de 1250,00 a 3500,00 kgf.

Figura 5.24 – Velocidade de propagação relativa das ondas ultrassônicas em função da deformação.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 5.10 – Parâmetros das curvas de velocidade de propagação relativa das ondas de ultrassom em função da deformação.

Curvas	Ajuste polinomial da curva	Coefficiente Determinação (R^2)
Dados L_{21}	$V(\epsilon) = 317,6\epsilon^3 + 17,35\epsilon^2 - 0,2268\epsilon - 0,1542 \times 10^{-3}$	0,9912
Dados L_{23}	$V(\epsilon) = 132,8\epsilon^3 + 5,521\epsilon^2 - 0,05107\epsilon - 0,4287 \times 10^{-4}$	0,9755
Dados L_{22}	$V(\epsilon) = 102,01\epsilon^3 + 2,798\epsilon^2 - 0,05723\epsilon - 0,3383 \times 10^{-4}$	0,9959

Diferentemente dos ensaios realizados anteriormente para caracterização da constante acustoelástica L_{22} , Seção 5.3.1, que apresentaram uma tendência linear, os ensaios para caracterização das constantes L_{21} , L_{23} e L_{22} novamente, apresentaram uma tendência não-linear. Esse comportamento não-linear indica a existência de constantes acustoelásticas de segunda e até mesmo terceira ordem para essa faixa de tensão aplicada. Isso sugere também a existência de constantes elásticas de quarta, quinta ou até sexta ordem, visto que as constantes acustoelásticas são combinações das constantes elásticas do material. Nessa segunda fase, os ensaios foram realizados de forma mais rigorosa do que os ensaios anteriores. Mudanças foram implementadas, como o controle da pressão aplicada sob o transdutor durante todo o ensaio, maior rigor na aferição das dimensões dos corpos de prova, análise de mais intervalos de tempo de propagação de onda em função da aplicação de forças uniaxiais.

O ensaio com as ondas cisalhantes polarizadas paralelamente à aplicação da força (Dados L_{21}) foi o que apresentou maior sensibilidade da variação de velocidade

em função da deformação. A curva apresentou uma tendência linear de crescimento da velocidade de propagação da onda conforme aumento da deformação, até um valor aproximado de 0,04 mm/mm.

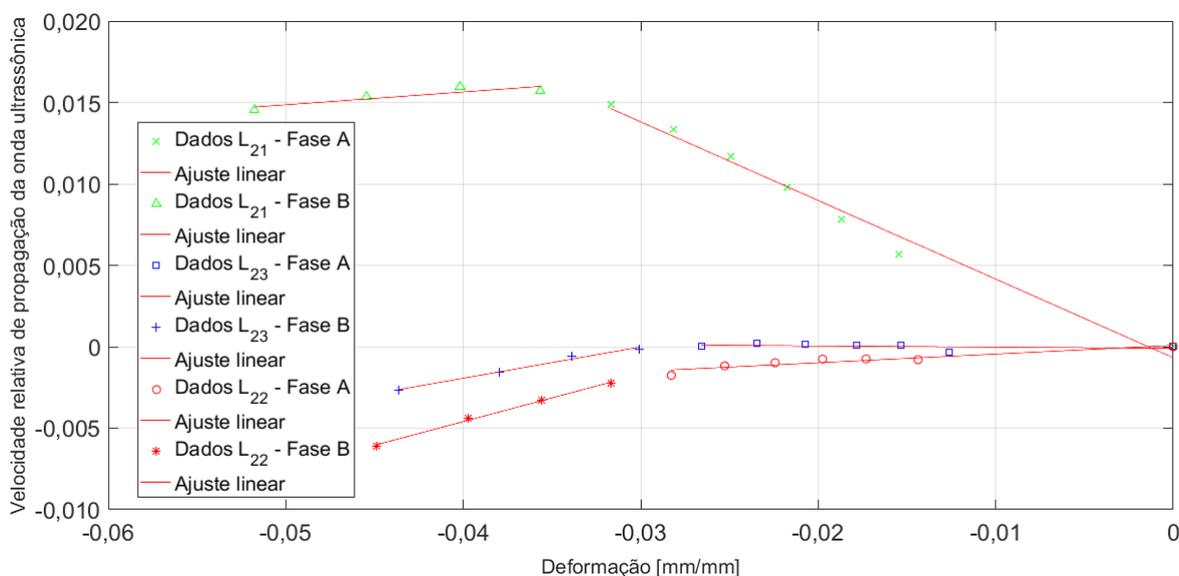
O ensaio com as ondas cisalhantes polarizadas perpendicularmente à aplicação da força (Dados L_{23}) foi o que apresentou menor sensibilidade na variação da velocidade de onda em função da deformação. Observou-se o início de um decrescimento linear da velocidade de propagação da onda em função da deformação para um valor próximo à 0,03 mm/mm de deformação.

O ensaio com ondas longitudinais perpendiculares à aplicação da força (Dados L_{22}) apresentou maior sensibilidade na variação da velocidade de onda em função da deformação do que o ensaio com as ondas cisalhantes polarizadas perpendicularmente à aplicação da força (Dados L_{23}). Entretanto apresentou menor sensibilidade que o ensaio com as ondas cisalhantes polarizadas paralelamente à aplicação da força (Dados L_{21}). A tendência de um decrescimento linear da velocidade de propagação em função da deformação acontece para valores de deformação próximos a 0,03 mm/mm.

As constantes acustoelásticas estão relacionadas aos coeficientes da curva de variação relativa de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas em função da deformação. A não-linearidade das curvas apresentadas na Figura 5.24, para todo o intervalo de deformação trabalhado, revela o comportamento não-linear do polimetilmetacrilato quando submetido a grandes intervalos de força, (de 1250,00 variando à 3500,00 kgf). O material apresentou regiões de tendência linear para intervalos menores de aplicação de força. Materiais de comportamento não-linear como o polimetilmetacrilato, exigem análise para intervalos menores de deformação em regiões que apresentaram linearidade.

A Figura 5.25 apresenta as curvas de caracterização das constantes acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} , separadas em duas fases, A e B. A Fase A compreendeu os seis primeiros pontos de cada uma das três curvas, enquanto a Fase B compreendeu os quatro últimos pontos. Realizou-se um ajuste linear em cada uma das curvas apresentadas e os parâmetros obtidos para o coeficiente de determinação e constante acustoelástica estão ilustrados na Tabela 5.11.

Figura 5.25 – Velocidade de propagação relativa das ondas ultrassônicas em função da deformação - Ajuste linear curvas parciais.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 5.11 – Constantes acustoelásticas curvas parciais L_{21} , L_{23} e L_{22} .

