



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL**

LUCAS GABRIEL DE SOUSA ALBUQUERQUE

**ANÁLISE DO ESTADO PLANO DE TENSÕES EM CHAPAS DE AÇO ASTM
A131 POR MÉTODOS ULTRASSÔNICOS**

**Belém - PA
2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL**

**ANÁLISE DO ESTADO PLANO DE TENSÕES EM CHAPAS DE AÇO ASTM
A131 POR MÉTODOS ULTRASSÔNICOS**

LUCAS GABRIEL DE SOUSA ALBUQUERQUE

Dissertação de Mestrado Submetida ao Corpo Docente do Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Industrial da Universidade Federal Do Pará como requisito final para obtenção do Título de Mestrado em Engenharia Industrial.

Área de concentração: Projetos Industriais
Orientador: Paulo Cordeiro Machado

**Belém - PA
2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

A345a Albuquerque, Lucas Gabriel de Sousa.
Análise do estado plano de tensões em chapas de aço ASTM
A131 por métodos ultrassônicos / Lucas Gabriel de Sousa
Albuquerque. — 2023.
xvi, 78 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial, Belém, 2023.

1. Efeito acustoelástico. 2. Tensão residual. 3. Ultrassom.
4. Análise não destrutiva. I. Título.

CDD 620.112

LUCAS GABRIEL DE SOUSA ALBUQUERQUE

Análise do estado plano de tensões em chapas de aço ASTM A131 por métodos ultrassônicos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Área de concentração: Projetos Industriais

Orientador: Paulo Cordeiro Machado

Data de aprovação: 17 de agosto de 2023

Banca examinadora:

_____ Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado	- Orientador/Presidente PPGEI/UFPA
_____ Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga	- Membro Interno PPGEI/UFPA
_____ Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa	- Membro Externo UFPA
_____ Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Jr.	- Membro Externo UNICAMP

Agradecimentos

Como autor deste trabalho, não posso deixar de mencionar todas as pessoas que tornaram esse trabalho possível. Eu acredito que um bom trabalho nunca é feito apenas de um indivíduo, mas de um grupo. Eu penso que a minha maior tarefa foi juntar todas as pessoas que me ajudaram, de várias áreas, em prol de um objetivo.

Julgo importante, antes de agradecer às pessoas que me ajudaram na realização do trabalho, devo agradecer às pessoas que me deram suporte para que eu me mantesse mais focado. Nisso, eu incluo o meu tio Maurício e tia Socorro, além do meu tio Paulo e tia Natália, por darem-me um espaço em que eu pudesse dormir e descansar, e, principalmente, aos meus pais, Fernando e Lêda Albuquerque, por sempre me apoiarem nessa jornada.

Até o momento que escrevo esse agradecimento, eu tenho 6 anos de LCAM e 8 de UFPA. Durante todo esse período, eu conheci pessoas que me mudaram e que estão comigo até hoje, e, sem elas, eu não teria, talvez, sequer começado o mestrado. Então, primeiramente, eu devo agradecer aos meus orientadores, Paulo Machado e Ednelson Costa, que, apesar de serem bem atarefados, ainda encontravam tempo pra sentar comigo, discutir resultados e decidir quais os melhores passos a se tomar. Agradeço, também, aos professores Leonardo Dantas e Fábio Setúbal por estarem sempre dispostos a ajudar, seja emprestando algum equipamento, ou tirando dúvidas das suas áreas mais específicas.

Na parte prática, sempre pude contar com o Tarcio, Gleydson (Bruce) e Ângelo, sempre bem dedicados, atenciosos e experientes. Com as partes matemáticas, tive auxílio de dois grandes amigos meus do tempo da graduação, o Fábio e o Luciano, que também me ajudaram muito em conseguir controlar (ou realizar) algumas ideias mirabolantes que eu tinha. Mais recentemente, tive a oportunidade de conhecer o Alan, que, apesar de pouco tempo, me ajudou a montar e programar o motor de passo, que facilitou muito a fazer as medições de ultrassom.

Além deles, também agradeço a todos os amigos que fiz durante todos esses anos dentro dessa universidade que, mesmo que só um pouco, colaboraram com esse trabalho. Também agradeço à toda equipe LCAM, em especial ao professor Eduardo Braga, por confiar e disponibilizar o laboratório e os equipamentos para mim. Por último, agradeço ao projeto Cátedra Roda-Trilho que financiou minhas atividades.

"Geralmente, subestimamos os efeitos da aleatoriedade."

(Leonard Mlodinow)

Resumo

As tensões residuais afetam o componente mecânico da mesma forma que tensões externas o fazem. Essas tensões surgem, geralmente, no processo de fabricação. Ao conhecer as tensões residuais, principalmente as trativas, presentes em um componente, ou as que podem ser geradas por algum processo de fabricação, é possível realizar ações que evitem ou minimizem seus efeitos, prolongando, assim, sua vida útil. Portanto, a tensão residual será sempre uma demanda a ser estudada, tanto pela academia, quanto pela indústria metal-mecânica. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi determinar o estado plano das tensões residuais em chapas de aço ASTM A131 por métodos de ondas ultrassônicas cisalhantes e compressivas combinadas. Foi usada uma tocha de soldagem TIG para induzir tensões residuais nas chapas pelo alto gradiente térmico. As amostras foram fixadas por suportes para evitar deformações, preservando, então, as tensões residuais. Três métodos diferentes foram aplicados, denominados, neste trabalho, de: Hirao I; Clark; e Hirao II. A maior diferença entre eles está relacionada à direção preferencial de propagação da onda. Tensões em direções diferentes do eixo de anisotropia podem alterar esta direção. Conseqüentemente, o ângulo entre a anisotropia e a direção preferencial de propagação da onda ultrassônica (φ) é alterado. Para a medição do tempo de propagação das ondas ultrassônicas, foi desenvolvido um *software* para a aquisição dos sinais de resposta ultrassônicos e outro para o tratamento dos dados. Para encontrar o ângulo preferencial de propagação da onda, um suporte foi feito por impressão 3D, o que permitiu o movimento do transdutor através de um motor de passo. Nos três métodos, foram observadas tensões trativas bem elevadas próximo à zona fundida, que diminuíram rapidamente conforme se aumenta a distância dessa região. Além disso, os valores de φ foram menores na linha central do que nas linhas laterais, indicando variação nos níveis de tensões residuais em função da distância das restrições.

Palavras-chave: Efeito acustoelástico; tensão residual; ultrassom; análise não destrutiva.

Abstract

Residual stresses affect the mechanical component in the same way that external stresses do. These stresses usually arise in the manufacturing process. By knowing the residual stresses, mainly the tensile stresses, present in a component or those that may be generated by some manufacturing process, it is possible to take actions to avoid or minimize their effects, thus extending the component's useful life. Thus, residual stress will always be a demand to be studied, both by academia and by the metal-mechanic industry. Therefore, the objective of this work was to determine the plane state of residual stresses in ASTM A131 steel plates by combined shear and compressive ultrasonic wave methods. A TIG welding torch was used to induce residual stresses in the plates by the high thermal gradient. The specimens were fixed by supports to avoid deformation, thus preserving the residual stresses. Three different methods were applied, named, in this paper, as: Hirao I; Clark; and Hirao II. The major difference between them is related to the preferred direction of wave propagation. Stresses in different directions from the anisotropy axis can change this direction. Consequently, the angle between the anisotropy and the preferential direction of propagation of the ultrasonic wave (φ) is changed. To measure the propagation time of the ultrasonic waves, a *software* was developed for the acquisition of the ultrasonic response signals and another one for the data processing. To find the preferential angle of wave propagation, a support was made by 3D printing, which allowed the transducer to be moved using a stepper motor. In all three methods, very high tensile stresses were observed near the melt zone, which decreased rapidly as the distance from this region increased. In addition, the values of φ were lower in the center line than in the lateral lines, indicating variation in residual stress levels as function of distance from the constraints.

Keywords: Acoustoelastic effect; residual stress; ultrasound; non-destructive evaluation.

Lista de figuras

1 A interação entre temperatura, tensão e microestrutura	4
2 Exemplos das formas típicas de como surgem de tensões residuais em componentes fabricados	5
3 Demonstração esquemática de como a transformação martensítica induz tensão residual	6
4 Distribuição das tensões residuais longitudinais e transversais a uma junta soldada com dois passes em uma placa de alumínio. TIG.	8
5 Interação da contração impedida e de transformação de fase em diferentes velocidades.	9
6 Formas de movimento das partículas em uma onda planar	11
7 Excitação de ondas harmônicas em um meio contínuo	13
8 Reflexão e transmissão da onda na interface com incidência normal.	14
9 Reflexão e transmissão da onda na interface com incidência oblíqua.	15
10 Efeito piezoelétrico.	18
11 Espectro da frequência de um pulso de um transdutor ultrassônicos	18
12 Curva do espectro da potência para transdutores ultrassônicos	19
13 Força de Lorentz em um campo magnético	20
14 Ondas cisalhantes e compressivas em um campo magnético	21
15 Mudança relativa da velocidade da onda em função da deformação	25
16 Sistema bidimensional mostrando ao longo dos eixos a textura ortotrópica com a direção das direções principais e da onda cisalhante polarizada.	26
17 Ângulo de rotação do eixo principal de propagação em função da tensão aplicada	27
18 Tensão obtida ao longo dos eixos x e y em um furo central na chapa	29
19 Comparação das tensões residuais com e sem suporte	30
20 Comparativo do método de extensometria, Lcr e análise espectral	33
21 Grafo com o ano de publicação de trabalhos com ultrassom.	33
22 Fluxograma geral do trabalho	34
23 Chapa de aço ASTM A131 como recebido, com esboço do corte	36
24 Suporte de restrição das deformações	37
25 Caminho percorrido pelo sinal	38

26	Suporte do transdutor ultrassônico.	39
27	Microcontrolador DRV8825 e motor de passo.	39
28	Arduino mega 2560	39
29	Interface do software para obtenção do sinal	40
30	Exemplo do intervalo de varredura.	42
31	TOF da onda cisalhante em função do ângulo de polarização.	43
32	Demonstração de como encontrar a direção de polarização	43
33	Sistema usado para medição das constantes acustoelásticas	44
34	Suporte utilizado para aperto e fixação do transdutor	44
35	Pontos de medição com ultrassom	45
36	Limitação geométrica causada pelo suporte	45
37	Sistema bidimensional mostrando ao longo dos eixos a textura ortotrópica com a direção das tensões principais e da onda cisalhante polarizada. Adaptado de (HIRAO; OGI, 2017).	47
38	TOF usados na calibração do ultrassom.	50
39	Birrefringência em função da tensão agindo uniaxialmente	51
40	Razão das velocidades em função da tensão agindo uniaxialmente	52
41	Direção de polarização da onda.	53
42	Ângulo φ encontrado nas amostras G1 e G2	53
43	Tensões nas direções 1 e 2 utilizando o método de Hirao I	54
44	Tensões nas direções 1 e 2 utilizando o método de Clark após normalização	55
45	Tensões nas direções 1 e 2 utilizando o método de Hirao II após normalização	56
46	Direção das tensões principais	57
47	Espectro de amplitude do sinal recebido em função do sentido do transdutor.	58
48	Tensões ao longo da distância do centro da solda para cada linha	59

Lista de tabelas

1	Propriedades mecânicas de alguns materiais	12
2	Coefficientes de reflexibilidade e transmissibilidade nas interfaces	15
3	Coefficiente de atenuação para alguns materiais	17
4	Comparação entre os métodos de Lcr e do espectro da onda cisalhante	32
5	Composição química do material de base	35
6	Parâmetros da adição de calor	37
7	Entradas e saídas de cada método.	46
8	Resultado da calibração do ultrassom.	52
9	Ângulo φ médio encontrado nas amostras G1 e G2	53

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Símbolos

α	Coefficiente de atenuação
α_1	Primeira constante de Murnaghan
α_2	Segunda constante de Murnaghan
α_3	Terceira constante de Murnaghan
ΔT	Variação de temperatura
Δt_S	Diferença do tempo de propagação da onda cisalhante polarizadas em direções perpendiculares
λ	Primeira constante de Lamé
μ	Segunda constante de Lamé
ω	Velocidade angular
ρ	Densidade
σ	Tensão
σ_1	Tensão principal 1 considerando alinhamento entre anisotropia e direções principais
σ_2	Tensão principal 2 considerando alinhamento entre anisotropia e direções principais
σ_θ	Tensão principal na primeira direção principal
σ_{11}	Tensão normal agindo na face 1 com direção 1
σ_{22}	Tensão normal agindo na face 2 com direção 2
$\sigma_{\theta+90}$	Tensão principal na segunda direção principal
τ_{12}	Tensão cisalhante agindo na face 1 com direção 2
θ	Ângulo entre a direção de anisotropia do material e a direção das tensões principais
ν	Coefficiente de Poisson
Λ	Comprimento da onda

φ	Ângulo entre a direção de anisotropia do material e a direção preferencial de propagação da onda cisalhante
B	Birrefringência acústica
B_0	Birrefringência acústica inicial
B_φ	Birrefringência acústica calculada pelo tempo de propagação nas direções preferenciais
C_B	Constante acustoelástica de birrefringência
C_R	Constante acustoelástica da razão das velocidades
E	Módulo de Young
f	Frequência da onda
f_r	Frequência de ressonância
k	Número da onda
L_{CR}	Onda criticamente refratada
P	Pressão instantânea em um ponto
P_{wr}	Potência da onda incidente
R	Razão das velocidades
R_0	Razão das velocidades inicial
R_φ	Razão das velocidades calculada pelo tempo de propagação nas direções preferenciais
t_c	Tempo de propagação da onda compressiva
t_j	Tempo de propagação da onda cisalhante polarizada na direção j
$t_{\varphi+90}$	Tempo de propagação da onda cisalhante polarizada perpendicular à direção preferencial de propagação da onda
t_φ	Tempo de propagação da onda cisalhante polarizada na direção preferencial de propagação da onda
U	Amplitude da velocidade da partícula
V	Velocidade de fase da onda

V_C	Velocidade da onda compressiva
V_g	Velocidade de grupo da onda
V_R	Velocidade da onda de Rayleigh
V_S	Velocidade da onda cisalhante
V_{ij}	Velocidade da onda se propagando na direção i polarizada na direção j
X_R	Coefficiente de reflexibilidade
X_T	Coefficiente de transmissibilidade
z	Impedância acústica

Siglas

AWS	American Welding Society
DBCP	Distância bico de contato à peça
NDE	Nondestructive evaluation
PRF	Pulse Repetition Frequency
SPL	Mudança relativa da pressão do som
TIG	Tungsten Inert Gas
TOF	Time Of Flight - Tempo de propagação

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo geral	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
2	Referencial teórico	4
2.1	Tensões residuais	4
2.2	Soldagem	6
2.2.1	Tensões geradas pelo processo de soldagem.	7
2.2.1.1	Tensões residuais devido ao processo de contração da zona fundida	7
2.2.1.2	Tensões residuais devido às diferentes taxas de resfriamento	7
2.2.1.3	Tensões residuais devido ao processo de transformação de fase	8
2.2.2	Técnicas para medição de tensões residuais	9
2.3	Ultrassom	10
2.3.1	Velocidade de ondas unidimensionais.	10
2.3.2	Velocidade de ondas tridimensionais	11
2.3.3	Comprimento de onda, frequência e velocidade da onda	12
2.3.4	Reflexão e refração nas interfaces	13
2.3.4.1	Incidência normal	13
2.3.4.2	Incidência oblíqua	15
2.3.5	Atenuação e difração	16
2.3.6	Transdutores piezoelétricos	17
2.3.6.1	Características do transdutor	18
2.3.7	Transdutor acusto-eletromagnético (EMAT)	20
2.3.8	Tipos de inspeção	21
2.3.8.1	Inspeção pulso-eco com incidência normal	21
2.3.8.2	Inspeção <i>pitch-and-catch</i> com incidência normal	21
2.3.9	Teoria para medição de tensão através de ultrassom	21
2.3.9.1	Teoria	22
2.3.9.2	Trabalhos recentes	30

3	 Materiais e métodos	34
3.1	Material	35
3.1.1	Confecção das amostras	35
3.2	Adição de calor	36
3.2.1	Parâmetros da adição de calor	36
3.2.2	Procedimentos da adição de calor	37
3.3	Medição das tensões por ultrassom	37
3.3.1	Equipamentos usados para geração e aquisição do sinal ultras- sônico.	37
3.3.2	Suporte do transdutor ultrassônico	38
3.3.3	Transdutores	39
3.4	<i>Software</i>	40
3.5	Obtenção do sinal	40
3.5.1	Suporte do transdutor	41
3.5.2	Determinação do ângulo φ	41
3.6	Sinal de referência	43
3.7	Obtenção das constantes acustoelásticas	43
3.8	Sinal nas amostras finais	45
3.8.1	Resumo dos métodos	46
3.9	Metodologias de cálculo de tensão por ultrassom	46
3.9.1	Hirao I	47
3.9.2	Clark	48
3.9.3	Hirao II	49
4	 Resultados e discussões	50
4.1	Resultado da calibração.	50
4.1.1	Valores de referência	50
4.1.2	Constantes acustoelásticas	51
4.1.3	Desvio padrão em termos da tensão	52
4.1.4	Direção de polarização da onda cisalhante	52
4.2	Método de Hirao I.	54
4.3	Método de Clark	55
4.4	Método de Hirao II	55
4.4.1	Direção das tensões principais	56
4.4.2	Varição das tensões	57

4.5 Mesclando resultados	58
4.5.1 Análise da velocidade de avanço da fonte de calor	59
4.5.2 Análise dos métodos aplicados	59
5 Conclusão	61
5.1 Contribuições tecnológicas	62
6 Propostas para trabalhos futuros	63
A Testes de parâmetros para adição de calor	71
B Software para tratamento dos dados	72
C Propriedades mecânicas	73
D Diferença da calibração	74
E Análise do sinal de resposta	75
E.1 Sensibilidade da medição.	77

1 | Introdução

As tensões residuais, segundo (LASMIS, 2002), somam-se às tensões de trabalho e podem reduzir a resistência a trincas por corrosão, aumentar sua velocidade de propagação, reduzir a vida útil do componente ou, dependendo do sentido, melhorar tais características (PELLIZZARI; DE FLORA, 2011; LV; LEI; SUN, 2015). Sua medição pode ser feita por dois caminhos: por métodos destrutivos, que medem a deformação causada pelo alívio de tensões resultante da remoção de material, como o método de seccionamento, furo cego (que outros autores também caracterizam como semi destrutiva); ou por métodos não destrutivos (NDE - *Nondestructive evaluation*), que medem a influência da tensão em alguma outra característica. Dentre as diversas técnicas existentes, a que será utilizada neste trabalho é a técnica ultrassônica. O ultrassom se destaca por ser uma técnica que obtém a tensão média de toda a região inspecionada, é rápida e de menor custo em comparação a outras técnicas.