Curvas	Coef. Angular da Curva (Constante Acustoelástica)	Coef. Determinação (R^2)	Forças Uniaxiais (kgf)
Dados L_{21} - Fase A	$-0,4828 \pm 0,0391$	0,9853	1250 - 2500
Dados L_{21} - Fase B	$+0,0787 \pm 0,0652$	0,8181	2750 - 3500
Dados L_{23} - Fase A	$-0,0075 \pm 0,0165$	0,1471	1250 - 2500
Dados L_{23} - Fase B	$+0,1921 \pm 0,0348$	0,9895	2750 - 3500
Dados L_{22} - Fase A	$+0,0532 \pm 0,0138$	0,8763	1250 - 2500
Dados L_{22} - Fase B	$+0,2910 \pm 0,0300$	0,9966	2750 - 3500

Os dados apresentados na Tabela 5.11 revelaram valores discrepantes para uma mesma constante acustoelástica (Fases A e B) e coeficientes de determinação mais baixos, resultado da não-linearidade do material. Entretanto algumas faixas, como os Dados L_{21} - Fase A, Dados L_{23} - Fase B e L_{22} - Fase B, apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,9800 para ajustes lineares.

A curva de Dados L_{21} (propagação das ondas cisalhantes polarizadas paralelamente à aplicação da força) apresentou maior sensibilidade da variação de velocidade de onda em função da deformação nos primeiros seis pontos avaliados (Fase A). Os quatro últimos pontos (Fase B) apresentaram um valor baixo para a constante acustoelástica, que pode ser justificado pela saturação do material nesta fase. O aumento da força aplicada (deformação) apresentou pouca influência na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.

A curva Dados L_{23} (propagação das ondas cisalhantes polarizadas perpendicularmente à aplicação da força) apresentou maior sensibilidade na Fase B. Nos primeiros seis pontos (Fase A) não foi possível visualizar o fenômeno da acustoelasticidade, as forças uniaxiais aplicadas (deformações) no corpo de prova não apresentaram influências significativas na velocidade das ondas de ultrassom. Na Fase B, últimos quatro pontos, foi possível visualizar variação significativa na velocidade da onda em função da aplicação de valores mais elevados de força.

A curva Dados L_{22} (propagação das ondas longitudinais aplicadas perpendicularmente à aplicação da força) também apresentou maior sensibilidade na Fase B. Para as curvas Dados L_{23} - Fase B e Dados L_{22} - Fase B o fenômeno acustoelástico pôde ser visualizado de modo significativo a partir da aplicação de patamares de força mais altos (de 2750,00 variando à 3500,00 kgf), que corresponde à aproximadamente (de -0,030 variando à 0,045 mm/mm) de deformação. Diferentemente da curva Dados L_{21} , que apresentou o fenômeno da acustoelasticidade logo na aplicação dos patamares mais baixos de força, ainda na Fase A (de 1250,00 variando à 2500,00 kgf), que corresponde à aproximadamente (-0,015 - 0,030 mm/mm).

A não-linearidade do fenômeno acustoelástico dificultou a caracterização das constantes acustoelásticas. Visto que estas podem ser modeladas analiticamente como o coeficiente angular da reta de variação relativa de velocidade de onda em função da deformação (SCHNEIDER, 1997), (LEISK; SAIGAL, 1995). Foi possível identificar faixas de linearidades das curvas da Figura 5.25, que apresentaram constantes acustoelásticas com bons índices de determinação, entretanto não foi possível estabelecer uma mesma faixa preferencial para as três curvas.

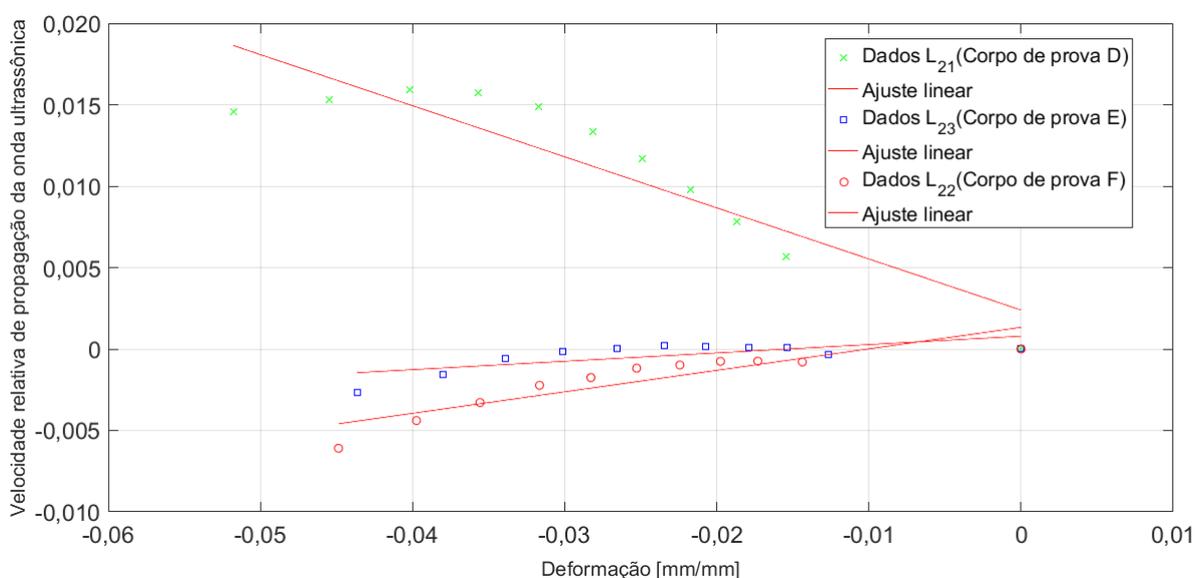
Materiais como alguns tipo de rochas e concreto também apresentam um comportamento acustoelástico não-linear, similar ao polimetilmetacrilato. JOHNSON e RASOLOFOSAON (1996) realizaram ensaios com alguns tipos de rochas e adotaram apenas os pontos iniciais das curvas (regiões de maior linearidade) para caracterização das constantes acustoelásticas destes materiais. JIANG, ZHANG e JIANG (2017) trabalharam com amostras diferentes de concreto e adotaram um ajuste linear para toda a curva dos materiais, mesmo estes apresentando curvas com tendências não lineares. WEI, ZHOU e CHENG (2000) determinaram a acustoelasticidade por meio de ondas Rayleigh no polimetilmetacrilato. Os resultados também apresentaram uma curva de tendência não linear da velocidade relativa de propagação destas ondas em função da deformação. Assim como JIANG, ZHANG e JIANG (2017), os autores também realizaram um ajuste linear para toda a curva, para caracterização da constante acustoelástica.

Diante da dificuldade em definir um mesmo intervalo, Fase A ou B (Figura 5.25), para caracterização das três constantes acustoelásticas, realizou-se um ajuste linear para toda a curva de velocidade relativa de propagação de onda em função da deformação

(JIANG; ZHANG; JIANG, 2017), (WEI; ZHOU; CHENG, 2000).

A Figura 5.26 apresenta as três curvas de velocidade de propagação relativa das ondas de ultrassom transversais e longitudinais em função da deformação. Os parâmetros de ajuste linear e as constantes acustoelásticas das curvas apresentadas na Figura 5.26 são apresentados na Tabela 5.12.

Figura 5.26 – Velocidade de propagação relativa das ondas ultrassônicas em função da deformação - Ajuste linear curva completa.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 5.12 – Constantes acustoelásticas curvas completas L_{21} , L_{23} e L_{22} .

Curvas	Coef. Angular da Curva (Constante Acustoelástica)	Coef. Determinação (R^2)	Forças Uniaxiais (kgf)
Dados L_{21}	$-0,3137 \pm 0,0631$	0,8240	1250,00 - 3500,00
Dados L_{23}	$+0,0513 \pm 0,0220$	0,5093	1250,00 - 3500,00
Dados L_{22}	$+0,1320 \pm 0,0277$	0,8107	1250,00 - 3500,00

5.3.2.1 Caracterização das Constantes Elásticas de Segunda e Terceira Ordem do Polimetilmetacrilato

A Tabela 5.13 apresenta os valores encontrados para as constantes elásticas de segunda ordem (λ e μ). O desvio padrão foi calculado por meio de cinco medições de cada uma das constantes elásticas de segunda ordem nos corpos de prova livre de tensões (antes dos ensaios de compressão).

Foram encontrados registros na literatura da constante de segunda ordem $\mu = 2,3$ [GPa] (WINKLER; LIUA, 1996). Resultando em uma diferença de 1,66% com o valor caracterizado nesta pesquisa, conforme mostrado na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Constantes elásticas de segunda ordem.

Constantes Elásticas de Segunda Ordem	μ (GPa)	λ (GPa)
	+2,2618 \pm 0,0007	+5,0908 \pm 0,0030

As constantes acustoelásticas apresentadas na Tabela 5.12, juntamente com as constantes elásticas de segunda ordem (λ e μ), (Tabela 5.13) foram utilizadas para estimar as constantes elásticas de terceira ordem (l, m, n e A, B, C).

A Tabela 5.14 apresenta os valores encontrados para as constantes elásticas de terceira ordem l, m, n e A, B, C.

Tabela 5.14 – Constantes elásticas de terceira ordem.

Constantes Elásticas de Terceira Ordem	l (GPa)	m (GPa)	n (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	C (GPa)
	8,3083	-7,7562	-11,5006	-11,5006	-2,0059	10,3142
	\pm 2,6411	\pm 0,7776	\pm 0,5781	\pm 0,5781	\pm 1,3557	\pm 3,9968

O desvio padrão das constantes elásticas de terceira ordem foram estimadas por meio de propagação de erro do desvio padrão das constantes acustoelásticas e elásticas de segunda ordem, conforme equações no Anexo D.

Os únicos registros encontrados até o momento da caracterização das constantes elásticas de terceira ordem para o polimetilmetacrilato, correspondem a WINKLER e LIUA (1996). Os autores reportaram os valores $A = -23 \pm 8$ GPa, $B = -10 \pm 6$ GPa e $C = -13 \pm 10$ GPa para lucite (nome comercial do polimetilmetacrilato). A constante elástica de terceira ordem A apresentou uma diferença de 50,0% em relação a mesma caracterizada nesta pesquisa. A constante B apresentou uma diferença de 80,0%. A constante elástica C caracterizada neste estudo apresentou sinal positivo ($C = 15,8793$ GPa), diferentemente da constante caracterizada pelos autores citados, que apresentou sinal negativo ($C = -13 \pm 10$ GPa), inviabilizando assim comparações entre estas. Como WINKLER e LIUA (1996) não apresentaram a caracterização das constantes acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} , não foi possível realizar comparações e identificar as causas das divergências entre os valores caracterizados para as constantes A, B e C nesta pesquisa e os autores citados.

As constantes elásticas e acustoelásticas fornecem informações importantes a respeito das variações de velocidade de propagação do ultrassom em função de deformações e tensões aplicadas. Possibilitando que técnicas ultrassônicas, como a birrefringência acústica, possam ser aplicadas na caracterização e inspeção da integridade dos materiais. Entretanto a não-linearidade na acustoelasticidade, presente em alguns materiais, como o material avaliado nesta pesquisa (polimetilmetacrilato), foi um fator prejudicial na estimativa das constantes acustoelásticas e elásticas de terceira ordem. Indicando que para uma melhor compreensão e caracterização do material,

são necessárias constantes elásticas de grau superior (quarta, quinta, sexta ordem), juntamente com uma modelagem adequada que relacione as constantes elásticas com as constantes acustoelásticas não-lineares.

6 CONCLUSÃO

As medições com as ondas L_{cr} apresentaram a influência da temperatura sobre o tempo de propagação das ondas no polimetilmetacrilato. O efeito da temperatura no tempo de percurso da onda de som apresentou um comportamento linear, quanto maior a temperatura, menor foi a velocidade de propagação. Comparando os resultados obtidos para as três frequências estudadas, 2,25, 3,50 e 5,00 MHz, verificou-se mudança na velocidade de propagação do som com a temperatura, para os três casos. Entretanto, foi observado um crescimento dessa influência conforme aumento da frequência. Para a frequência de 2,25 MHz encontrou-se um coeficiente térmico de $(-3,522 \pm 0,032 \text{ m/s}^\circ\text{C})$ e para a frequência de 5,00 MHz $(-3,958 \pm 0,065 \text{ m/s}^\circ\text{C})$, o que implica em uma variação de 13,73%.

Os resultados do segundo experimento demonstram a eficiência da técnica ultrassônica da birrefringência acústica na avaliação de anisotropias. Comparando as curvas dos dois materiais, aço e polimetilmetacrilato, verificou-se a presença de maior índice de birrefringência acústica na região central, região de solda/junção dos materiais. Observou-se uma diferença percentual de 86,59% para o aço e 89,47% para o polimetilmetacrilato, entre o maior valor de birrefringência (região da solda/junção) e as demais regiões da barra.

A terceira parte do estudo possibilitou caracterizar por meio do ultrassom as constantes acustoelásticas do polimetilmetacrilato (L_{21} , L_{23} e L_{22}). A primeira fase foi dedicada a caracterizar a constante L_{22} . Obteve-se um valor médio para a constante L_{22} de $+0,3396 \pm 0,0308$ e para a constante K_{22} um valor de $0,1141 \pm 0,0103 \text{ GPa}^{-1}$. A segunda fase destinou-se a caracterização das constantes L_{21} , L_{23} e novamente L_{22} . As constantes obtidas nesta fase apresentaram uma não linearidade do fenômeno acustoelástico. Apesar da não linearidade acustoelástica apresentada pelo polimetilmetacrilato, as constantes L_{21} , L_{23} e L_{22} foram caracterizadas e por meio destas as constantes elásticas de terceira ordem (l, m, n e A, B, C) puderam ser calculadas.

A pesquisa apresentou resultados importantes a respeito da acustoelasticidade no polimetilmetacrilato. Todos os ensaios realizados, análise da influência da temperatura sobre o tempo de propagação de onda, birrefringência acústica e caracterização das constantes acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} , contribuem e demonstram a versatilidade e eficiência da técnica ultrassônica no campo da acustoelasticidade em polímeros.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS

Caracterizar o coeficiente térmico do polimetilmetacrilato em um número maior de amostras, empregando ondas longitudinais volumétricas e ondas L_{cr} de frequências diferentes. Comparar se ocorrem diferenças significativas no coeficiente térmico em função do tipo de onda ultrassônica empregada. Estabelecer se há relação entre a frequência ultrassônica e o coeficiente térmico.

Caracterizar as constantes acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} para um grupo maior de amostras, buscando índices de variabilidade estatística destas para o polimetilmetacrilato.