Todas as técnicas de medição de tensão por ultrassom se baseiam no efeito acustoelástico, sendo este a variação da velocidade de propagação da onda ultrassônica em função da tensão agindo no material (HUGHES; KELLY, 1953), seja esta aplicada ou residual. Conforme o tipo de onda, as técnicas de medição podem ser classificadas como de ondas compressivas, de ondas cisalhantes, ondas de superfície, método da onda guiada, ondas criticamente refratadas (Lcr), entre outras (HE et al., 2019). Cada uma dessas possuem equações que relacionam a tensão com algum parâmetro da onda. Esse parâmetro pode ser velocidade da onda, frequência característica, amplitude do sinal recebido.

A forma mais comum observada na literatura é a influência da tensão na velocidade da onda. Dependendo do sentido de propagação, a velocidade da onda pode ser determinada conhecendo a espessura do material trabalhado e o tempo de propagação da onda (TOF - *Time Of Flight*, como é mais conhecido na literatura). O TOF sofre influências em diferentes escalas, dependendo do tipo da onda, sua direção e, para ondas cisalhantes, sua polarização (EGLE; BRAY, 1976). Existem diversos métodos para calcular a tensão utilizando o TOF. Cada método possui considerações que facilitam o processo de cálculo, mas, teoricamente, aumentam a diferença da tensão calculada da real (HIRAO; OGI, 2017; CLARK; SCHAPS, 1998; LI et al., 2019). As considerações estão relacionadas, principalmente, ao ângulo entre a direção de anisotropia e a direção de polarização da onda que, conforme mostram (IWASHIMIZU; KUBOMURA, 1973), é alterado quando tensões fora do eixo da anisotropia agem no corpo.

Neste trabalho, três métodos utilizando ondas cisalhantes e compressivas combinadas foram utilizados a fim de se caracterizar o estado plano de tensões em chapas de aço ASTM A131. Cada método tem diferentes níveis de complexidade, que aumenta com a exatidão e a exigência por mais condições de contorno. Para calcular a tensão utilizando ultrassom,

é necessário, antes, fazer a calibração. A calibração foi feita ao verificar a influência que a tensão causa na propagação da onda. Além dessa calibração, também é necessário ter um valor de referência, obtido em uma amostra de referência, que será o estado inicial. Uma fonte de soldagem TIG foi usada para criar um gradiente de calor grande o suficiente que gerasse tensões residuais nas chapas. Um suporte foi construído para limitar a deformação das chapas devido à adição de calor. Para auxiliar nas medições, foi desenvolvido um *software* que aquisita os sinais, tratados posteriormente. Um equipamento foi construído para facilitar a obtenção dos ângulos de direção de polarização. Os métodos foram comparados entre si e com outros trabalhos relacionados.

1.1 Justificativa

O estudo de tensões residuais na indústria e na academia é de fundamental importância, uma vez que sua geração possui várias fontes e, além disso, dependendo de sua natureza e nível, pode ser fator que leve a falha prematura do material. Nesse contexto, inúmeros estudos sobre o tema são mostrados na literatura tendo a tensão residual como tópico principal ou secundário.

A fim de contribuir ainda mais com esse tema tão relevante e, a partir das dificuldades encontradas por (BARILE, 2021), o qual mediu tensões residuais em trilhos ferroviários usando a técnica ultrassônica denominada de birrefringência acústica, este trabalho propõe a medição de tensão residual em chapas submedidas a gradientes térmicos gerado por uma tocha TIG.

(BARILE, 2021), ao medir tensão residual em trilhos soldados por centelhamento utilizando a técnica de birrefringência, observou que vários fatores influenciavam nos resultados (geometria complexa, heterogeneidade do material, temperatura etc). Além disso, a técnica apresentava como resultado uma diferença de tensões, entre duas direções perpendiculares entre si, diferente de outros métodos existentes, que apresentam como resultados, tensões individuais, possibilitando uma interpretação quantitativa e direcional dos resultados.

Em vista disso, neste trabalho foi feito um levantamento de técnicas ultrassônicas que considerassem a separação de tensões residuais e aplicá-los num ambiente mais controlado, que no caso aqui, foram utilizadas chapas, cuja geometria é simples se comparada a do trilho ferroviário. Assim, foram utilizadas técnicas ultrassônicas que combinam ondas compressivas e cisalhantes.

Além disso, outra justificativa que norteia este trabalho é que o autor prima pela continuidade da pesquisa sobre o tema em questão estudado em seu trabalho de conclusão de curso de graduação, em um projeto denominado Roda-trilho pertencente a rede Cátedra, parcerias entre diversas universidades federais e a VALE/SA. O projeto Cátedra Roda-Trilho visa a melhoria da vida útil e redução de riscos da estrutura ferroviária utilizada

pela mineradora Vale. O tema, também, foi sugerido em uma das reuniões mensais que ocorreram durante a vigência do projeto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Determinar o estado plano das tensões residuais através da combinação de ondas ultrassônicas cisalhantes e compressivas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar os valores de referência para birrefringência e para a razão das velocidades das ondas cisalhantes e compressivas;
- Determinar as constantes acustoelásticas de birrefringência e das razões das velocidades das ondas cisalhantes e compressivas;
- Calcular o estado plano das tensões residuais através dos métodos Hirao I, Clark e Hirao II;
- Avaliar a aplicabilidade de cada método.

2 | Referencial teórico

2.1 Tensões residuais

Segundo (BHADESHIA, 2002) a tensão residual é consequência da interação entre o tempo, temperatura, deformação e microestrutura (Figura 1). O aquecimento e resfriamento desigual de uma peça irá causar deformações térmicas diferentes, gerando acúmulo de tensão. Um aquecimento mais lento e o uso de um material com maior condutividade térmica ajuda a reduzir esse efeito. Além disso, diversas propriedades do material são influenciadas pela temperatura, como o módulo de elasticidade, o módulo de Poisson e módulo de escoamento etc.

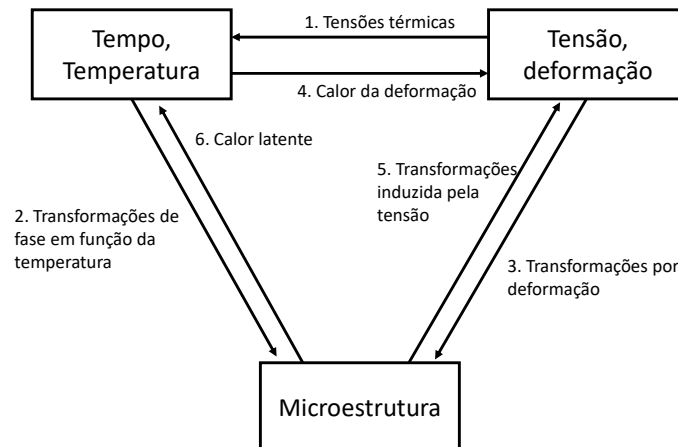


Figura 1: A interação entre temperatura, tensão e microestrutura (TOTTEN; HOWES; INOUE, 2002).

Segundo (SCHAJER; RUUD, 2013), as tensões residuais podem ser classificadas em três tipos, que diferem da escala de ação da tensão:

- Tipo I: macro-tensões que se estendem a distâncias de milímetros. Geralmente, tensões tipo I aparecem em componentes manufaturados;
- Tipo II: micro-tensões que se estendem na distância de micrômetros, como, por exemplo, entre os grãos de um metal;
- Tipo III: tensões que ocorrem na escala atômica, agindo na discordância ou na interface dos cristais.

Diversas técnicas têm o objetivo de medir as tensões de tipo I. Porém, para algumas técnicas de difração, a medição de tensões do tipo II podem ser usadas como referência

para calcular as tensões de tipo I. A Figura 2 apresenta alguns exemplos de como as tensões surgem em componentes fabricados.

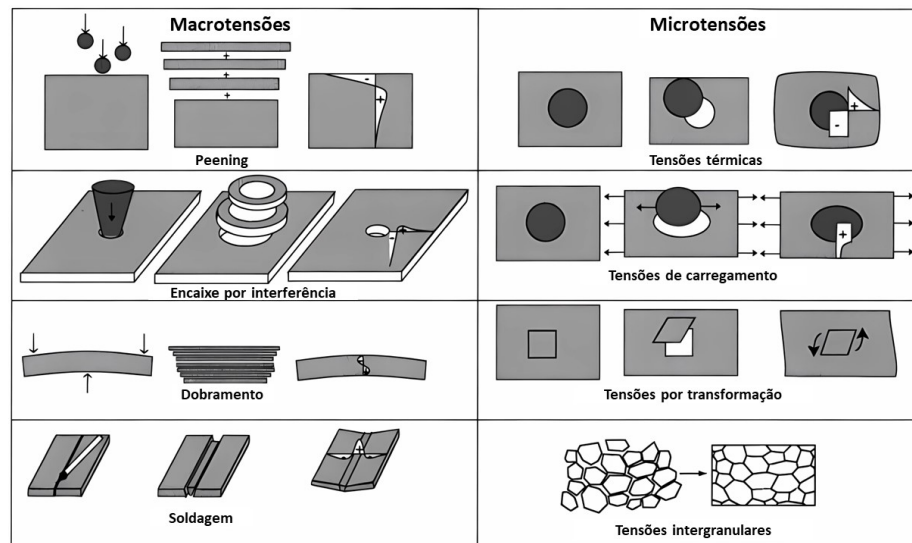


Figura 2: Exemplos das formas típicas de como surgem tensões residuais em componentes fabricados. Adaptado de (SCHAJER; RUUD, 2013).

Para aços, o resfriamento rápido da austenita (CCC — cúbico de corpo centrado) produz uma estrutura metaestável chamada martensita (TCC — tetragonal de corpo centrado), que possui altíssima dureza e maior volume, o que gera deformações e, em consequência, o acúmulo de tensões residuais (KRAUSS, 2015). A rápida expansão da transformação martensítica pode causar acúmulo de tensões compressivas na superfície do material, como já demonstrado por (EBERT, 1978). Na Figura 3, pode-se observar como a transformação altera o volume e cria tensões diferentes no interior e na superfície do material. Nesse caso, devido à diferença da quantidade de carbono, o interior se transforma antes da superfície se transformar, fazendo com que o interior acumule tensões tratativas e a superfície, tensões compressivas.

Devido à natureza de autoequilíbrio das tensões residuais, elas nem sempre são consideradas no *design* final de um produto. No entanto, as tensões residuais devem ser consideradas da mesma forma que tensões de carregamento (SCHAJER; RUUD, 2013). Dependendo do sentido das tensões, positivas ou negativas, elas podem ser tanto malélicas quanto benéficas ao material. Tensões compressivas na superfície do material são bastante desejadas, já que esse tipo de tensão impede ou diminui a nucleação e propagação de trincas. Em aços, já existem diversos tratamentos de superfície usados para aumentar a resistência da superfície a trincas, corrosão ou oxidação (PELLIZZARI; DE FLORA, 2011; SAMIH et al., 2014).

As técnicas de inserir tensões compressivas são diversas, mas podem ser divididas em dois grupos. O primeiro, é onde há o aumento da temperatura até a austenitização do aço ($\sim 730\text{ }^{\circ}\text{C}$) e resfriamento rápido. Como falado anteriormente, o resfriamento rápido causa a formação de martensita e o surgimento de tensões residuais compressivas. O

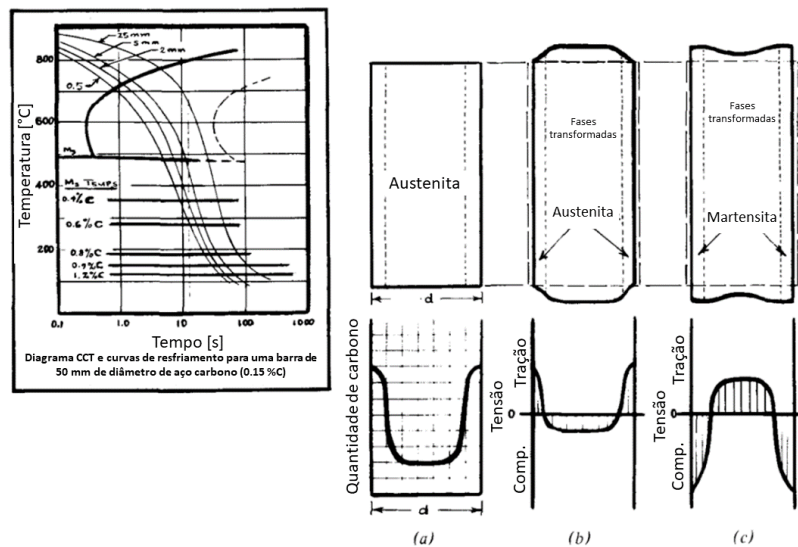


Figura 3: Demonstração esquemática de como a transformação martensítica induz tensão residual. Adaptado de (EBERT, 1978).

aquecimento pode ser feito por chama (LEE et al., 2004), por indução (SANTOS et al., 2012), ou feixe de alta energia (SAMIH et al., 2014; PELLIZZARI; DE FLORA, 2011). O segundo grupo é a inserção de tensões compressivas por deformação plástica. Ela pode ser feita através do disparo de esferas de alta dureza na superfície do material, deformando-o plasticamente. A resistência ao desgaste é aumentada de forma considerável devido ao aumento de dureza e tensões compressivas causado por este tratamento (CHANG; PYUN; AMANOV, 2017).

2.2 Soldagem

Segundo a American Welding Society — AWS, o processo de soldagem pode ser definido como:

"Um processo de união que produz a coalescência de materiais pelo seu aquecimento até a temperatura de soldagem, com ou sem a aplicação de pressão ou pela aplicação de pressão ou somente pela aplicação de pressão, e com ou sem o uso de metais de adição."

O termo soldabilidade, como definido pela Norma Alemã DIN 8528, é subdividido em "adequabilidade da solda no material", "confiabilidade da solda no design" e "viabilidade da solda na manufatura". Devido à grande concentração de calor na soldagem, deformações e tensões residuais são geradas, afetando todos os aspectos da soldabilidade (RADAJ, 1992). As tensões residuais podem causar trincas, fratura frágil e instabilidade, afetando a aplicabilidade como resultado de distorções ou empenamento e manufatura prejudicada. A confiabilidade da solda no design é avaliada principalmente pelo nível de tensões residuais, enquanto a viabilidade da solda na manufatura é avaliada pelas deformações. A

avaliação desses resultados são comparados com os valores limites de cada projeto (tolerâncias físicas e dimensionais).

2.2.1 Tensões geradas pelo processo de soldagem

Segundo (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2009), as regiões aquecidas tendem a se dilatar, porém, pela dilatação ser dificultada por peças adjacentes não aquecidas, há a ocorrência de deformações elásticas e, eventualmente, plásticas na região de solda, que possuem resistência diminuída pela temperatura. Como resultado, ao final da soldagem, tensões residuais e distorções se desenvolvem na junta. Segundo (ZINN; SCHOLTES, 2002), há três formas de como a soldagem gera tensões em uma peça: por processos de contração da zona fundida, de diferentes taxas de resfriamento e por transformação de fase.

2.2.1.1 Tensões residuais devido ao processo de contração da zona fundida

A tensão gerada por contração da zona fundida ocorre devido às regiões aquecidas e frias estarem próximas. O princípio básico é que o volume aquecido diminui durante o resfriamento de acordo com seu coeficiente de expansão térmica. No caso do cordão de solda, o processo começa em um estado livre de tensão, na poça de fusão. Tensões térmicas trativas são, então, geradas durante a solidificação da poça de fusão. Consequentemente, ao final do processo de resfriamento, tensões residuais trativas estão presentes no cordão de solda. Por motivos de equilíbrio, as tensões longitudinais mudam de sinal ao longo do comprimento da placa (Figura 4), resultando em uma distribuição não homogênea das tensões residuais longitudinais.