Realizar os ensaios para caracterização das constantes acustoelásticas L_{21} , L_{23} e L_{22} em máquinas de compressão que possibilite explorar faixas mais estreitas de tensão.

Desenvolver uma modelagem matemática para análise da acustoelasticidade não - linear do polimetilmetacrilato, adaptando as equações lineares para um sistema não - linear de estrutura polimérica.

Referências

- ANDRINO, M. H. *Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos Utilizando o Efeito Acustoelástico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 42.
- AOKI, S.; IHARA, I. Feasibility study on ultrasonic in-situ measurement of friction surface temperature. *Mechanical Eng. Journal*, v. 2, n. 1, p. 1–10, 2015. Citado na página 67.
- BASATSKAYA, L. V.; ERMOLOY, I. N. Theoretical study of ultrasonic longitudinal subsurface waves in solid media. *Journal of Ultrasonics*, v. 27, p. 226–233, 1980. Citado na página 34.
- BELAHCENE, F.; LU, J. Determination of residual stress using critically refracted longitudinal waves and immersion mode. *Journal of Strain Analysis*, Troyes, v. 37, n. 1, 2002. Citado na página 42.
- BENSON, R. W.; RAELSON, V. J. *Acoustoelasticity*. [S.l.]: Production Engineering, 30, 1959. 56–59 p. Citado na página 41.
- BRAY, D. E. *Ultrasonic stress measurement using the critically refracted longitudinal (LCR) ultrasonic technique*. [S.l.], 1998. Disponível em: <<http://brayengr.com/lcrproc2.html>>. Acesso em: 22 junho 2017. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 66.
- BRAY, D. E. Current directions of ultrasonic stress measurement techniques. *Proceedings of 15^o WCNDT*, Roma, 2000. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn647/idn647.htm>>. Acesso em: 22 junho 2017. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 42.
- BRAY, D. E. *Acoustoelastic constants (Lij) for longitudinal and shear waves in engineering materials*. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://brayengr.com/AECTable122612.pdf>>. Acesso em: 22 junho 2017. Citado 2 vezes nas páginas 81 e 102.
- BRAY, D. E.; STANLEY, R. K. *Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing and Service*. Revised edition. Boca Raton: CRC Press, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 39.
- BRAY, D. E.; VELA, J.; AL-ZUBI, R. S. Stress and temperature effects on ultrasonic properties in cross-linked and high density polyethylene. *Journal of Pressure Vessel Technology*, v. 127, p. 220–225, 2005. Citado na página 43.
- BREUSCH, S. J.; KUHN, K. D. Bone cements based on polymethylmethacrylate. *Orthopade*, v. 32, n. 1, p. 41–50, 2003. Citado na página 22.
- CAMBRIDGE. *Materials data book*. Cambridge University Engineering Department, p. 11, 2012. Disponível em: <<http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatbooks/materials.pdf>>. Acesso em: 01 novembro 2017. Citado na página 104.
- DEL GROSSO, V. A.; MADER, C. W. Speed of sound in pure water. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 52, n. 5, p. 1442–1446, maio 1972. Citado na página 103.

- DESTRADE, M.; OGDEN, R. W. On the third- and fourth-order constants of incompressible isotropic elasticity. *J. Acoustical Society of America*, v. 128, n. 6, p. 3334–3343, 2010. Citado na página 30.
- EGLE, D. M.; BRAY, D. E. Measurement of acoustoelastic and third order elastic constants for rail steel. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 60, n. 3, p. 741–744, setembro 1976. Citado 3 vezes nas páginas 32, 41 e 80.
- FRAGA, R. S.; SANTOS, A. A.; ANDRINO, M. H. Temperature effect on the measurement of stresses in pipelines using ultrasonics lcr waves. *Asme International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Boston, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 68.
- HUGHES, D. S.; KELLY, J. L. Second - order elastic deformation of solids. *Physical Review*, v. 92, n. 4, p. 1145–1149, Dezembro 1953. Citado 4 vezes nas páginas 22, 25, 36 e 41.
- JIA, D. et al. Investigation of stress and temperature effect on the longitudinal ultrasonic waves in polymers. *Research in Nondestructive Evaluation*, v. 25, p. 20–29, 2014. Citado na página 43.
- JIANG, H.; ZHANG, J.; JIANG, R. Stress evaluation for rocks and structural concrete members through ultrasonic wave analysis: Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 10, n. 29, p. 1–10, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 88.
- JOHNSON, P. A.; RASOLOFOSON, P. N. J. Nonlinear elasticity and stress-induced anisotropy in rock. *Journal of Geophysical Research*, v. 101, n. B2, p. 3113–3124, 1996. Citado na página 87.
- KUDRYAVTSEV, Y.; KLEIMAN, J. Ultrasonic measurement of residual stresses in welded elements and structures. *19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016*, Munique, p. 1–10, junho 2016. Disponível em: <<http://http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/tu1c4.pdf>>. Acesso em: 20 junho 2017. Citado na página 22.
- LAMY, C. et al. Avaliação por ultra-som do tratamento térmico para alívio de tensões. *VI Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos e XXI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos*, Salvador, v. 1, p. 1–10, agosto 2002. Citado na página 41.
- LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. *Theory of Elasticity*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1986. 188 p. Citado na página 30.
- LEE, K.; CHOI, B. K. Propagation of ultrasonic guided waves in an acrylic plate as a cortical-bone-mimicking phantom. *Journal of the Korean Physical Society*, v. 65, n. 11, p. 1858–1862, 2014. Citado na página 22.
- LEISK, G. G.; SAIGAL, A. The acoustoelastic measurement of elastic constants in alumina/aluminum metal matrix composites. *Scripta Metallurgica et Materialia*, v. 33, n. 7, p. 1151–1157, 1995. Citado na página 87.
- LEON-SALAMANCA, T. *Ultrasonic Measurement of Residual Stress in Steels Using Critically Refracted Longitudinal Waves (Lcr)*. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Texas A&M University, Texas, 1988. Citado na página 24.

LEON-SALAMANCA, T.; BRAY, D. F. Residual stress measurement in steel plates and welds using critically refracted longitudinal (l_{CR}) waves. *Res. Nondestr. Eval.*, New York, v. 7, p. 169–184, 1996. Citado na página 33.

MURNAGHAN, T. D. Finite deformation of an elastic solid. John Wiley, New York, 1951. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 30 e 41.

OLYMPUS. Material sound velocities. Olympus Scientific Solutions America Corp [US], p. 1, 2017. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>>. Acesso em: 05 novembro 2017. Citado na página 108.

OLYMPUS. Ultrasonic transducer technical notes. Olympus Scientific Solutions America Corp [US], p. 1–11, 2017. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/ultrasonic-transducer-technical-notes/>>. Acesso em: 05 novembro 2017. Citado na página 107.

ORTEGA, L. P. C. *Análise de Tensões por Ultra-som através da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua*. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001. Citado na página 42.

ORTEGA, L. P. C. et al. Obtenção de constantes elásticas por ultra-som em meios isotrópicos e levemente ortotrópicos. *Third Pan American Conference for Nondestructive Testing - PANNDT*, Rio de Janeiro, Junho 2003. Citado na página 41.