Devido à contração não homogênea, há a retração dificultada, gerando tensões residuais, também, na direção transversal, mesmo não havendo forças externas que impeçam a contração nessa direção. No entanto, a tensão residual na direção transversal é cerca de 1/3 da gerada na direção longitudinal. Apesar disso, essas tensões podem superar o limite de escoamento do material, principalmente em soldas com vários passes.

2.2.1.2 Tensões residuais devido às diferentes taxas de resfriamento

No caso particular de chapas grossas, podem ocorrer grandes diferenças de temperatura entre a superfície e camadas mais internas da placa durante o processo de esfriamento. O resultado são tensões térmicas residuais que podem exceder o limite de escoamento, resultando em deformações plásticas não homogêneas, causando tensões residuais após o resfriamento completo. Isso gera tensões residuais compressivas próximas à superfície do material e tensões residuais trativas no centro da chapa.

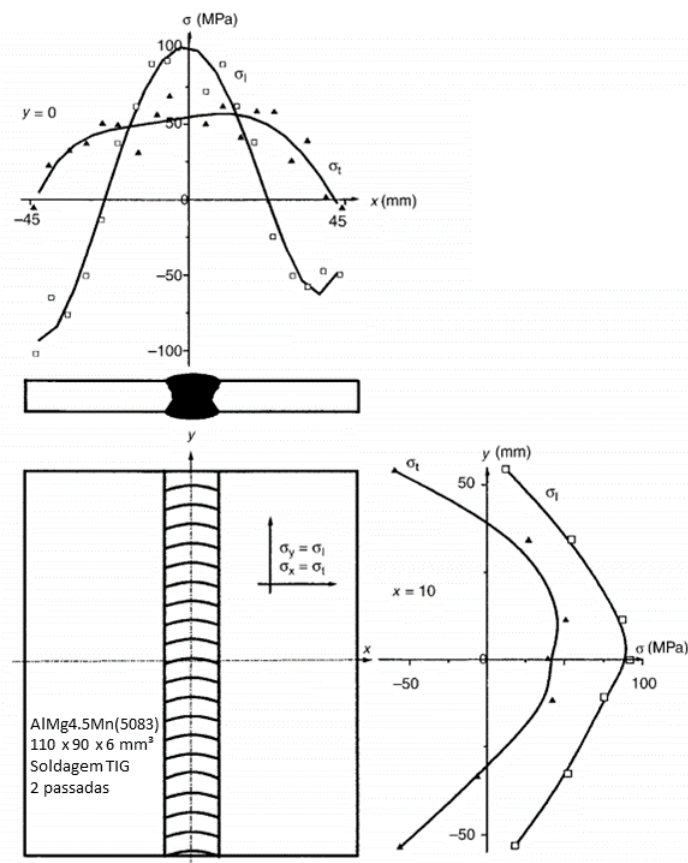


Figura 4: Distribuição das tensões residuais longitudinais e transversais a uma junta soldada com dois passes em uma placa de alumínio. TIG. Adaptado de (ZINN; SCHOLTES, 2002).

2.2.1.3 Tensões residuais devido ao processo de transformação de fase

As tensões residuais geradas por transformação de fase irão ocorrer se, durante o período do resfriamento do cordão de solda, ocorrerem, localmente, transformações de fase com mudança de volume. Transformações de fases não homogêneas -um pré-requisito para a geração de tensões residuais- podem estar ligadas a diferentes motivos, como picos de temperatura durante a soldagem, diferentes temperaturas de resfriamento ou mudanças locais de composição química.

Como já discutido anteriormente sobre o aço, a transformação de fase da austenita para outras fases cria um aumento de volume característico. Conseqüentemente, é esperado que ocorra um acúmulo de tensões residuais compressivas na região de transformação, caso as transformações aconteçam simultaneamente e haja um balanço de tensão residual trativa na vizinhança.

Na prática, isso não ocorre. Geralmente, as tensões devido à contração e de transformação de fase se sobrepõem e o módulo e sentido da tensão residual resultante dependem da variação de temperatura em que a transformação acontece. Na Figura 5, é mostrada, esquematicamente, a interação entre a tensão gerada pela contração e pela transformação de fase. Observando o gráfico da direita para a esquerda, há um aumento de tensão resi-

dual trativa devido à contração. No exemplo 1, há a transformação com menor taxa de resfriamento, que gera um aumento pequeno de volume, que cria tensões compressivas na região. Essa tensão inverte de sinal, novamente, após a contração compensar o aumento de volume.

No caso do exemplo 2 e 3, há a transformação de fase fora de equilíbrio, com maior taxa de resfriamento, com a presença de fase de maior volume, a bainita. Nesse caso, há um aumento muito maior de tensões compressivas, que, apesar de diminuírem de intensidade devido à contração, não invertem o sinal.

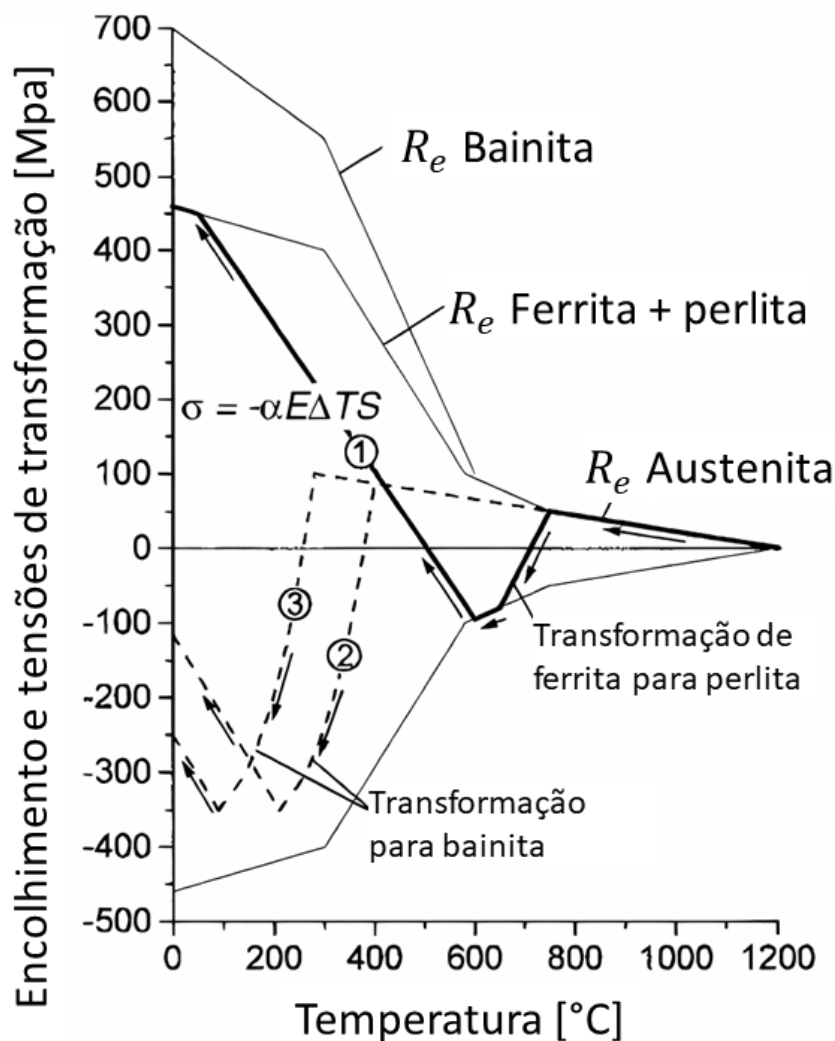


Figura 5: Interação da contração impedida e de transformação de fase em diferentes velocidades. Exemplo 1, baixa velocidade; exemplos 2 e 3, altas velocidades. Adaptado de (ZINN; SCHOLTES, 2002).

2.2.2 Técnicas para medição de tensões residuais

A medição de tensões residuais pode ser dividida em três categorias (ou duas, dependendo do autor), definidas pelo estado da peça ao final da medição. As categorias são

destrutivas, semi destrutivas e não destrutivas (NDE - *Nondestructive evaluation*). Na primeira, como diz o nome, o material precisa ser completamente destruído para se realizar a medição da tensão. Tal categoria mede a deformação causada pelo alívio das tensões ao se remover material. Com a deformação, faz-se a caracterização das tensões antes do alívio. Técnicas semi-destrutivas se aproveitam do mesmo comportamento dos materiais, porém, de forma muito mais localizada. A técnica de furo-cego realiza uma remoção de material mínima a fim de se medir micro-deformações causadas por esta (JAVADI; HASANI; SADEGHI, 2015).

Por outro lado, existem as técnicas não destrutivas. Tais técnicas medem a mudança em alguma propriedade em função da tensão. Aqui, entram as técnicas de difração de nêutrons, difração de raio-x, *synchrotron* (FARAJIAN et al., 2011), ruído de Barkhausen, ultrassom (escopo do trabalho, abordado com profundidade na seção 2.3), entre outros. Há, também, a aplicação de simulação por métodos numéricos a fim de prever o surgimento de tensões residuais. Porém, métodos numéricos necessitam de validação e nem sempre irão refletir a real condição que uma peça está submetida (MOAVENI, 2015).

2.3 Ultrassom

O ultrassom é uma onda ultrassônica acima da capacidade auditiva humana (20 kHz). Em materiais elásticos, como o aço, ela serve como ferramenta para diversos ensaios não destrutivos (NDE) como detecção de trincas, aferimento de espessura ou até na análise de tensões residuais.

Os ensaios com ultrassom que compõe inspeções de trincas, porosidade, corrosão, aferimento de espessura, tamanho de grãos etc. não serão abordados nesse referencial teórico, já que o foco deste trabalho é análise de tensão residual. Uma abordagem inicial desses ensaios estão no capítulo oito do livro *NONDESTRUCTIVE EVALUATION: A Tool in Design, Manufacturing, and Service*, por (BRAY; STANLEY, 1996).

2.3.1 Velocidade de ondas unidimensionais

Considerando que as ondas estão se propagando em apenas uma direção, as partículas podem vibrar paralela ou perpendicularmente em relação à direção de propagação, caracterizando, assim, as ondas compressivas e ondas cisalhantes, conforme mostra as Figuras 6a e 6b.

A velocidade de propagação de cada onda pode ser determinada pelas equações (2.1) e (2.2), em que V_C é a onda compressiva e V_S a onda cisalhante. Para ondas compressivas, é observada a dependência do material no módulo de elasticidade E e densidade ρ . Para ondas cisalhantes, a velocidade depende do módulo de cisalhamento μ e de ρ . Para a maioria dos materiais, $V_C \approx 1,5V_S$.

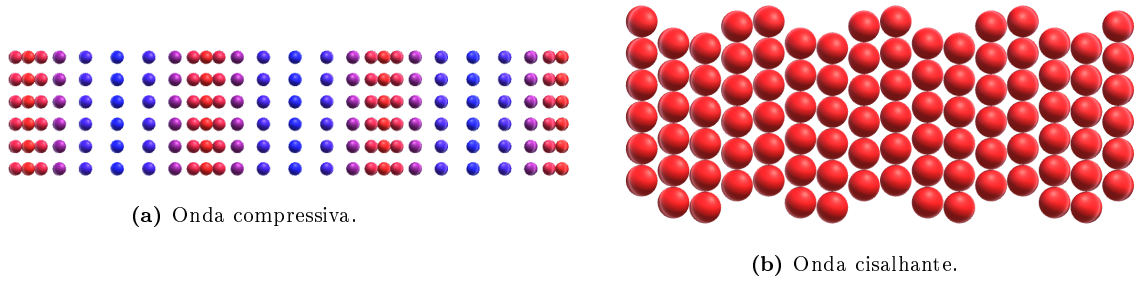


Figura 6: Formas de movimento das partículas em uma onda planar (ALBUQUERQUE, 2019).

$$V_C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

2.3.2 Velocidade de ondas tridimensionais

A abordagem feita na seção anterior é importante para o entendimento básico sobre como a onda deforma um meio elástico, porém, em NDE, a maioria dos casos utiliza ondas volumétricas, como para a avaliação de trincas (FELICE; FAN, 2018), propriedades do material e tamanho de grão (SANO et al., 2014) e, escopo desse trabalho, a medição de tensão por ultrassom (HUBEL et al., 2014). Esse tipo de propagação apresenta características descritas no campo tridimensional. Por exemplo, uma onda puramente longitudinal, em uma análise unidimensional, irá causar deformação somente na direção de propagação. No caso tridimensional, a deformação é causada, também, nas laterais, devido ao efeito de Poisson. Nesse caso, as equações (2.1) e (2.2) não podem ser mais aplicadas. Para o caso de ondas tridimensionais, a velocidade da onda compressiva pode ser determinada por:

$$V_C = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.3)$$

e a onda cisalhante pela seguinte equação:

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.4)$$

onde λ e μ são as constantes elásticas de Lamé e ρ a densidade.

As velocidades nas equações (2.3) e (2.4) são definidas em termos das constantes elásticas de Lamé. Porém, a maioria dos materiais são geralmente definidos pelo seu E e coeficiente de *Poisson* ν . A conversão entre essas constantes podem ser feitas pelas relações a seguir

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

$$\nu = \frac{\mu}{2(\mu + \lambda)} \quad (2.6)$$

Com manipulação algébrica, E e ν podem ser expressas em termos da velocidade e densidade

$$E = \frac{\rho V_S^2 [3(V_C/V_S)^2 - 4]}{(V_C/V_S)^2 - 1} \quad (2.7)$$

$$\nu = \frac{(V_C/V_S)^2 - 2}{2[(V_C/V_S)^2 - 1]} \quad (2.8)$$

Dessa forma, com as velocidades e ρ , é possível obter propriedades mecânicas do material. Outro ponto importante é observado ao se dividir as velocidades. Como pode ser observado na equação (2.9), a razão entre as velocidades dependerá somente de ν .

$$\frac{V_C}{V_S} = \left(\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu} \right)^{1/2} \equiv k \quad (2.9)$$

A tabela 1 apresenta algumas propriedades mecânicas, assim como a velocidade da onda cisalhante e compressiva nesses materiais.

Tabela 1: Propriedades mecânicas de alguns materiais (EGLE; BRAY, 1976)

Material	Módulo de Young E	λ	μ	Razão de Poisson ν	Densidade ρ	Velocidade compressiva V_C	Velocidade cisalhante V_S
	GPa	GPa	GPa		kg/m ³	m/s	m/s
Aço	200	112	81	0,3	7,8	5875–5900	3140–3230
Tungstênio	406	'	'	0,3	13,4	6386	3414
Alumínio	72	72	53	0,3	2,6-2,7	5900–6320	3130–31588
Borracha	0,1	'	'	0,499	0,85	4434	198

Fonte: (BRAY; STANLEY, 1996)

2.3.3 Comprimento de onda, frequência e velocidade da onda

A velocidade da onda e sua frequência são alguns dos parâmetros mais trabalhados na literatura quando se deseja avaliar o material, seja sua tensão (JAVADI; AKHLAGHI; NAJAFABADI, 2014), ou outras propriedades do material (SANO et al., 2014). Se for considerado que a frequência e a velocidade da onda são propriedades intrínsecas ao material, é possível realizar medições que irão mostrar a história de um componente, ou

seja, suas propriedades mecânicas, seu tratamento térmico e/ou conformações plásticas do material.

Para o melhor entendimento dessas propriedades, é possível fazer uma analogia com o sistema biela-manivela ligado a um conjunto de molas. Observe a figura 7. Ao girar à velocidade angular ω , as molas deformam um comprimento ξ com amplitude máxima A . O equacionamento desse movimento é dado por

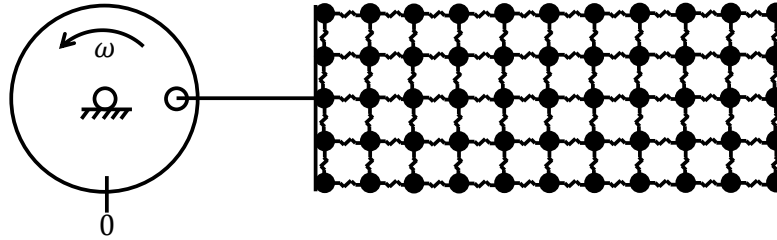


Figura 7: Excitação de ondas harmônicas em um meio contínuo (BRAY; STANLEY, 1996).

$$\xi = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (2.10)$$

sendo k o número da onda.

A velocidade angular ω , frequência f , velocidade da onda v , número da onda k e o comprimento da onda Λ estão relacionados pela equação a seguir

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi f \\ k &= 2\pi/\Lambda \\ v &= \Lambda f \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.3.4 Reflexão e refração nas interfaces

Segundo (DEMI, 2014), a impedância acústica pode ser definida como razão da pressão P exercida em uma partícula do meio pela velocidade u que a partícula ganha pela variação de pressão:

$$z = \frac{P}{u} \quad (2.12)$$

O comportamento da reflexão e refração de onda passando de um meio para o outro depende, então, da relação entre as impedâncias dos meios e da direção de incidência.

2.3.4.1 Incidência normal

Para se avaliar o comportamento da onda, primeiro se considera uma onda planar, como mostrada na figura 8. Aqui, a onda planar atravessa do material **I** para o **II**. A

frente de onda é paralela à interface, e está indicada pelo símbolo i . Ao se chocar com a interface, parte da energia é refletida de volta para o material **I** e parte é transmitida para o material **II**. A quantidade de energia transmitida e refletida depende das propriedades dos materiais.

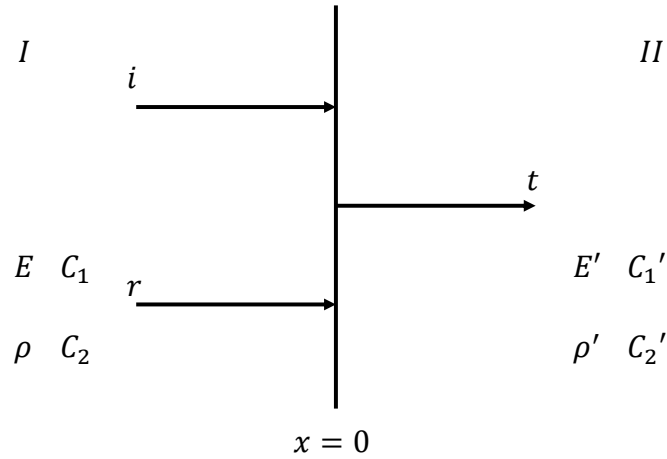


Figura 8: Reflexão e transmissão da onda na interface com incidência normal (BRAY; STANLEY, 1996).

Os subscritos i, r, t estão, respectivamente, relacionando a variável com a onda incidente, refletida e transmitida. As impedâncias acústicas dos materiais **I** e **II** podem ser definidos como

$$\begin{aligned} z_1 &= P_i/U_i \\ z_1 &= P_r/U_r \\ z_2 &= P_t/U_t \end{aligned} \quad (2.13)$$

Sendo U a amplitude da velocidade da partícula. Com manipulação algébrica, o coeficiente de reflexibilidade pode ser reescrito em termos da impedância

$$X_R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (2.14)$$

e o coeficiente de transmissibilidade

$$X_T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2z_2}{z_1 + z_2} \quad (2.15)$$

As condições extremas podem demonstrar os efeitos das equações (2.14) e (2.15). A tabela 2 apresenta a solução para essas razões quando $z_1 = z_2$, $z_1 \gg z_2$ e $z_1 \ll z_2$. Essas situações comparam a interação sem material, com um metal e com um fluido.

Para o caso sem material, não ocorre reflexão. No segundo caso, uma onda está incidindo de um material de alta impedância sobre um material de baixa impedância, refletida com inversão de fase, explicando a inversão de sinal. No último caso, observa-se um aumento da pressão da onda transmitida de um meio de baixa impedância para um meio da alta impedância.

Tabela 2: Coeficientes de reflexibilidade e transmissibilidade (razão de pressão) nas interfaces.

	$z_1 = z_2$	$z_1 \gg z_2$	$z_1 \ll z_2$
$X_R = \frac{P_r}{P_i}$	0	-1	1
$X_T = \frac{P_t}{P_i}$	1	0	2

2.3.4.2 Incidência oblíqua

A transmissibilidade e reflexibilidade de ondas em interfaces oblíquas são de considerável importância na inspeção por ultrassom. A resposta difere para ondas longitudinais e cisalhantes. Para esta, a direção de polarização também afeta a resposta.

Uma interface típica sólido/sólido é mostrada na figura 9. Aqui, uma onda longitudinal, com velocidade V_C , no material **I**, atinge a interface sob um ângulo de θ_1 . Obedecendo à Lei de Snell para um material homogêneo e isotrópico, há ondas refletidas compressivas e cisalhantes, assim como ondas transmitidas compressivas e cisalhantes. Os ângulos são mostrados na figura, e obedecem à Lei de Snell, que pode ser escrita

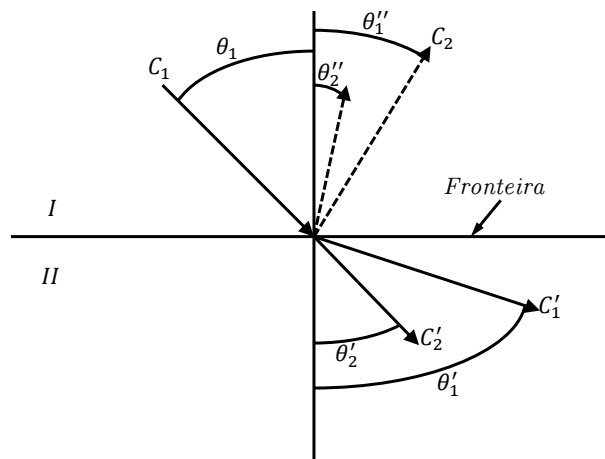


Figura 9: Reflexão e transmissão da onda na interface com incidência oblíqua. Adaptado de (BRAY; STANLEY, 1996).

$$\frac{\sin \theta_1}{V_C} = \frac{\sin \theta_2''}{V_S} = \frac{\sin \theta_1'}{V_C'} = \frac{\sin \theta_2'}{V_S'} \quad (2.16)$$

onde o símbolo ' indica a onda viajando no material **II**.

Sob incidência normal, uma onda compressiva se iniciaria no material **II** viajando à velocidade V'_C . A velocidade da onda refletida no material **I** teria a mesma velocidade que a onda incidente. Para essas condições, não há a presença de ondas cisalhantes refletidas ou refratadas. Quando o ângulo de incidência aumenta, a onda compressiva refratada com velocidade V'_C é acompanhada por uma onda cisalhante de menor velocidade V'_S , conforme a lei de Snell. A relação entre θ_C e θ'_S é determinada, respectivamente, pela velocidade da onda compressiva e cisalhante no material **II**.

Caso θ_C seja aumentado continuamente, θ'_C , eventualmente, chegará em 90° . O ângulo de incidência θ_C que resulta em $\theta'_C = 90^\circ$ é conhecido como o primeiro ângulo crítico ou ângulo crítico para ondas longitudinais, ou LCR. Nessa situação, a onda compressiva viaja logo abaixo da superfície do material.

Com o aumento posterior do ângulo, o componente da onda compressiva desaparece, permanecendo, apenas, a componente cisalhante V'_S . Um aumento de θ_C , eventualmente, resultará em $\theta'_S = 90^\circ$, o segundo ângulo crítico ou ângulo crítico da onda cisalhante. Logo após o segundo ângulo crítico, a energia ultrassônica é concentrada na superfície em forma de ondas de Rayleigh.

2.3.5 Atenuação e difração

Uma onda viajando através de um material irá perder energia por diversos motivos. Esse comportamento é observado pela perda de amplitude e mudança da sua aparência. Há três processos básicos que causam a perda de energia do pulso: a propagação; absorção; e difração do pulso. A propagação do pulso é a função da intensidade diminuindo o quadrado da distância viajada. A absorção é a conversão de energia mecânica em térmica. Este tipo de perda de energia não é considerado na inspeção de materiais.

A difração resulta da reflexão do contorno de grãos, pequenas trincas e outras inhomogeneidades do material. Por um lado, uma perda de energia severa pode tornar um material incapaz de inspeção. Por outro lado, pode ser útil quando se há a necessidade de medir o tamanho dos grãos por meios não destrutivos em metais (BADIDI BOUDA; LEBAILI; BENCHALA, 2003). A atenuação é, geralmente, expressa por

$$P = P_0 e^{-\alpha L} \quad (2.17)$$

onde P_0 é a pressão original na fonte ou em algum ponto de referência, P a pressão no segundo ponto de referência, α o coeficiente de atenuação (Neper/cm) e L a distância percorrida da fonte até o segundo ponto de referência.

A atenuação do pulso ultrassônico é, tipicamente, expressa em decibéis (dB). A mudança relativa de pressão do som (SPL) de uma onda é

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_0} dB \quad (2.18)$$

Considerando dois pontos no percurso da onda ultrassônica, a perda de pressão entre os pontos 1 e 2 é dada por

$$SPL_1 - SPL_2 = 20 \log \frac{P}{P_0} dB \quad (2.19)$$

Caso os pontos estejam separados a uma distância L e o material tenha um coeficiente de atenuação α , a equação (2.19) pode ser escrita

$$\alpha L = 20 \log \frac{P_1}{P_2} dB \quad (2.20)$$

L pode ser expressa em metro e α em dB/m.

O coeficiente de atenuação α varia consideravelmente com o material e sua manufatura. Os valores variam de menos de 10 dB/m para aços e alumínio para mais de 100 dB/m para alguns plásticos, aços fundidos, ferro, cobre, bronze. A tabela 3 mostra alguns valores de α

Tabela 3: Coeficiente de atenuação para alguns materiais. (BRAY; STANLEY, 1996)

Material	Frequência [MHz]	Modo	α [dB/m]
Aço perlítico, trilho	1	Comp.	5,3
Aço perlítico, trilho	2,25	Comp.	5,6
Aço perlítico, trilho	5	Comp.	6,1
Aço perlítico, trilho	2,25	Cisa.	8,8
Aço hiporeutetóide, normalizado	2,25	Comp.	70
Aço inoxidável, 3XX	2,25	Comp.	110
Alumínio, 6061-T6511	2,25	Comp.	90
PMMA	2,25	Comp.	380

Esses dados mostram a dependência da frequência na atenuação, assim como o tipo da onda e material. Para ondas cisalhantes, há maior atenuação quando comparado a ondas compressivas para o mesmo material e frequência. O maior valor de atenuação no aço normalizado pode ser explicado pela presença de ferrita ao redor da perlita. O trilho possui um menor valor de atenuação devido ao processo de fabricação, que causa uma quebra dos contornos de grão.

2.3.6 Transdutores piezoelétricos

Os transdutores piezoelétricos são a forma mais comum de se converter energia mecânica em pulsos elétricos e vice-versa. Eles possuem, geralmente, um disco fixo de cerâmica

piezoelétrica. No caso mostrado na Figura 10, um campo elétrico é aplicado no disco via ligações soldadas em suas faces, que causa uma mudança proporcional na dimensão do disco t para um novo valor t' . Dependendo da polaridade do campo, o disco irá se expandir ou se contrair. Um aumento da intensidade do campo irá causar uma variação maior da dimensão. Os materiais piezoelétricos também podem converter pulsos mecânicos em sinais elétricos.

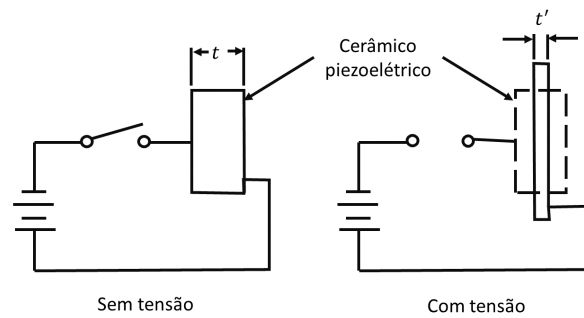


Figura 10: Efeito piezoelétrico. Adaptado de (BRAY; STANLEY, 1996).

2.3.6.1 Características do transdutor

Ter o conhecimento do tipo de pulso do transdutor é essencial para a realização de medições mais confiáveis. A largura de banda, frequência de ressonância e diâmetro do transdutor são alguns exemplos de características que devem ser avaliadas. O envelope espectral do pulso de saída de um transdutor com pulso nominal de 2,25 MHz e 19 mm de diâmetro é mostrado na Figura 11. Para esse pulso, o transdutor foi colocado diretamente em contato com uma amostra de alumínio. É possível ver que a frequência nominal é próxima a da especificada 2,25 MHz. O envelope é quase simétrico, com uma leve torção à esquerda. É importante frisar que um transdutor com frequência nominal de 2,25 MHz contém considerável energia abaixo e acima de sua frequência nominal, de 2–3,3 MHz.

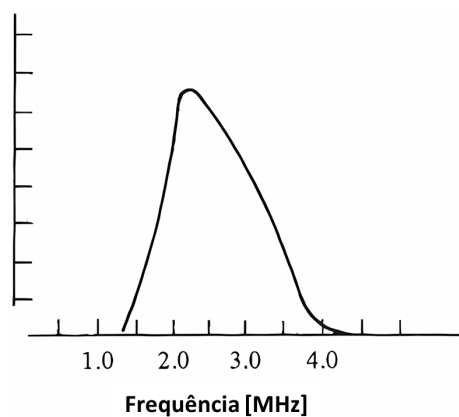


Figura 11: Espectro da frequência de um pulso de um transdutor ultrassônicos, $f_r = 2,25$ MHz, $d = 19$ mm em alumínio. Adaptado de (BRAY; STANLEY, 1996).

A largura de banda do transdutor ultrassônico é medida a partir de suas características de amortecimento. A largura de banda B pode ser definida por

$$B = f_b - f_a \quad (2.21)$$

como ilustrado pela Figura 12, onde f_a e f_b são a localização das frequências correspondente à meia potência da curva de espectro. O amortecimento interno do transdutor é uma função das características de amortecimento do material piezoelétrico assim como das reflexões ocorrendo em suas interfaces dianteiras e traseiras. A largura de banda aumenta diretamente com o amortecimento. Portanto, um transdutor com amortecimento leve terá um envelope espectral mais fino e uma menor largura de banda.

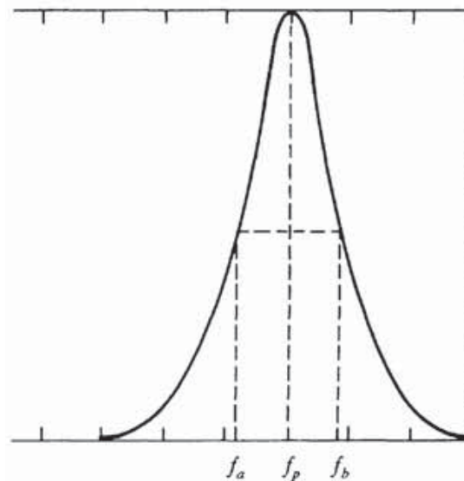


Figura 12: Curva do espectro da potência para transdutores ultrassônicos (BRAY; STANLEY, 1996).

A largura de banda é, geralmente, expressa em porcentagem, assim

$$B^* = \frac{f_b - f_a}{f_c} \times 100 \quad (2.22)$$

onde a frequência central é

$$f_c = \frac{1}{2}(f_b + f_a) \quad (2.23)$$

Uma largura de banda fina tendo um pico maior requer um afinamento rigoroso entre a indutância das bobinas e a capacitância da cerâmica a fim de se obter o melhor desempenho. Transdutores com largura de banda maiores, por outro lado, são mais planos ao redor da frequência de pico e, portanto, respondem melhor a uma maior quantidade de frequências. Um afinamento rigoroso não é necessário neste tipo de transdutor. Os dois tipos de transdutores são usados para trabalhos específicos em inspeções ultrassônicas. Maiores larguras de banda onde se tem um material com maior amortecimento, e menores larguras de banda onde se deseja maiores potências.

2.3.7 Transdutor acusto-eletromagnético (EMAT)

Os EMATs oferecem vantagens com relação aos transdutores piezoelétricos já que não precisam de um acoplante ou outro meio de contato para se fazer a inspeção. Essa característica facilita bastante a automação da inspeção de elementos lineares como tubulações, trilhos etc. EMATs também são usados para a inspeção de metais cobertos com uma camada protetiva sem perda de desempenho. Além disso, segundo (HIRAO; OGI, 2017), transdutores piezoelétricos possuem precisão menor ao se medir o tempo de propagação da onda em comparação os EMATs, além de possuírem elevada atenuação, já que a onda se propaga dentro de todo o invólucro do transdutor.

O EMAT usa o princípio de que, quando uma onda eletromagnética incide sobre um material condutor são induzidas correntes de Foucault em sua superfície. Na presença de um campo magnético e numa região onde a densidade da corrente de Foucault não desaparecem, os íons são submetidos às forças oscilatórias. Tais forças (o mecanismo de Lorentz) induzem ondas mecânicas logo abaixo da superfície do material.

A força de Lorentz é a fonte das ondas mecânicas e são excitadas por uma bobina próxima à superfície da amostra. O formato que as forças de Lorentz agem são mostrados na Figura 13, onde \bar{n} representa a normal com a superfície, \bar{H}_0 a direção da corrente na bobina. Como mostrado, a direção da força de Lorentz $\bar{n} \times \bar{H}_0$ na superfície é perpendicular à corrente e à normal.

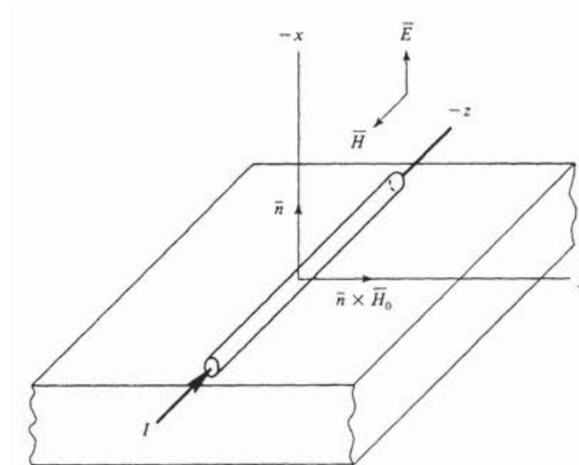


Figura 13: Força de Lorentz em um campo magnético (BRAY; STANLEY, 1996).