RODRIGUES, A. M.; SILVA, M. E. S. Qualificação no ensaio por ultra-som nível i. *IFI/CTA*, p. 23, 2000. Citado na página 37.

ROSE, J. L. *Ultrasonic Waves in solid media*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999. 288-306 p. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 36.

ROSSINI, N. S. et al. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design*, v. 35, p. 572–588, 2012. Citado na página 21.

SANTOS, C. S. et al. Efeito da temperatura na propagação de ondas longitudinais criticamente refratadas (l_{cr}) para medição de tensões. *Rev. Tecnol. Fortaleza*, Fortaleza, v. 31, n. 2, p. 178–189, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 67.

SANTOS, R. A. *Efeito da Temperatura sobre a Medição de Tensão por Ondas L_{cr} em Aços API 5L X70*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Citado na página 39.

SCHNEIDER, E. Ultrasonic birefringence effect - its application for materials characterisations. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 22, p. 305–323, 1995. Citado na página 31.

SCHNEIDER, E. *Ultrasonic techniques*. Hauk, v. 1st edition. [S.l.]: Elsevier Science, 1997. 522-563 p. Citado 4 vezes nas páginas 25, 27, 30 e 87.

SCHNEIDER, E. et al. Determination of residual stress by time-of-flight measurements with linear-polarized shear waves. *Ultrasonics Symposium IEEE*, p. 956–959, 1981. Citado na página 38.

SRINIVASAN, M. et al. Critically refracted longitudinal waves technique: A new tool for the measurement of residual stresses in castings. *AFS (American Foundrymen Society) Transactions*, v. 91, n. 157, p. 265–267, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 41.

VIEIRA, S. L. *Desenvolvimento de um "phantom" para treinamento de biópsia de mama guiada por Ultra-Som*. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada à Medicina e Biologia) — Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2005. Citado na página 35.

WEI, Z.; ZHOU, X.; CHENG, Y. Acoustoelastic determination of local surface stresses in polymethylmetacrilate. *Elsevier Science - Applied Acoustics*, v. 200, n. 61, p. 477–485, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 88.

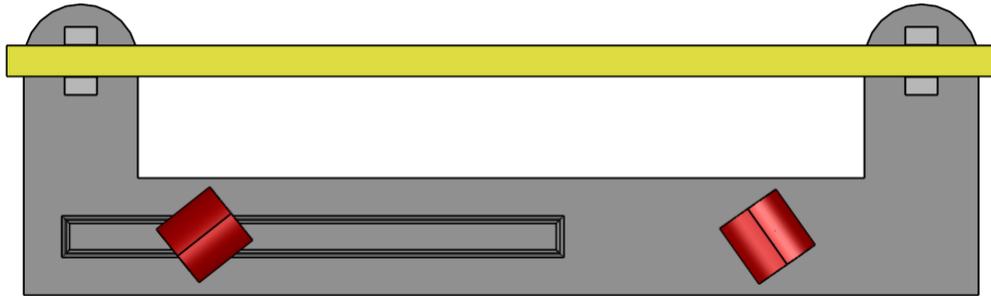
WINKLER, K. W.; LIUA, X. Measurements of third-order elastic constants in rocks. *J. Acoustical Society of America*, v. 100, n. 3, p. 3334–3343, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 89.

ZHU, Q. et al. Residual stress determination with acoustic birefringence in slightly anisotropic polymers. *Polymer Engineering and Science*, Nantes, 2015. Disponível em: <<http://wileyonlinelibrary.com>>. Acesso em: 22 maio 2017. Citado na página 43.

Apêndices

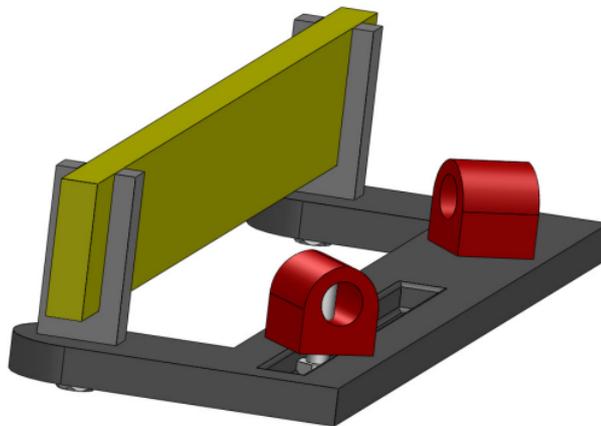
APÊNDICE A – Suporte Acrílico

Figura A.1 – Perspectiva superior do suporte de acrílico.



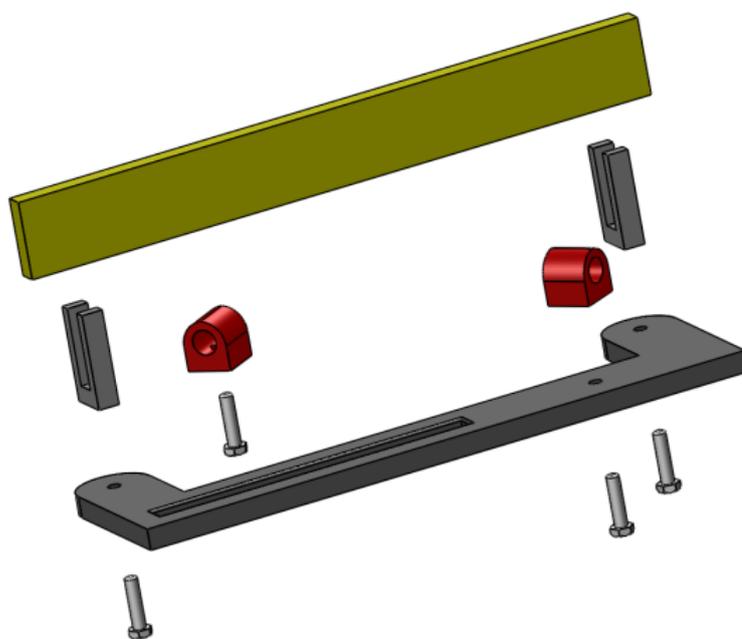
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.2 – Perspectiva lateral do suporte de acrílico.



Fonte: Próprio Autor.

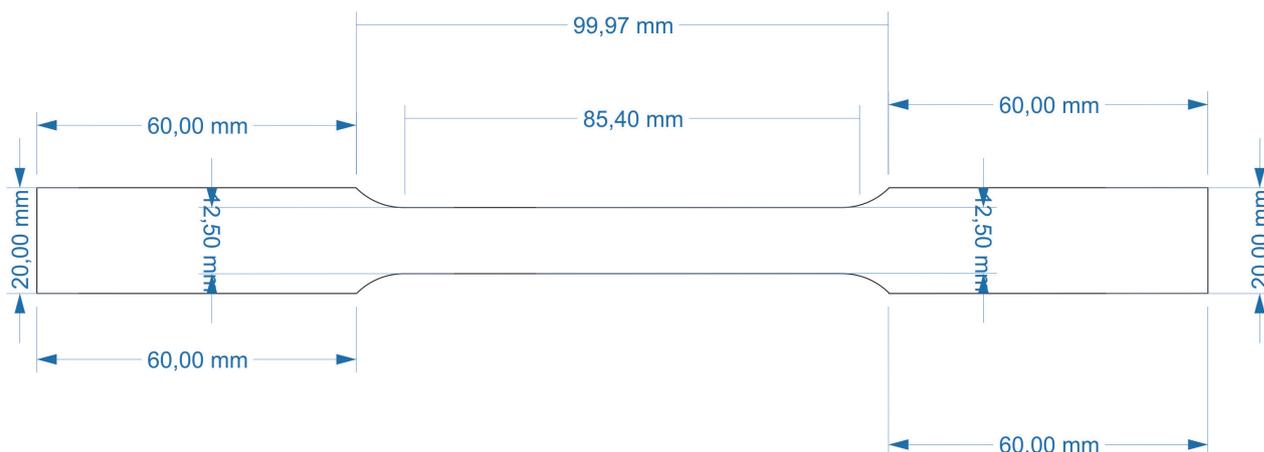
Figura A.3 – Perspectiva explodida do suporte de acrílico.