Ondas cisalhantes ou compressivas podem ser geradas ao aplicar um campo magnético estático (\bar{B}_0) perpendicular ou paralelo à superfície do material, como mostrado na Figura 14. Como a densidade de elétron da corrente de Foucault é orientada paralelamente à força de Lorentz, o deslocamento do íon \bar{u} , que gera as ondas mecânicas, precisa ser paralelo para ondas cisalhantes, ou perpendicular para ondas compressivas.

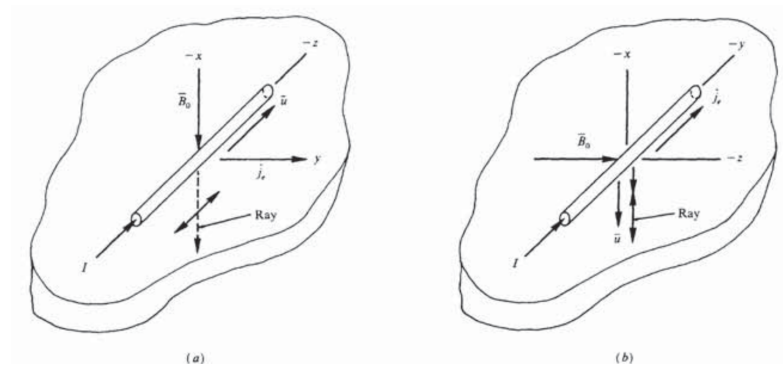


Figura 14: (a) Ondas cisalhantes em um campo magnético (b) Ondas compressivas em um campo magnético (BRAY; STANLEY, 1996).

2.3.8 Tipos de inspeção

Segundo a norma ASTM E494, que trata da medição da velocidade ultrassônica em materiais, há duas técnicas que utilizam diferentes arranjos de transdutores para essa medição: a técnica de pulso-eco; e a de *pitch-and-catch*. Ambas, definidas a seguir.

2.3.8.1 Inspeção pulso-eco com incidência normal

Esse tipo de inspeção, geralmente, trabalha somente com um transdutor, sendo que ele serve tanto como gerador da onda, como receptor. Uma onda criada por um transdutor que viaja através do material irá ser refletida ao encontrar a face oposta, caso ela não encontre nenhum outro defeito que impeça sua propagação. A reflexão causa perda de energia em função da impedância dos materiais. A onda é refletida continuamente entre as faces paralelas, perdendo um pouco de energia em cada viagem. O primeiro eco ocorre no tempo $t = 2L/V_c$, onde L é o comprimento e V_c a velocidade da onda compressiva.

2.3.8.2 Inspeção *pitch-and-catch* com incidência normal

A técnica *pitch-catch* é usada quando o material a ser inspecionado possui alta atenuação, como polímeros, compósitos, madeira ou concreto, onde há uma falha ou anomalia que impeça a reflexão. Essa técnica utiliza dois transdutores, um emissor e outro receptor, reduzindo o tempo de propagação pela metade, em comparação com pulso eco, além de permitir o posicionamento do emissor em um local com o receptor em diversos outros locais.

2.3.9 Teoria para medição de tensão através de ultrassom

A base das técnicas de medição de tensão por ultrassom é a anisotropia gerada por tensão. Isso é causado pela não linearidade da deformação e das relações constitutivas do material. O efeito acustoelástico se refere à mudança na velocidade de propagação da onda em função da deformação elástica do material.

2.3.9.1 Teoria

As ondas ultrassônicas se propagam conforme as equações (2.3) e (2.4) apenas em meio isotrópico (AKI; RICHARDS, 2002) que, segundo (SMITH, 1963), é um material livre de tensão e com orientação dos grãos aleatória. Porém, a maioria dos materiais usados na engenharia dificilmente possuem essas características. Conforme o aumento da acurácia dos resultados da determinação da velocidade iria aumentando, a teoria clássica já não servia para definir o movimento das ondas. Portanto, fez-se necessário a introdução de termos de maior ordem para prever os efeitos.

(HUGHES; KELLY, 1953) derivaram as expressões da velocidade de ondas elásticas em um sólido isotrópico tensionado uniaxialmente usando a teoria de Murnaghan de deformações finitas (MURNAGHAN, 1937) e termos da terceira ordem na expressão deformação-energia. Foi mostrado que as velocidades de ondas planas propagando na direção **1** e tendo o deslocamento da partícula nas direções **1**, **2** e **3** em um corpo inicialmente isotrópico submetido a tensões triaxiais são

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad (2.24a)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (2.24b)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (2.24c)$$

Onde ρ_0 é a densidade inicial (sem deformação), V_{11} , V_{12} , V_{13} são as velocidades da onda se propagando na direção **1** com o movimento das partículas na direção **1**, **2** e **3**, respectivamente. λ e μ são as constantes elásticas de segunda ordem de Lamé. l , m , n são as constantes elásticas de terceira ordem de Murnaghan. α_1 , α_2 e α_3 são os componentes de deformação triaxial homogênea na direção **1**, **2** e **3** e $\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$.

Sete expressões são derivadas a partir das equações (2.24), com o intuito de definir a velocidade da onda para tensões hidrostáticas e axiais, sendo o terceiro subscrito indicando o tipo de tensão: 0 para hidrostático e x , y e z para tensões compressivas nas direções \mathbf{x} , \mathbf{y} e \mathbf{z} . Sendo $K_0 = \lambda + \frac{2}{3}\mu$, T a tensão compressiva e P a pressão hidrostática, as velocidades são

$$\rho_0 V_{110}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{P}{3K_0} [6l + 4m + 7\lambda + 10\mu] \quad (2.25a)$$

$$\rho_0 V_{120}^2 = \mu - \frac{P}{3K_0} \left[3m - \frac{1}{2}n + 3\lambda + 6\mu \right] \quad (2.25b)$$

$$\rho_0 V_{11x}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{T}{3K_0} \left[2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right] \quad (2.25c)$$

$$\rho_0 V_{12x}^2 = \mu - \frac{T}{3K_0} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu \right] \quad (2.25d)$$

$$\rho_0 V_{11y}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{T}{3K_0} \left[2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right] \quad (2.25e)$$

$$\rho_0 V_{12y}^2 = \mu - \frac{T}{3K_0} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right] \quad (2.25f)$$

$$\rho_0 V_{12z}^2 = \mu - \frac{T}{3K_0} \left[m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right] \quad (2.25g)$$

$$(2.25h)$$

O estudo de Hughes Kelly se tornou a base para o surgimento de diversos trabalhos como uma técnica não destrutiva para análise de tensão. (BERGMAN; SHAHBENDER, 1958) investigaram a mudança da velocidade da onda compressiva e cisalhante se propagando normal à direção de carregamento em uma barra de alumínio. Foi observado que, para a equação da onda se propagando em um meio elástico homogêneo $v = [C/\rho]^{\frac{1}{2}}$, a onda compressiva varia apenas em função da densidade (coeficiente de Poisson), enquanto a onda cisalhante varia com a densidade e com a constante elástica.

(BENSON; RAELSON, 1959) propuseram a aplicação da birrefringência acústica de duas ondas cisalhantes polarizadas para a análise de tensão. A birrefringência é definida pela polarização da onda cisalhante em duas direções ortogonais em função da anisotropia do material. Porém, não é apenas a tensão que causa a anisotropia. O alinhamento não aleatório dos grãos (textura) gera um efeito semelhante à tensão no material. A birrefringência, em um sólido inicialmente isotrópico e homogêneo, pode ser definida como:

$$B = B_0 + C_B(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.26)$$

Em que

$$B = 2 \frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} \quad (2.27)$$

E

$$C_B = \frac{4\mu + n}{8\mu^2} \quad (2.28)$$

(CRECRAFT, 1967) observou a relação linear existente entre a velocidade definida pela equação (2.25) e a tensão agindo sobre aço níquel. É salientado, também, um problema para medição de tensões residuais. Um valor de textura de apenas 0,1% resultante de processos de conformação plástica causa anisotropia no mesmo nível que causada por 50 MPa de tensão aplicada sobre o material. O mesmo autor tentou usar a birrefringência acústica (equação (2.26)) para medir a tensão residual no mesmo material submetido a deformação plástica causada por dobramento. Ele observou que a barra não era mais isotrópica, mas possuía uma anisotropia inicial, causada pelo alinhamento dos grãos. Ele mediu a birrefringência inicial, antes do dobramento, detectando, também, a anisotropia. A birrefringência após o dobramento foi subtraída da birrefringência inicial, em uma tentativa de compensar a anisotropia inicial. Porém, o resultado não foi satisfatório. Esse problema ocorreu devido às medições de birrefringência final terem sido feitas em um material deformado plasticamente.

(EGLE; BRAY, 1976) estudaram a medição das constantes de terceira ordem em aço de trilhos ferroviários. Foram derivadas equações a partir do trabalho de Hughes e Kelly com o intuito de se medir a mudança relativa da velocidade, como mostradas nas equações (2.29), onde o 0 sobrescrito em V significa a velocidade medida na ausência de tensão. A Figura 15 mostra a mudança relativa da velocidade em função da deformação do material. A V_{11} é a velocidade de uma onda compressiva se propagando na direção da tensão e a V_{23} a velocidade da onda cisalhante se propagando normal à aplicação da tensão e com vibração polarizada perpendicularmente a esta. É importante notar que V_{11} possui maior variação que V_{23} , mostrando maior sensibilidade da onda compressiva em relação à onda cisalhante em função da tensão.

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_{11}/V_{11}^0}{d\varepsilon} &= 2 + \frac{\mu + 2m + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \\
 \frac{dV_{12}/V_{12}^0}{d\varepsilon} &= 2 + \frac{\nu n}{4\mu} + \frac{m}{2(\lambda + \mu)} = L_{12} \\
 \frac{dV_{22}/V_{22}^0}{d\varepsilon} &= -2\nu \left[1 + \frac{m - \mu l/\lambda}{\lambda + 2\mu} \right] = L_{22} \\
 \frac{dV_{21}/V_{21}^0}{d\varepsilon} &= \frac{\lambda + 2\mu + m}{2(\lambda + \mu)} + \frac{\nu n}{4\mu} = L_{21} \\
 \frac{dV_{23}/V_{23}^0}{d\varepsilon} &= \frac{m - 2\lambda}{2(\lambda + \mu)} - \frac{n}{4\mu} = L_{23}
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

(HSU, 1974) usou a técnica de birrefringência para medir a tensão cisalhante principal em um ensaio de compressão diametral. A birrefringência foi medida ao longo do diâmetro, ortogonal à aplicação da carga. Ao subtrair da birrefringência inicial, foi observada boa relação com a teoria. Observa-se, nos trabalhos de Egle & Bray e de Hsu, que a birrefringência inicial B_0 deve ser subtraída da birrefringência final B , com aplicação da

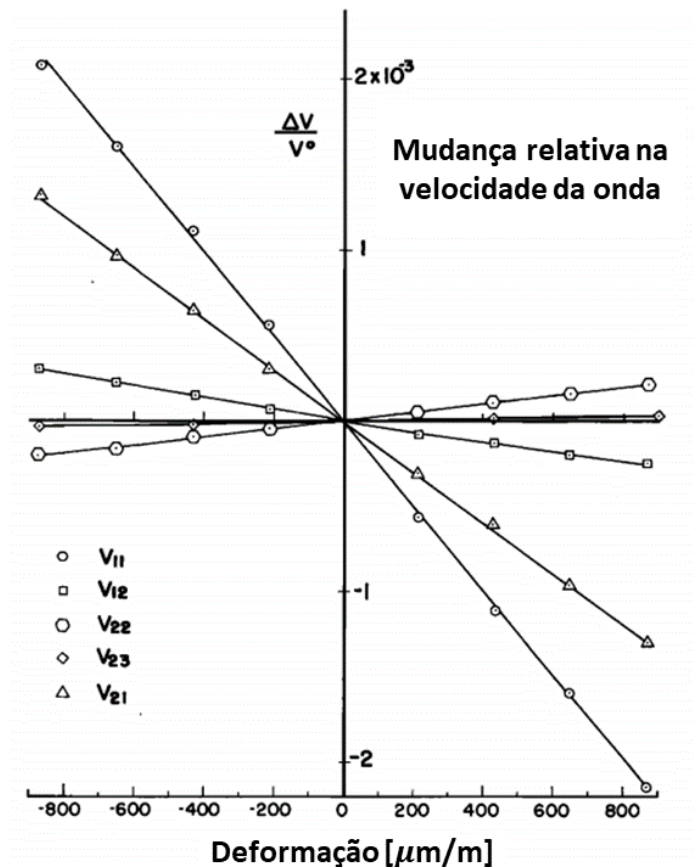


Figura 15: Mudança relativa da velocidade da onda em função da deformação. Adaptado de (EGLE; BRAY, 1976).

carga. Esse método funciona bem considerando tensões uniaxiais ou localmente biaxiais, paralelas e perpendiculares à direção de laminação.

(CLARK; MIGNOGNA, 1983) fazem a comparação de duas teorias, a de (IWASHIMIZU; KUBOMURA, 1973) e a de (OKADA, 1980), que verificam a influência da anisotropia inicial na birrefringência acústica. A teoria de Iwashimizu e Kubomura trata o material ortotrópico na constante elástica de segunda ordem, mas é ignorado na terceira ordem. Okada, por outro lado, assumiu que existe uma matriz de índice de refração no sólido, semelhante à luz, e que os componentes dessa matriz são funções lineares da tensão. Em ambas, a solução para materiais isotrópicos se reduzem à equação (2.26), com $B_0 = 0$. Foi observado que, em ambas as teorias, os resultados foram bastante satisfatórios.

Além disso, foi verificada, também, a influência da tensão na direção de polarização da onda, conforme mostrada na Figura 16. (CLARK; MIGNOGNA, 1983) mostram que a solução de Okada (ver equação (2.30)) se iguala à equação de Iwashimizu e Kubomura, caso $m_1 = 0$ e $m_2 = m_3$ (material isotrópico $B_0 = 0$). Portanto, o ângulo φ entre a direção de ortotropia e a direção de polarização pode ser determinada por

$$\tan 2\varphi = \frac{m_3(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta}{B_0 + m_1(\sigma_1 + \sigma_2) + m_2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta} \quad (2.30)$$

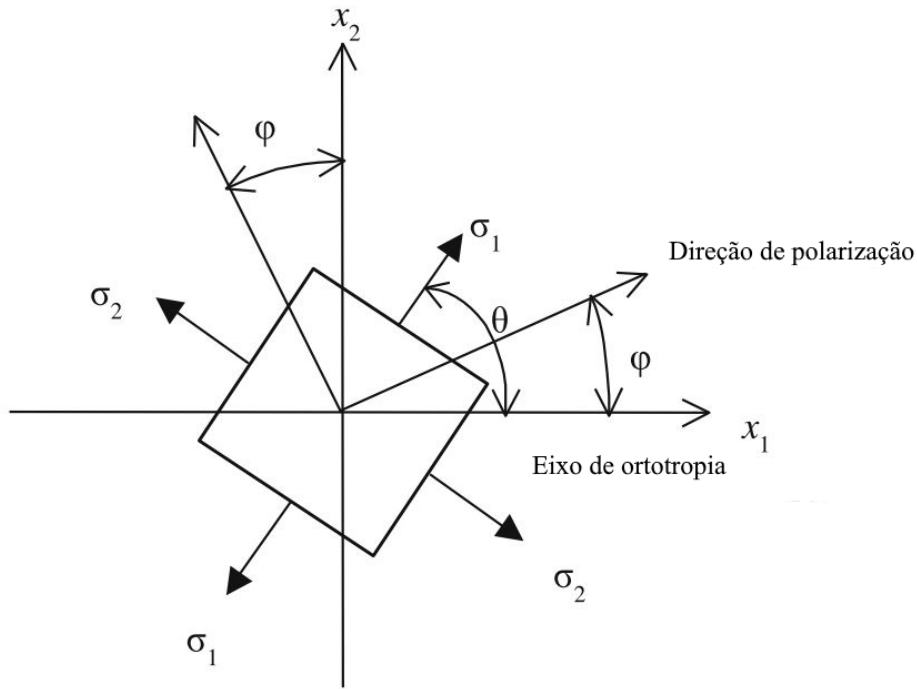


Figura 16: Sistema bidimensional mostrando ao longo dos eixos a textura ortorrópica com a direção das direções principais e da onda cisalhante polarizada. Adaptado de (HIRAO; OGI, 2017).

sendo

$$m_1 = \frac{1}{2} \bar{v}_0 (\alpha_{11} - \alpha_{22}) \quad (2.31a)$$

$$m_2 = \frac{1}{2} \bar{v}_0 (\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12}) \quad (2.31b)$$

$$m_3 = \frac{1}{2} \bar{v}_0 \alpha_{66} \quad (2.31c)$$

$$B_0 = \bar{v}_0 |1/v_{x0} - 1/v_{y0}| \quad (2.32)$$

E

$$B = \sqrt{[B_0 + m_1(\sigma_1 + \sigma_2) + m_2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta]^2 + [m_3(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta]^2} \quad (2.33)$$

Sendo \bar{v}_0 a média das velocidades v_{x0} e v_{y0} . Para materiais isotrópicos, a equação é simplificada para a equação (2.26), com $\varphi = \theta$ e $B_0 = 0$. No caso de tensão uniaxial $\sigma_1 = \sigma$ e $\sigma_2 = 0$. Com as equações (2.32) e (2.30), temos que, para o $\theta = 0^\circ$:

$$B = |B_0 + (m_1 + m_2)\sigma|, \quad \tan 2\varphi = 0 \quad (2.34)$$

Para $\theta = 90^\circ$:

$$B = |B_0 + (m_1 - m_2)\sigma|, \quad \tan 2\varphi = 0 \quad (2.35)$$

E para $\theta = 45^\circ$:

$$B = \sqrt{(B_0 + m_1\sigma)^2 + (m_3\sigma)^2}, \quad \tan 2\varphi = \frac{m_3\sigma}{B_0 + m_1\sigma} \quad (2.36)$$

As equações (2.34), (2.35), (2.36) servem para determinar m_1 , m_2 e m_3 . (IMANISHI; SASABE; IWASHIMIZU, 1982) validam, experimentalmente, as equações de Iwashimizu e Kubomura em chapas de aço e alumínio. Seu trabalho confirma a existência de uma leve ortotropia em chapas metálicas. (SAYERS; ALLEN, 1984) verificaram a influência da tensão na direção de propagação de forma experimental. Foi observada boa correlação entre a equação (2.30) e os resultados, conforme mostrada na Figura 17.

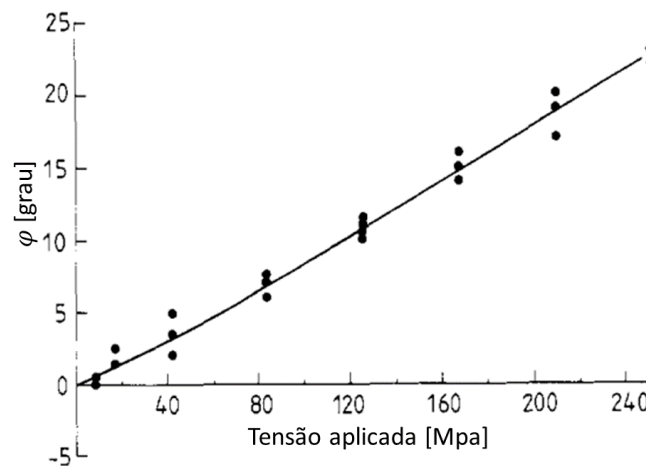


Figura 17: Ângulo de rotação do eixo principal de propagação em função da tensão aplicada. Adaptado de (SAYERS; ALLEN, 1984).

(ALLEN; SAYERS, 1984) utilizaram ondas cisalhantes e compressivas combinadas para diminuir o efeito da variação da microestrutura e composição química na medição da tensão residual uniaxial em diversas chapas de aço, escolhidas aleatoriamente. Foram encontrados resultados bastante satisfatórios, com a comprovação de que as chapas possuem dois tipos de textura que, segundo o autor, são consequência da temperatura em que as chapas foram produzidas. As chapas laminadas a temperaturas abaixo da temperatura de austenitização (727°C) possuem, claramente, uma direção preferencial de alinhamento dos grãos. Já em chapas laminadas à quente (acima da temperatura de austenitização), possuem um alinhamento mais aleatório.

Hirao et al. realizaram diversos trabalhos com aplicação industrial a partir da década de 90 (HIRAO; FUKUOKA; MURAKAMI, 1992; HIRAO, Masahiko; OGI; FUKUOKA, 1993; HIRAO; OGI; FUKUOKA, 1994). Por ordem cronológica, o primeiro artigo (HIRAO; FUKUOKA; MURAKAMI, 1992) realiza a aplicação do método de ressonância

para medição de tensões residuais em chapas finas. Devido à espessura da chapa, há a sobreposição de vários ecos subsequentes, diminuindo a acurácia da medição. Foi construído um equipamento capaz de realizar as medições. Ao invés da medição da velocidade da onda, foi feita a medição da frequência de ressonância. A equação (2.27) foi reescrita para

$$B = -2 \frac{F(f_1) - F(f_2)}{F(f_1) + F(f_2)} \quad (2.37)$$

Sendo

$$F(f) = \frac{f}{(n - 1/2)\pi + \tan^{-1}[(Z_s/Z_t) \cot(\pi f t_T)]} \quad (2.38)$$

E Z_s e Z_t a impedância acústica da amostra medida e do transdutor, respectivamente. t_T o tempo de propagação da onda no transdutor, n o número da ressonância e f_1 e f_2 a frequência de oscilação da onda polarizada nas direções das tensões principais. Em comparação com outros métodos, o erro obtido por essa técnica foi de $\pm 10 - 15 \text{ MPa}$.

O uso de transdutores eletromagnéticos (EMAT) também foi bastante trabalhado por Hirao. A aplicação deles em chapas de aço (HIRAO, Masahiko; OGI; FUKUOKA, 1993) foi estudada. Com um erro estimado de 2,7 MPa, o uso de EMAT se mostrou bastante promissor. Diferente de trabalhos anteriores, o autor avaliou as tensões principais de forma individual, com a inserção de um termo: a razão das velocidades (R). A equação (2.39) mostra a relação de R com as tensões principais (FUKUOKA et al., 1985).

$$R = R_0 + C_R(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.39)$$

Onde C_R é outra constante acustoelástica. R pode ser calculada em termos da velocidade de propagação e da frequência, assim como a birrefringência, mostrada na equação (2.40)

$$R = 2 \frac{V_C}{V_1 + V_2} = 2 \frac{n}{m} \frac{F(f_3)}{F(f_1) + F(f_2)} \quad (2.40)$$

Sendo n e m a N -ésima e a M -ésima frequência de ressonância para as ondas cisalhantes e para onda compressiva. A medição em maiores modos de ressonância aumentam a sensibilidade à tensão e diminuem a difração por artefatos. A Figura 18 mostra os resultados obtidos em comparação com a solução analítica (solução de Howland). Observa-se resultados muito satisfatórios, com uma flutuação de 5 MPa da teoria.

(CLARK; SCHAPS, 1998) realizaram experimentos semelhantes ao Hirao. Uma chapa de alumínio com encaixe por interferência foi usada como amostra. A chapa possui as tensões bem caracterizadas pela teoria da elasticidade. Uma variação da equação (2.26) foi usada, agora, com a birrefringência sendo, também, uma função do ângulo da direção da polarização das ondas no material com e sem tensão, mostrada na equação (2.41).

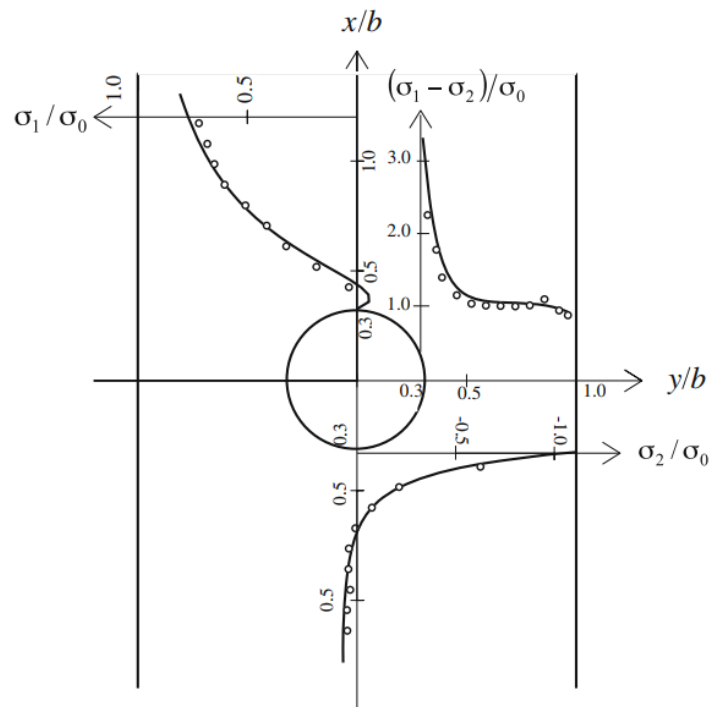


Figura 18: Tensão obtida ao longo dos eixos x e y em um furo central na chapa. A solução de Howland é mostrada na linha contínua. As tensões foram escaladas com $\sigma_0 = 53,5 \text{ MPa}$. (HIRAO, Masahiko; OGI; FUKUOKA, 1993).

Essa aplicação conseguiu atingir resultados bastante satisfatórios em comparação com a teoria.

$$B = \frac{B_0 + C_B(\sigma_1 - \sigma_2)}{\cos 2\varphi} \quad (2.41)$$

A medição de tensão em trilhos ferroviários por birrefringência também foi estudada por (HIRAO; OGI; FUKUOKA, 1994). Foi observada grande variação do B_0 ao longo da amostra. No pior caso, segundo o autor, o valor de B_0 deve ser medido de ponto em ponto, antes da geração da tensão, a fim de se calcular a tensão por uma referência local.

(PALANICHAMY et al., 1995) estudaram a capacidade das ondas ultrassônicas em medir o tamanho de grão em aço inox austenítico AISI 316 através da variação da velocidade da onda. Foi mostrado que ondas cisalhantes são mais sensíveis ao tamanho de grão que ondas compressivas. (DUQUENNOY et al., 1999) avaliaram a influência do coeficiente acustoelástico em amostras de alumínio aeronáutico considerando estado inicial e natural na avaliação de tensões residuais. Seu trabalho mostrou que as constantes acustoelásticas podem variar em até 50% dependendo de qual coordenada de referência foi escolhida. Segundo os autores, a escolha de coordenadas naturais podem levar a medições de tensões residuais erradas.

(BITTENCOURT et al., 2000) apresentam uma forma de se medir o tempo de propagação da onda através da manipulação dos sinais utilizando a interpolação seguida de correlação cruzada. Tal método consegue diminuir o erro da medição do tempo para 2 ns,

o suficiente para medir as tensões com segurança.

2.3.9.2 Trabalhos recentes

Desse ponto em diante, serão apresentados trabalhos que foram produzidos de 2010 a 2023, e então, relacionar com alguns resultados obtidos em trabalhos mais clássicos da literatura. Vale frisar que o objetivo dessa seção é apresentar trabalhos que estudam o efeito acustoelástico em materiais metálicos. Buscou-se, também, trazer trabalhos que estão mais direcionados a aplicações práticas. A maioria dos estudos nessa área ainda estão no campo teórico.

Javadi et al. publicaram diversos trabalhos (JAVADI; AFZALI et al., 2013; JAVADI; AKHLAGHI; NAJAFABADI, 2014; JAVADI; HASANI; SADEGHI, 2015; JAVADI; AZARI et al., 2017) onde se discutiram várias aplicações do Lcr em comparação com outras técnicas. Em todos os trabalhos citados, é feita a validação da técnica por elementos finitos e furo cego. Das referências mais importantes para este trabalho, temos dois mais importantes. O primeiro é (JAVADI; HASANI; SADEGHI, 2015), que estudam o efeito de um suporte na permanência da tensão residual após soldagem. Como mostrado na Figura 19, a presença do suporte impede com que haja deformação, elevando os níveis das tensões para muito além da proximidade da solda. O segundo é a comparação do Lcr com ondas cisalhantes (JAVADI; AZARI et al., 2017). Apesar de a comparação direta não ter sido feita, mostrou-se que a repetibilidade, sensibilidade e ruído tem melhores características na aplicação do Lcr que as ondas cisalhantes, sendo mais sensível à textura, microestrutura e efeitos do ambiente, agregando ao que já foi observado por (EGLE; BRAY, 1976). Porém, como discutido posteriormente, novas técnicas tendem a inverter essa situação.

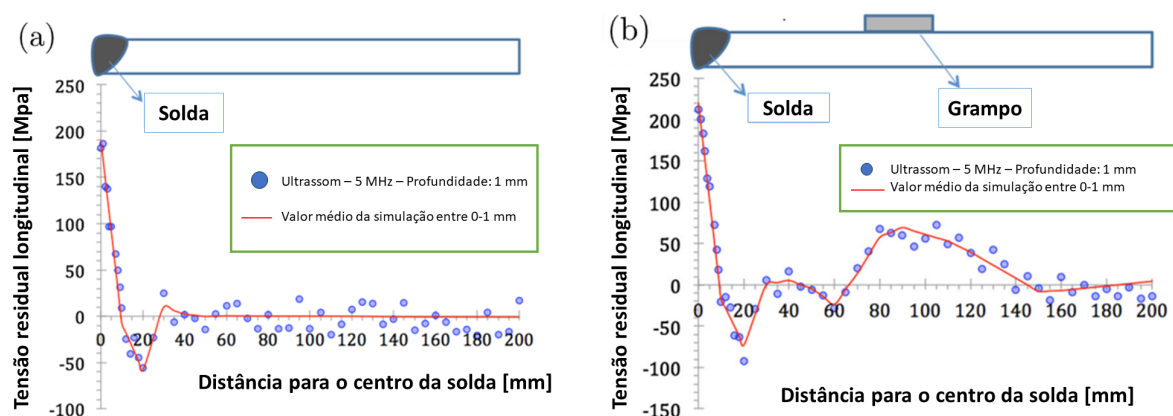


Figura 19: Comparação das tensões residuais (a) sem suporte (b) com suporte. Adaptado de (JAVADI; HASANI; SADEGHI, 2015).

A maior dificuldade da aplicação do ultrassom como um método padrão para medição de tensão é a sua sensibilidade a diversos fatores, como tamanho de grão (PALANICHAMY et al., 1995), textura do material (ALLEN; SAYERS, 1984) e condições de

acoplamento. (LI et al., 2019) derivaram equações a partir da teoria da acustoelasticidade e da birrefringência para a medição de tensões uniaxiais. O parâmetro mais importante analisado em seu trabalho foi o fator de interferência. O método, chamado análise espectral da onda cisalhante, possui ótima correlação ($R^2 > 0,99$) entre o valor da tensão e a frequência medida. A equação (2.42) foi proposta.

$$\sigma = \frac{\kappa}{f_1^*} - \gamma \quad (2.42)$$

sendo

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{1}{4t_0} \cdot \frac{-8\mu^2}{4\mu + n} \\ \gamma &= \frac{-8\mu^2}{4\mu + n} \alpha \end{aligned}$$

sendo α a anisotropia inicial, e t_0 é o tempo de propagação da onda em um corpo livre de tensão. (HE et al., 2019) comparam o método de ondas criticamente refratadas (Lcr) e o de análise espectral. Foi montado uma tabela que compara qualitativa e quantitativamente os dois métodos. Nessa tabela, os princípios de medição são a base física que o método se baseia. Os parâmetros calibrados estão relacionados com as constantes elásticas de segunda e terceira ordem do material. A sensibilidade apresenta a mudança do parâmetro físico que se altera pelo acréscimo da tensão. A área medida é a região em que o ultrassom atravessa. A acurácia descreve o grau de incerteza da medição de tensão em relação à tensão real. A repetibilidade é a capacidade de cada método repetir os valores de tensão sob a mesma condição de medição. O ruído se baseia na quantidade de amostragem necessária para a realização do ensaio. Para o Lcr, o fator de tensão em função do tempo é 5,7 MPa*ns, implicando a necessidade de ter altíssima amostragem para medições seguras.

O trabalho mostrou que, apesar do Lcr apresentar maior sensibilidade à tensão, como já visto na literatura (JAVADI; AZARI et al., 2017), o método de análise espectral mostrou-se mais preciso e exato ao medir tensões uniaxiais. Segundo os autores, isso acontece devido ao Lcr medir a tensão média ao longo do comprimento, que reflete informações erradas na região de maior concentração da tensão. A comparação com extensometria foi em relação aos métodos é mostrado na Figura 20.

(WANG et al., 2022) trabalharam em cima do trabalho de He para desenvolver um método que mede o estado plano de tensões em materiais levemente ortotrópicos. Uma diferença relativa de $\pm 20\%$ foi observada em comparação com extensometria. Os autores levantaram duas teorias para tal diferença. A primeira é que o ultrassom mede a tensão

Tabela 4: Comparação entre os métodos de Lcr e do espectro da onda cisalhante. Adaptado de (HE et al., 2019)

Categoria		Método Lcr	Método de análise espectral
Princípios	Teorias	A teoria da acustoelasticidade.	A teoria da acustoelasticidade e birrefringência.
	Sinais medidos	Onda Lcr no domínio do tempo.	Onda cisalhante no domínio do espectro.
	Parâmetros medidos	Lcr TOF.	A frequência característica.
Parâmetros calibrados	Amostras calibradas	Mesmo material da amostra a ser testada.	Mesmo material e espessura da amostra a ser testada.
Sensibilidade	Resultados	100 MPa = 17,5 ns	100 MPa = 0,543 MHz
	Dificuldade do teste	Difícil para se medir.	Relativamente fácil.
Área medida	Posição da tensão	Paralela à propagação do Lcr.	Perpendicular à propagação da onda cisalhante.
	Tipo de tensão	Tensão média uniaxial.	Tensão média uniaxial.
Acurácia	Resultados	Consistente com os valores reais.	Menos consistentes na área de concentração de tensão.
	Erro máximo	±47,9 MPa	±12,5 MPa
Repetibilidade	Desvio padrão médio	$t_{Lj0}=0,04\%$	$\gamma=0,90\%$
	Tensão correspondente	±33,5 MPa	±10,5 MPa
Ruído	Taxa de amostragem	2,5 GSa/s	100 MSa/s
	Remoção de ruído	Necessário.	Não necessário.

média de toda a espessura do material e o extensômetro apenas da superfície. A segunda é que a variação da espessura devido à compressão é quase na ordem do efeito acustoelástico, afetando a acurácia dos resultados.