Fonte: Próprio Autor.

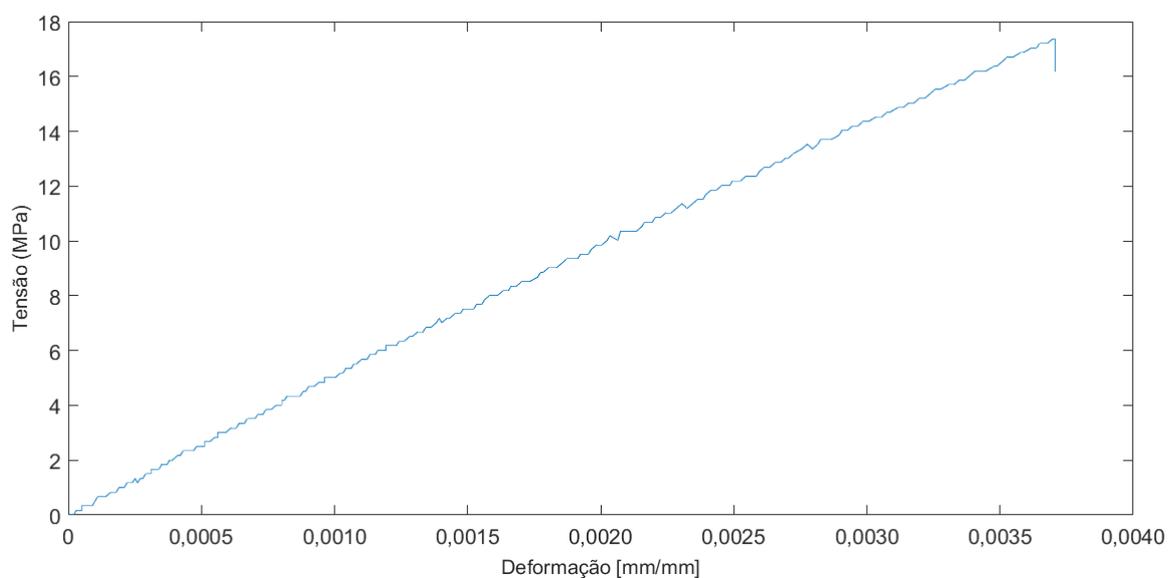
APÊNDICE B – Ensaio de Tração no Polimetilmetacrilato.

Figura B.1 – Modelo do corpo de prova utilizado nos testes de tração.



Fonte: Próprio Autor.

Figura B.2 – Tensão versus deformação do polimetilmetacrilato para o ensaio de tração.



Fonte: Próprio Autor.

Anexos

ANEXO A – Constantes Acustoelásticas

Figura A.1 – Constantes Acustoelásticas L_{ij} para Ondas Longitudinais e Transversais em Materiais da Engenharia.

Material	Load	L_{21}	L_{23}	L_{22}	L_{11}	L_{12}
Aluminum [1]	Compressive	-2.0	+0.6			
Aluminum [2]	Compression	-2.1	+0.57			
Aluminum [3]	Tension - RD		+0.46	+0.68	-2.7	
Aluminum [3]	Tension - TD			+0.93	-3.1	
Aluminum 6061 [4]	Tension - RD				-3.39	
Aluminum 7050 [4]	Tension RD				-2.9	
Aluminum 7175 [4]	Tension RD				-2.87	
Aluminum 7175 [4]	Tension TD				-2.93	
Aluminum 5052 [5]	Tension RD				-2.34	
Aluminum 5052 [5]	Tension TD				-2.46	
Aluminum 5086 [3]	Tension RD				-2.7	
Aluminum 5086 [3]	Tension TD				-3.1	
Aluminum 6056 [6]					-3.83*	
Aluminum 7198 T9 [7]					-3.77*	
Ductile Cast Iron [8]						
As-cast	Compressive				-2.15	
Annealed	Compressive				-3.89	
Normalized	Compressive				-3.92	
Q & T	Compressive				-2.98	
Rail Steel [9] (1080)	Tension	-1.5	+0.09	+0.27	-2.38	-0.15
	Compressive				-2.45	
Cold rolled Steel Bar [10]	Tension				-2.38	
4140 Steel [11]	Tension (2.25 MHz)				-2.2	
	Tension (5 MHz)				-2.36	
Steel P460 HLE [12]	Tension				-2.82*	
Steel P460 HLE [12]	Tension				-3.38*	
Steel P265 [13]	Tension				-2.66*	
Steel P265 [13]	Tension				-2.96*	
S355 steel RD [12]	Tension				-2.52	
S355 steel [12]	Tension				-2.2	
316L Stainless Steel [12]	Tension	-1.5	-1.2	~ 0	-2.1	
Clear acrylic, aircraft grade [14]	Tension				-2.14	
Polyethylene – cross-linked natural [15]	Tension				-0.85	
Polyethylene – cross-linked black [15]	Tension				-1.2	

Fonte: Adaptado (BRAY, 2012).

ANEXO B – Velocidade do Som na Água Pura em função da Temperatura

Figura B.1 – Velocidade do som na água pura [m/s] em função da temperatura [°C]