Uma observação que pode ser feita desses trabalhos é que a presença de artigos que tem a técnica como principal objetivo do trabalho está se tornando bem menor. A Figura 21 apresenta um grafo organizando artigos que estudam ultrassom e tensões residuais. O grafo foi criado através da ferramenta *connected papers*, que agrupa artigos relacionados ao se selecionar um artigo inicial.

Ao escolher o trabalho de Wang como o início, o grafo criado apresenta três grupos. O grupo C apresenta estudos que mostram as consequências das tensões residuais em materiais sob serviço, assim como sua medição. O grupo B e A são os grupos que desenvolvem técnicas de medição com ultrassom, assim como o efeito acustoelástico. Porém, o grupo B foca em estudos com ondas próximo à superfície, como o Lcr. O grupo A foca em técnicas que avaliam todo o volume do material, com o foco em ondas cisalhantes e birrefringência, tornando este o grupo mais importante para este trabalho. É possível notar que a maioria dos artigos deste grupo datam de 1980-2000, sendo as exceções o trabalho de (LI et al., 2019), já discutido anteriormente, e o trabalho de (MORA; SPIES, 2019), que estudou os efeitos de um meio heterogêneo no efeito acustoelástico.

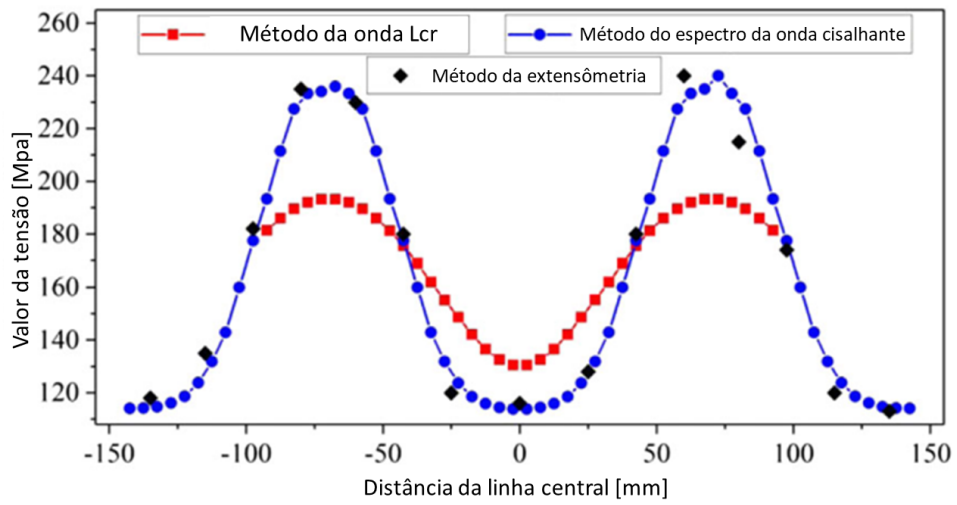


Figura 20: Comparativo do método de extensometria, Lcr e análise espectral. Adaptado de (HE et al., 2019).

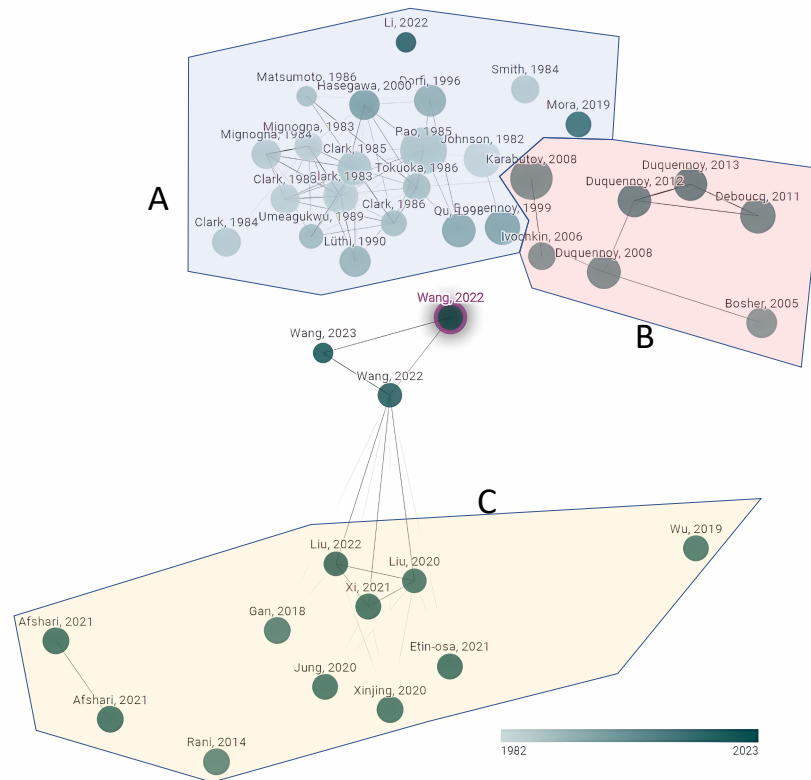


Figura 21: Grafo com o ano de publicação de trabalhos com ultrassom.

3 | Materiais e métodos

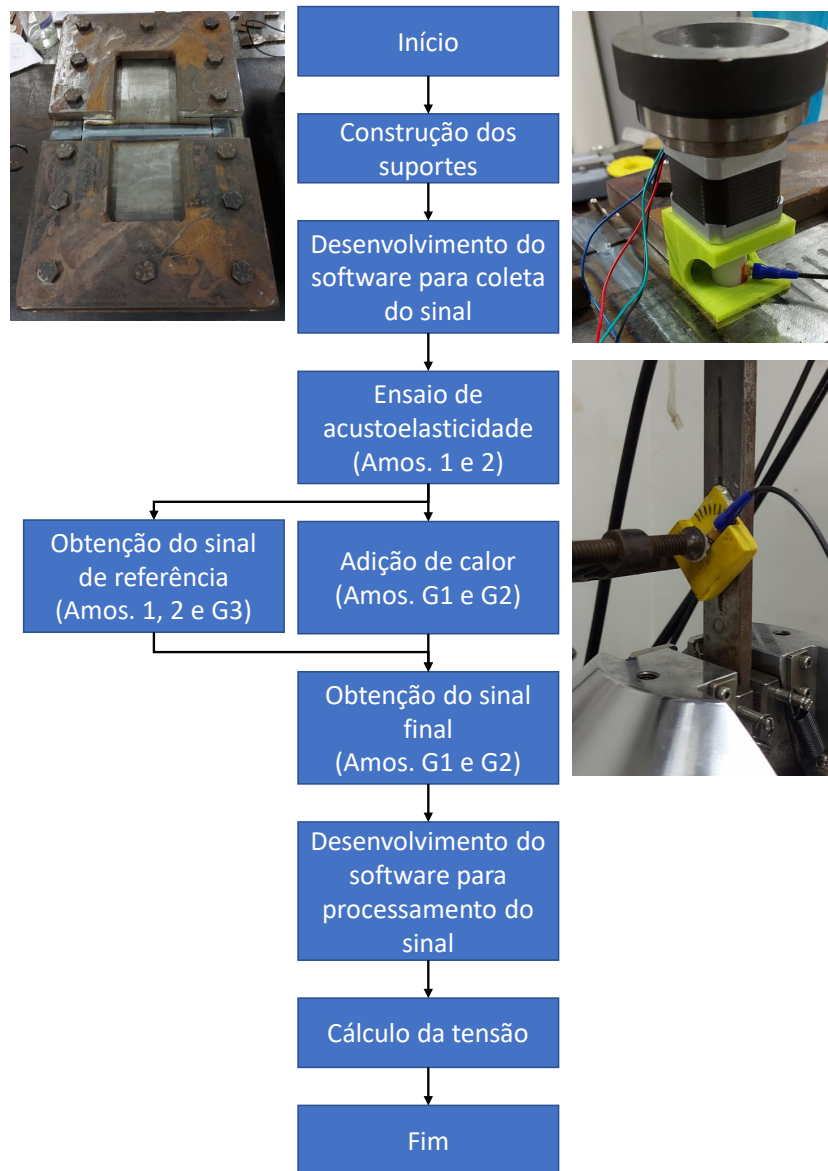


Figura 22: Fluxograma geral do trabalho.

Para realizar medições de tensões por ultrassom, são necessárias duas etapas, a de calibração e a de medição da tensão. As duas são feitas em dois grupos de amostras diferentes do mesmo material. As amostras para calibração são fabricadas para passarem por uma aplicação de tensão conhecida e, então, verifica-se como o ultrassom é influenciado pela variação de tensão. Essa influência pode ser tempo de propagação, alguma frequência característica, amplitude do sinal, entre outros. Neste trabalho, foi avaliado apenas o tempo de propagação, ou o tempo em que a onda demora para percorrer todo o percurso medido. Na literatura, esse tempo é comumente chamado de *Time Of Flight*, ou TOF. A

medição da tensão é feita após o ultrassom ter sido calibrado, já nas amostras sob tensão residual.

As medições foram feitas usando tanto ondas cisalhantes quanto ondas compressivas. Segundo (HIRAO; OGI, 2017), é necessário usar os dois tipos de onda em conjunto para realizar uma análise quantitativa das tensões, possibilitando avaliar tanto o seu módulo quanto a sua direção. A direção da tensão pode ser obtida ao se conhecer o ângulo φ . Portanto, um equipamento foi construído a fim de facilitar a aquisição do sinal da onda cisalhante com ela polarizada em várias direções. Um fluxograma com um resumo do trabalho é mostrado na Figura 22.

3.1 Material

Todas as amostras foram feitas a partir de chapas de aço ASTM A131. Esse material é comumente usado para a construção de navios. No local de realização deste trabalho, diversas pesquisas já foram realizadas usando o mesmo material, incluindo pesquisas utilizando birrefringência acústica para avaliação de tensão em chapas soldadas (COSTA et al., 2017). Esses foram os fatores que motivaram o uso desse aço para a realização desta pesquisa.

A composição química das amostras é mostrada na Tabela 5. A composição foi determinada por (COSTA, 2017) em uma amostra de chapa utilizando um espectrômetro de emissão ótica, fabricada pela *Oxford Instruments* de modelo *Foundry-Master Xpert*. As dimensões do material como recebido foram 80 cm x 120 cm x 9,5 mm, com variação dimensional de 0,6 mm. O desenho esquemático da chapa como recebido está sendo mostrado na Figura 23.

Tabela 5: Composição química do material de base (COSTA, 2017).

Material	Material em peso (%)								
Metal de base	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Aço ASTM A131	0,22	1,23	0,24	0,022	<0,001	0,015	0,014	<0,001	0,012

Fonte: (COSTA, 2017)

3.1.1 Confeção das amostras

Duas amostras para calibração, com direções de laminação ortogonais, e três amostras finais foram retiradas dessa mesma chapa. As amostras finais possuem a dimensão 40 cm x 20 cm e foram nomeadas G1, G2 e G3. A amostra para calibração 1 possui dimensão 25,3 mm x 9,5 mm e a 2 possui dimensão 24,4 mm x 9,5 mm.

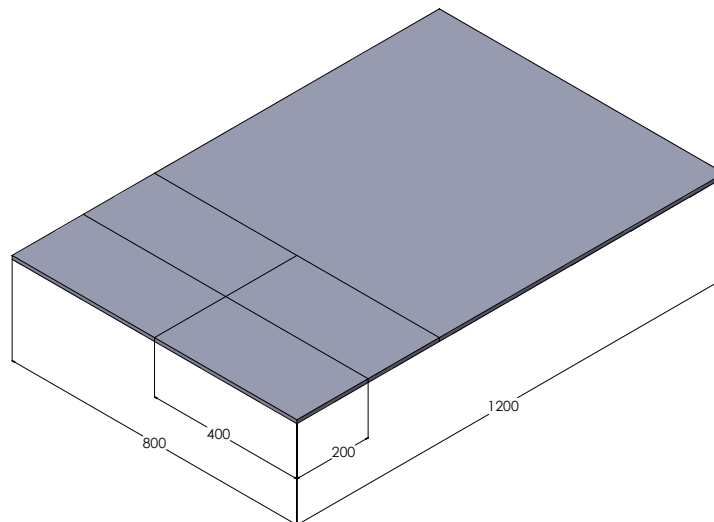


Figura 23: Chapa de aço ASTM A131 como recebido, com esboço do corte [mm].

3.2 Adição de calor

Neste trabalho, uma fonte de soldagem TIG foi utilizada a fim introduzir um gradiente de temperatura grande o suficiente para gerar tensões residuais. Foram usadas duas amostras, ambas fixas por um suporte, para evitar deformação. As amostras que passaram por esse processo foram nomeadas de G1 e G2. A amostra G3 serviu de referência.

3.2.1 Parâmetros da adição de calor

A distância bico de contato à peça (DBCP), tamanho do bocal, vazão e composição do gás de proteção, corrente, espessura do eletrodo e a sua posição foram iguais em todos os processos e estão expostos na Tabela 6. A velocidade de movimento da tocha foi o único parâmetro que variou entre as amostras, a fim de alterar a carga térmica absorvida. Na amostra G1, a velocidade foi de 5 cm/min. Na amostra G2, a velocidade foi de 10 cm/min. Tal mudança afeta diretamente a quantidade de energia introduzida em cada amostra, logo, alterando a tensão residual gerada em cada uma (RAVISANKAR et al., 2014). A energia de soldagem foi calculada com uma eficiência térmica de 65% (KOU, 2002).

Os parâmetros da adição de calor foram determinados em testes preliminares, em que a velocidade foi reduzida até que a área fundida atravessasse toda a espessura da peça (ver apêndice A). O calor adicionado foi suficiente para que houvesse refusão ao longo do trajeto da tocha.

Tabela 6: Parâmetros da adição de calor.

Parâmetro	G1	G2	unidade
Velocidade de avanço	5	10	cm/min
Energia de soldagem	1800	900	J/mm
DBCP	3,5	3,5	mm
Espessura do eletrodo	3,2	3,2	mm
Tamanho do bocal	10	10	-
Vazão	15	15	l/min
Corrente	210	210	A
Tensão	11	11	V

3.2.2 Procedimentos da adição de calor

A operação da adição de calor foi feita na posição plana, sem adição de material, com a tocha fixa com ângulo de 0° e deslocamento horizontal. O calor foi adicionado no sentido perpendicular à direção de laminação. O deslocamento foi realizado de forma automática através do tartilope. As amostras foram fixas em suportes, conforme mostra a Figura 24, a fim de impedir deformações no sentido normal à chapa devido ao calor, preservando as tensões residuais gerado por este.

**Figura 24:** Suporte de restrição das deformações.

3.3 Medição das tensões por ultrassom

3.3.1 Equipamentos usados para geração e aquisição do sinal ultrassônico

O sinal de resposta da onda ultrassônica foi obtido utilizando a técnica pulso eco, que se caracteriza por utilizar um único transdutor para a emissão e recepção do feixe ultrassônico. O sistema é composto de um ultrassom (Olympus epoch 1000i) [1], um osciloscópio

(Tektronix MSO3054) [2] com taxa de amostragem de até 2,5GS/s, um transdutor piezo-elétrico (Olympus V156-RM) de onda cisalhante e outro de incidência normal (Olympus V110-RM) com diâmetro de 12,7 mm e frequência nominal de 5 MHz [3], um filtro de amplitude [4] e um *notebook* com o *software* para coleta do sinal [5]. O sinal é emitido pelo ultrassom onde se conecta a um filtro de amplitude e este para o transdutor e, então, de volta para o filtro, seguido do osciloscópio, que discretiza o sinal, conforme é mostrado na Figura 25, assim, podendo ser interpretado pelo computador.

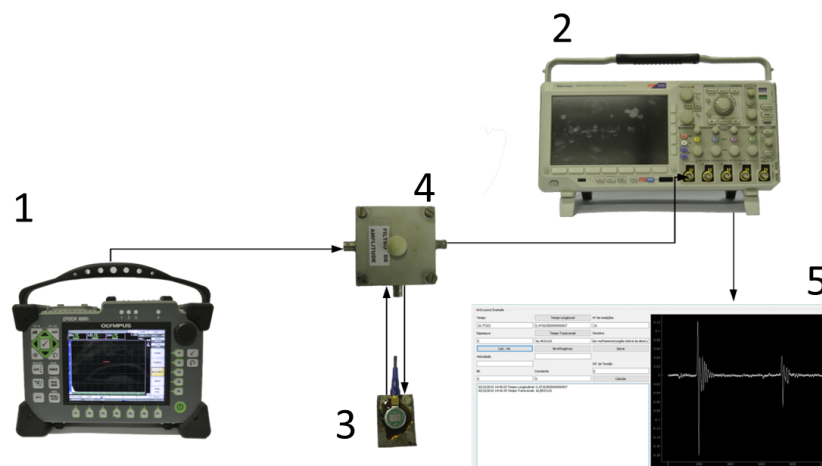


Figura 25: Caminho percorrido pelo sinal (ALBUQUERQUE, 2019).