T_{es} °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	1402.388	1402.891	1403.393	1403.893	1404.393	1404.892	1405.389	1405.885	1406.380	1406.874
1	1407.367	1407.859	1408.349	1408.838	1409.327	1409.814	1410.300	1410.784	1411.268	1411.751
2	1412.232	1412.712	1413.192	1413.670	1414.147	1414.622	1415.097	1415.571	1416.043	1416.515
3	1416.985	1417.454	1417.922	1418.389	1418.855	1419.320	1419.784	1420.246	1420.708	1421.168
4	1421.628	1422.086	1422.543	1422.999	1423.454	1423.908	1424.361	1424.813	1425.264	1425.713
5	1426.162	1426.609	1427.056	1427.501	1427.946	1428.389	1428.831	1429.272	1429.712	1430.151
6	1430.589	1431.026	1431.462	1431.897	1432.331	1432.764	1433.196	1433.626	1434.056	1434.485
7	1434.912	1435.339	1435.764	1436.189	1436.612	1437.035	1437.456	1437.877	1438.296	1438.715
8	1439.132	1439.549	1439.964	1440.378	1440.792	1441.204	1441.615	1442.026	1442.435	1442.843
9	1443.251	1443.657	1444.062	1444.467	1444.870	1445.273	1445.674	1446.074	1446.474	1446.872
10	1447.270	1447.666	1448.062	1448.456	1448.850	1449.243	1449.634	1450.025	1450.415	1450.803
11	1451.191	1451.578	1451.964	1452.349	1452.733	1453.116	1453.498	1453.879	1454.259	1454.638
12	1455.016	1455.394	1455.770	1456.145	1456.520	1456.893	1457.266	1457.637	1458.008	1458.378
13	1458.747	1459.115	1459.482	1459.848	1460.213	1460.577	1460.940	1461.303	1461.664	1462.025
14	1462.384	1462.743	1463.101	1463.458	1463.814	1464.169	1464.523	1464.876	1465.229	1465.580
15	1465.931	1466.280	1466.629	1466.977	1467.324	1467.670	1468.015	1468.359	1468.703	1469.045
16	1469.387	1469.728	1470.067	1470.406	1470.745	1471.082	1471.418	1471.754	1472.088	1472.422
17	1472.755	1473.087	1473.418	1473.748	1474.078	1474.406	1474.734	1475.061	1475.386	1475.712
18	1476.036	1476.359	1476.682	1477.003	1477.324	1477.644	1477.963	1478.282	1478.599	1478.916
19	1479.231	1479.546	1479.860	1480.174	1480.486	1480.798	1481.108	1481.418	1481.727	1482.035
20	1482.343	1482.649	1482.955	1483.260	1483.564	1483.868	1484.170	1484.472	1484.772	1485.073
21	1485.372	1485.670	1485.968	1486.264	1486.560	1486.856	1487.150	1487.443	1487.736	1488.028
22	1488.319	1488.610	1488.899	1489.188	1489.476	1489.763	1490.049	1490.335	1490.620	1490.804
23	1491.187	1491.469	1491.751	1492.032	1492.312	1492.591	1492.870	1493.147	1493.424	1493.700
24	1493.976	1494.250	1494.524	1494.797	1495.070	1495.341	1495.612	1495.882	1496.151	1496.420
25	1496.687	1496.954	1497.220	1497.486	1497.751	1498.014	1498.278	1498.540	1498.802	1499.063
26	1499.323	1499.582	1499.841	1500.099	1500.356	1500.612	1500.868	1501.123	1501.377	1501.630
27	1501.883	1502.135	1502.386	1502.637	1502.887	1503.136	1503.384	1503.632	1503.878	1504.124
28	1504.370	1504.615	1504.858	1505.102	1505.344	1505.586	1505.827	1506.067	1506.307	1506.546
29	1506.784	1507.022	1507.258	1507.494	1507.730	1507.964	1508.198	1508.431	1508.664	1508.896
30	1509.127	1509.357	1509.587	1509.816	1510.044	1510.272	1510.499	1510.725	1510.950	1511.175
31	1511.399	1511.623	1511.845	1512.068	1512.289	1512.510	1512.730	1512.949	1513.167	1513.385
32	1513.603	1513.819	1514.035	1514.250	1514.465	1514.679	1514.892	1515.104	1515.316	1515.527
33	1515.738	1515.948	1516.157	1516.365	1516.573	1516.780	1516.987	1517.193	1517.398	1517.602
34	1517.806	1518.009	1518.212	1518.414	1518.615	1518.815	1519.015	1519.214	1519.413	1519.611
35	1519.808	1520.005	1520.201	1520.396	1520.591	1520.785	1520.978	1521.171	1521.363	1521.554
36	1521.745	1521.935	1522.125	1522.314	1522.502	1522.690	1522.877	1523.063	1523.249	1523.434
37	1523.618	1523.802	1523.985	1524.168	1524.350	1524.531	1524.712	1524.892	1525.071	1525.250
38	1525.428	1525.606	1525.783	1525.959	1526.135	1526.310	1526.484	1526.658	1526.832	1527.004
39	1527.176	1527.348	1527.518	1527.689	1527.858	1528.027	1528.195	1528.363	1528.530	1528.697

Fonte:(DEL GROSSO; MADER, 1972).

ANEXO C – Módulo de Young para alguns Polímeros

Figura C.1 – Módulo de Young (E[GPa])

Polymers ¹		E (GPa)		
Elastomer	Butyl Rubber	0.001	- 0.002	
	EVA	0.01	- 0.04	
	Isoprene (IR)	0.0014	- 0.004	
	Natural Rubber (NR)	0.0015	- 0.0025	
	Neoprene (CR)	0.0007	- 0.002	
	Polyurethane Elastomers (elPU)	0.002	- 0.003	
	Thermoplastic	Silicone Elastomers	0.005	- 0.02
		ABS	1.1	- 2.9
		Cellulose Polymers (CA)	1.6	- 2
		Ionomer (I)	0.2	- 0.424
		Nylons (PA)	2.62	- 3.2
		Polycarbonate (PC)	2	- 2.44
		PEEK	3.5	- 4.2
		Polyethylene (PE)	0.621	- 0.896
		PET	2.76	- 4.14
		Acrylic (PMMA)	2.24	- 3.8
	Thermoset	Acetal (POM)	2.5	- 5
		Polypropylene (PP)	0.896	- 1.55
		Polystyrene (PS)	2.28	- 3.34
		Polyurethane Thermoplastics (tpPU)	1.31	- 2.07
PVC		2.14	- 4.14	
Teflon (PTFE)		0.4	- 0.552	
Epoxies		2.35	- 3.075	
Phenolics		2.76	- 4.83	
Polymer Foams	Polyester	2.07	- 4.41	
	Flexible Polymer Foam (VLD)	0.0003	- 0.001	
	Flexible Polymer Foam (LD)	0.001	- 0.003	
	Flexible Polymer Foam (MD)	0.004	- 0.012	
	Rigid Polymer Foam (LD)	0.023	- 0.08	
	Rigid Polymer Foam (MD)	0.08	- 0.2	
	Rigid Polymer Foam (HD)	0.2	- 0.48	

Fonte:(CAMBRIDGE, 2012).

ANEXO D – Propagação de Erros

Nas sessões a seguir são apresentadas as expressões para o cálculo da incerteza padrão em grandezas combinadas, utilizando a propagação de erro para diversas relações funcionais.

D.0.1 Soma e subtração de grandezas afetadas por erros

A análise estatística rigorosa mostra que ao somar ou subtrair grandezas estatisticamente independentes o erro no resultado será dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros de cada uma das grandezas. Por exemplo, três grandezas dadas por: $x \pm \delta x$, $y \pm \delta y$ e $z \pm \delta z$, a soma (ou subtração) delas, será afetada por erro de valor conforme as Equações (D.1) e (D.2):

$$w = x + y + z \quad (\text{D.1})$$

$$\delta w = \sqrt{(\delta x)^2 + (\delta y)^2 + (\delta z)^2} \quad (\text{D.2})$$

D.0.2 Multiplicação e divisão de grandezas afetadas por erros

Neste caso, o erro relativo do resultado será dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros relativos de cada fator Equações (D.3) e (D.4).

$$w = \frac{x}{y} \quad (\text{D.3})$$

$$\delta w = w \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{y}\right)^2} \quad (\text{D.4})$$

Os desvios padrões nesta pesquisa foram calculadas via implementação computacional, utilizando combinações das Equações (D.2) e (D.4).

ANEXO E – Incerteza Tipo B

Por definição, incerteza é uma estimativa que quantifica a confiabilidade do resultado de uma medição. Quanto maior for a incerteza, tanto menor será a confiabilidade desse resultado. Paralelamente, é importante destacar que incerteza não é erro. Por isso a incerteza é um conceito muito mais instrumental e com mais aplicabilidade que o conceito de erro.

As avaliações da incerteza do tipo B são utilizadas principalmente quando é muito difícil realizar observações repetidas (ou quando não faz sentido realizar tais observações). O resultado da avaliação da incerteza do tipo B pode ser interpretado como um desvio padrão. Ou seja, esta pode ser utilizada para construir intervalos de confiança. Adotou-se uma distribuição uniforme (retangular), em que os valores de desvio padrão foram calculados conforme a Equação (E.1):

$$u_{xi} = \frac{a_i}{\sqrt{3}} \quad (\text{E.1})$$

em que:

- u_{xi} - desvio padrão ou incerteza padrão da distribuição retangular de uma medição xi;
- a_i - semi-amplitude da variação da medição xi;

As incertezas padrões nesta pesquisa foram calculadas como tipo B - distribuição retangular.

ANEXO F – Nota Técnica Transdutores Ultrassônicos Pulso-Eco Olympus Panameric

Figura F.1 – Nota Técnica Transdutores Ultrassônicos Pulso-Eco Olympus Panameric.

Technical Notes

The Technical Notes section is designed to provide a brief overview of the ultrasonic principles important to transducer application and design. The Technical Notes are organized in the following sections:

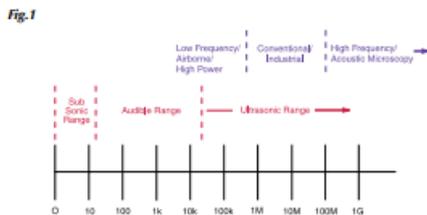
1. Basic Ultrasonic Principles
2. Advanced definitions and formulas
3. Design characteristics of transducers
4. Transducer specific principles
5. Transducer excitation guidelines
6. Cables

1. BASIC ULTRASONIC PRINCIPLES

a. What is Ultrasound?

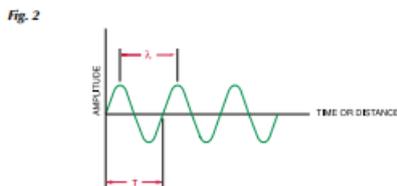
Sound generated above the human hearing range (typically 20 kHz) is called ultrasound. However, the frequency range normally employed in ultrasonic nondestructive testing and thickness gaging is 100 kHz to 50 MHz. Although ultrasound behaves in a similar manner to audible sound, it has a much shorter wavelength. This means it can be reflected off very small surfaces such as defects inside materials. It is this property that makes ultrasound useful for nondestructive testing of materials.

The Acoustic Spectrum in Figure (1) breaks down sound into 3 ranges of frequencies. The Ultrasonic Range is then broken down further into 3 sub sections.



b. Frequency, Period and Wavelength

Ultrasonic vibrations travel in the form of a wave, similar to the way light travels. However, unlike light waves, which can travel in a vacuum (empty space), ultrasound requires an elastic medium such as a liquid or a solid. Shown in Figure (2) are the basic parameters of a continuous wave (cw). These parameters include the wavelength (λ) and the period (T) of a complete cycle.



The number of cycles completed in one second is called frequency (f) and is measured in Hertz (Hz), some examples follow;

- 1 cycle/second= 1Hz
- 1000 cycles/second= 1kHz
- 1,000,000 cycles/second= 1MHz

The time required to complete a full cycle is the period (T), measured in seconds. The relation between frequency and period in a continuous wave is given in Equation (1).

Eqn. 1 $f = 1/T$

c. Velocity of Ultrasound and Wavelength

The velocity of ultrasound (c) in a perfectly elastic material at a given temperature and pressure is constant. The relation between c, f, λ and T is given by Equations (2) and (3):

Eqn. 2 $\lambda = c/f$ Eqn. 3 $\lambda = cT$

λ = Wavelength
 c = Material Sound Velocity
 f = Frequency
 T = Period of time

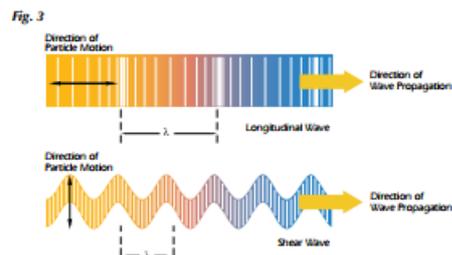
Table 1 on page 48 lists the longitudinal and shear wave velocities of materials that are commonly tested with ultrasonics.

d. Wave Propagation and Particle Motion

The most common methods of ultrasonic examination utilize either longitudinal waves or shear waves. Other forms of sound propagation exist, including surface waves and Lamb waves.

- The longitudinal wave is a compressional wave in which the particle motion is in the same direction as the propagation of the wave.
- The shear wave is a wave motion in which the particle motion is perpendicular to the direction of the propagation.
- Surface (Rayleigh) waves have an elliptical particle motion and travel across the surface of a material. Their velocity is approximately 90% of the shear wave velocity of the material and their depth of penetration is approximately equal to one wavelength.
- Plate (Lamb) waves have a complex vibration occurring in materials where thickness is less than the wavelength of ultrasound introduced into it.

Figure (3) provides an illustration of the particle motion versus the direction of wave propagation for longitudinal waves and shear waves.



e. Applying Ultrasound

Ultrasonic nondestructive testing introduces high frequency sound waves into a test object to obtain information about the object without altering or damaging it in any way. Two basic quantities are measured in ultrasonic testing; they are time of flight or the amount of time for the sound to travel through the sample, and amplitude of received signal. Based on velocity and round trip time of flight through the material the material, thickness can be calculated as follows:

Eqn. 4 $T = \frac{ct}{2}$

T = Material Thickness
 c = Material Sound Velocity
 t = Time of Flight

ANEXO G – Velocidade de Propagação Ultrassônica de Ondas Longitudinais em Materiais

Figura G.1 – Velocidade de propagação ultrassônica de ondas longitudinais em materiais.

Ultrasonic Velocities in Common Materials

Material	V (in./ μ sec)	V (m/sec)
Acrylic (Perspex)	0.1070	2730
Aluminum	0.2490	6320
Iron, Cast (soft)	0.1380	3500
Iron, Cast (hard)	0.2200	5600
Iron oxide (magnetite)	0.2320	5890
Lead	0.0850	2160
Lucite®	0.1060	2680
Polyamide	0.0870	2200
Nylon	0.1020	2600
Polyethylene, high density (HDPE)	0.0970	2460
Polyethylene, low density (LDPE)	0.0820	2080
Polystyrene	0.0920	2340
Polyvinylchloride, (PVC)	0.0940	2395
Tungsten	0.2040	5180
Water (20°C)	0.0580	1480
Zinc	0.1640	4170
Zirconium	0.1830	4650

Fonte: Adaptado (OLYMPUS, 2017a).