3.3.2 Suporte do transdutor ultrassônico

Um suporte foi construído por impressão 3D para auxiliar na movimentação do transdutor em conjunto com um motor de passo. O motor de passo (Figura 27) é controlado por um arduino mega (Figura 28), que está sincronizado com o *software* para a coleta do sinal. Para ondas compressivas, o sinal foi obtido no mesmo ponto de medição que a onda cisalhante, ainda com a utilização do suporte, mas sem o uso do motor. A Figura 26 apresenta o suporte no momento da medição.

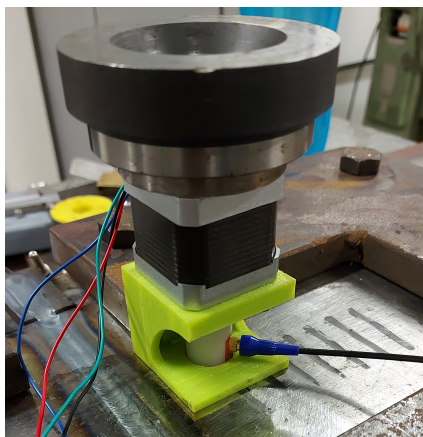


Figura 26: Suporte do transdutor ultrassônico.

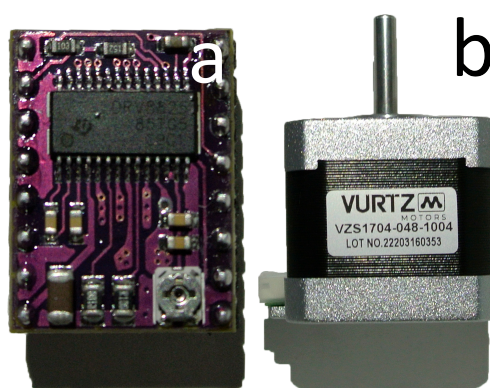


Figura 27: (a) Microcontrolador DRV8825 e (b) motor de passo.

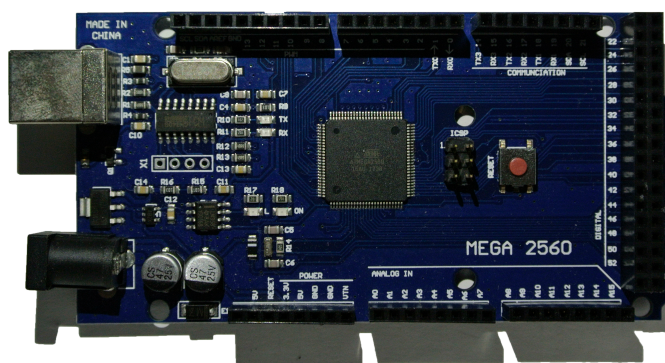


Figura 28: Arduíno mega 2560.

3.3.3 Transdutores

Dois tipos de transdutores foram utilizados, sendo ambos transdutores piezoelétricos, um de onda cisalhante (V156-RM) e outro de ondas compressivas (V110-RM), fabricados com apenas um cristal, que serve tanto de emissor quanto receptor do sinal, aplicando o método pulso-eco. Cada transdutor possui diâmetro de 12,7 mm e frequência de excitação de 5 MHz.

A energia do pulso, formato e frequência pode ser definido no emissor de sinais. Cada transdutor possui um limite máximo para a energia do pulso. O V156-RM possui o limite de 150 V, enquanto o V110-RM possui um limite de 500 V. A fim de se conservar os transdutores, uma carga de 100 V foi usada no V156-RM e de 250 V no V110 RM, com a frequência de repetição do pulso de 55 Hz. O formato do sinal foi do tipo dente de serra.

Esses transdutores foram utilizados devido à limitação de equipamento que o laboratório dispunha no momento da realização desse trabalho. Para materiais metálicos, o uso de EMATs é mais recomendado, segundo (HIRAO; OGI, 2017), por possuir maior precisão na medição do tempo de propagação e por ter menos perdas por atenuação.

3.4 Software

A interface do *software* foi criada usando a linguagem *C#* através do *framework Windows*. Devido à facilidade de processamento de dados, os cálculos necessários são feitos pela linguagem *Python*, através do pacote *numpy*. A Figura 29 apresenta o *software*.

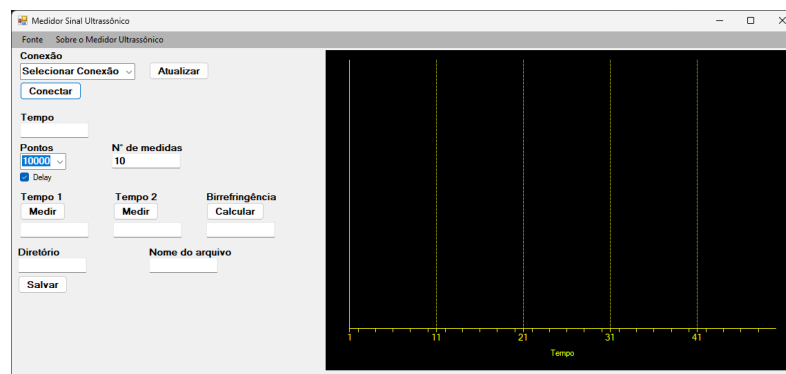


Figura 29: Interface do software par obtenção do sinal.

Além do *software* para aquisição do sinal, foi feito, também, outro para processamento dos dados. Aqui, somente a linguagem *Python* foi utilizada, sendo os principais pacotes o *numpy*, *scipy* e o *copy* (sendo este um pacote que substitui o *numpy* em algumas funções, acelerando em várias vezes o processamento dos dados). Neste *software*, o objetivo é fazer a leitura dos dados aquisitados e processá-los. O cálculo do TOF é feito utilizando o método apresentado por (BITTENCOURT et al., 2000), que utiliza correlação cruzada em um sinal interpolado. O apêndice B apresenta a rotina que o *software* segue para processar os sinais e realizar os cálculos necessários.

3.5 Obtenção do sinal

Para a obtenção do sinal em qualquer momento do trabalho, é necessário configurar, de forma simultânea, o emissor de sinais, o osciloscópio e o *software*. A configuração

do emissor de sinais modifica a intensidade do sinal de saída, alterando a amplitude e o formato da onda. A configuração do osciloscópio interfere na quantidade de pontos que serão obtidos em cada medição e na amplitude máxima do sinal a ser obtida. O osciloscópio também serve para checar se o *software* está realizando os cálculos de tempo corretamente, visto que é possível obter o TOF por meio dos cursores do osciloscópio, de forma manual. A configuração do *software* dita o local de salvamento dos arquivos e as portas USB que serão utilizadas para controle do Arduino (que controla o motor de passo) e para controle e leitura do osciloscópio. Quando os três estão devidamente configurados, é possível observar dois ecos tanto na tela do osciloscópio quanto no *software*.

No momento em que se aperta o botão "salvar" no *software*, é enviado um comando para o osciloscópio, que realiza algumas configurações de forma automática. Essas configurações permitem com que seja obtido todo o sinal, desde o pulso do transdutor até o último eco ser detectável. Uma medição é feita ao se salvarem 5 sinais, cada sinal possui 100000 (cem mil) pontos. Cada sinal é salvo em um intervalo de 2 segundos. O resultado do TOF é obtido de forma separada, para cada sinal, sendo o final a média dos 5 TOFs. Tais sinais foram usados posteriormente para se calcular o TOF de cada medição.

Durante todos os ensaios, buscou-se manter a temperatura do ambiente constante, em torno de 24°C, já que a variação de temperatura altera, consideravelmente, o TOF (VANGI; VIRGA, 2007).

3.5.1 Suporte do transdutor

O suporte do motor de passo foi utilizado tanto nas medições com ondas compressivas quanto nas de ondas cisalhantes, visto que o suporte auxiliava não apenas para a movimentação do transdutor, mas também para o aperto deste com uma força contínua, exceto no momento da obtenção das constantes, já que as amostras, no momento deste ensaio, ficavam na posição vertical. Um peso de 1 Kg foi colocado sobre o motor de passo nas medições com os dois tipos de onda, a fim de manter pressão constante do transdutor sobre a amostra.

3.5.2 Determinação do ângulo φ

A determinação do ângulo φ foi feita com a utilização do motor de passo. O motor de passo só é ligado quando se deseja obter o ângulo φ , ou seja, apenas no uso de ondas cisalhantes, visto que apenas este tipo de onda sofre interferência da direção de polarização. Neste trabalho, para todos os pontos em que se usou o motor de passo, o intervalo de varredura foi de 180°, com 37 ângulos de medição. Ou seja, cada direção está defasada 5° uma da outra. Isso permite com que seja obtido o ângulo de polarização com maior precisão do que se feito manualmente.

A configuração do motor de passo é feito no *software* ao se escolher o intervalo de

varredura e a quantidade de ângulos que serão feitas medições. Por exemplo, na Figura 30, é mostrado, esquematicamente, um intervalo de varredura de 180° , com 5 ângulos para realizar as medições. Logo, a diferença de direção para cada medição será de 45° .

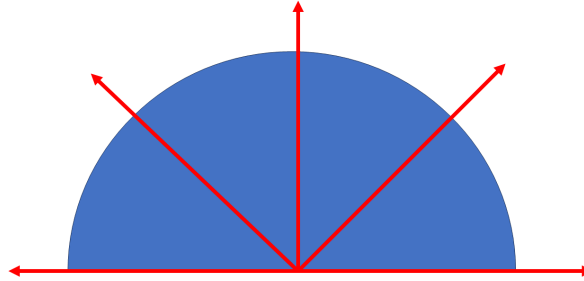


Figura 30: Exemplo do intervalo de varredura.

Ao apertar o botão "salvar", é feita uma medição (5 sinais foram salvos em um intervalo de 2 segundos). Nesse momento, o motor de passo está parado. No momento em que o último sinal é salvo, o motor de passo começa a girar no sentido desejado (horário ou anti-horário). Ao finalizar a rotação, espera-se 15 segundos antes de se iniciar uma nova medição. Esse processo é feito automaticamente do início ao fim da varredura.

Testes preliminares mostraram um comportamento inesperado do TOF em função do ângulo φ . A Figura 31 apresenta como o TOF da onda varia ao se alterar o ângulo de polarização. Aqui, é possível ver diferença no TOF da onda cisalhante em função do sentido. O TOF a 0° e a 180° deveriam ser iguais. Além disso, observa-se um platô entre 60° e 130° , que, possivelmente, encobrem a direção de polarização.

Nota-se, também, na direita, que existem dois pontos com maior (60° e 125°) e dois pontos com menor TOF (35° e 145°). Apesar de ambos estarem defasados, aproximadamente, 90° ($125^\circ - 35^\circ = 90^\circ$ e $145^\circ - 60^\circ = 90^\circ$), era esperado ter apenas um valor preferencial.

Tais figuras são apenas exemplos de problemas encontrados durante a medição. Não se sabe, exatamente, o que ocasionou tais problemas, mas uma solução foi proposta a seguir. O ângulo de menor velocidade de propagação está entre duas regiões de variação elevada do TOF. É possível obter retas tangentes a essas inclinações e calcular seu ponto de encontro. Esse ponto é o ponto onde seria obtido a menor velocidade de propagação. As Figuras 32 apresentam o processo realizado nas imagens dadas como exemplo, anteriormente. Em azul, tem-se o TOF em função do ângulo e, em verde, a reta gerada pela maior e menor valor de sua derivada. Em vermelho, a reta vertical que passa pelo ponto em que as duas retas verdes se encontram.

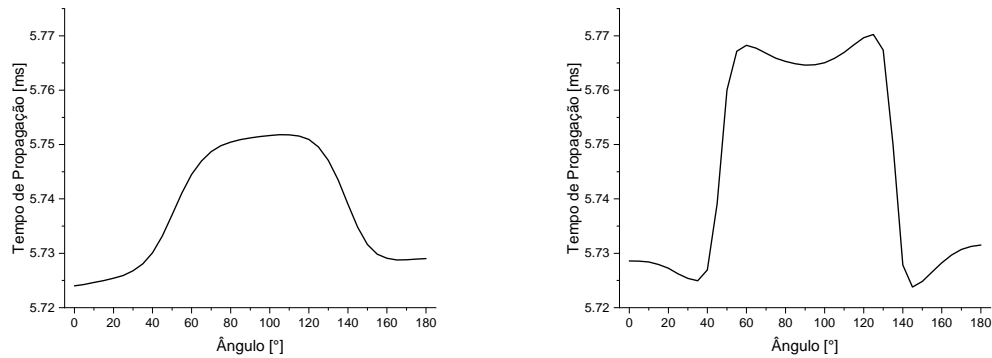


Figura 31: TOF da onda cisalhante em função do ângulo de polarização nos pontos 6 e 7 da linha 2.

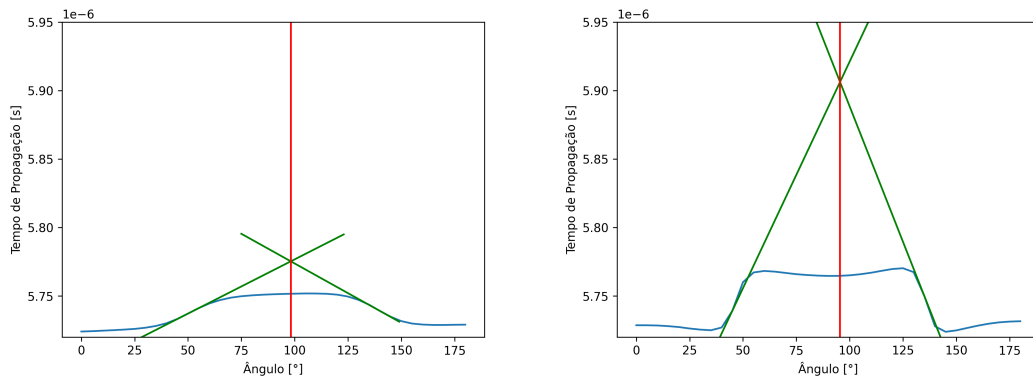


Figura 32: Demonstração de como encontrar a direção de polarização.

3.6 Sinal de referência

O sinal de referência é utilizado para se avaliar o estado do material antes de sua alteração pela adição de calor, ou antes da geração de tensões residuais, e calcular B_0 e R_0 . Para isso, foi feita a varredura do sinal nas diagonais da amostra G3, onde o nível de tensões residuais pode ser considerado nulo. Além das diagonais, foi feita uma varredura na linha no centro da chapa, ao longo de seu comprimento, contendo 14 pontos distanciados 1 cm entre si, possibilitando avaliar se há diferenças consideráveis entre o centro e as diagonais. Para ondas cisalhantes, o sinal foi obtido com a onda polarizada com a direção variando de 0° (perpendicular à direção de laminação) a 180° em intervalos de 5° . O sinal da onda compressiva foi medido nos mesmos pontos.

3.7 Obtenção das constantes acustoelásticas

O ensaio para determinação das constantes acustoelásticas C_B e C_R consiste na verificação da influência no ultrassom quando as amostras são submetidas a tensões crescentes. A Figura 33 mostra uma foto do sistema utilizado pelo autor em trabalhos anteriores. A

única mudança no sistema foi o *software* utilizado.

As amostras foram carregadas até 60 kN, em intervalos de 10 kN. Para ondas cisalhantes, foram usadas duas direções de polarização: 0°; e 90°. O equipamento foi descarregado antes de se alterar o ângulo de polarização. Para ondas compressivas, foi feito apenas um carregamento.

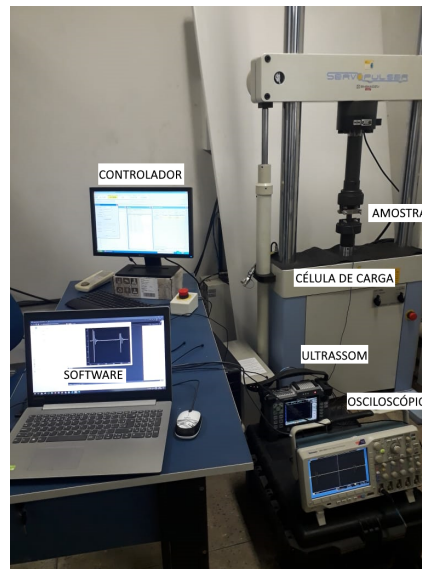


Figura 33: Sistema usado para medição das constantes acustoelásticas (ALBUQUERQUE, 2019).

Duas amostras com direções de laminação perpendiculares entre elas foram utilizadas para fazer a calibração. A amostra 1 possui o comprimento perpendicular com a direção de laminação. A amostra 2 possui com comprimento paralelo. Porém, isso não deve influenciar no coeficiente angular, já que é um efeito da interação entre as moléculas e a tensão, e não do sentido da laminação (HIRAO; OGI, 2017). Um suporte foi colado na amostra e o transdutor foi pressionado com um grampo de aperto, conforme mostrado na Figura 34. As constantes acustoelásticas são os coeficientes angulares das retas geradas entre os TOFs e os carregamentos aplicados na amostra.



Figura 34: Suporte utilizado para aperto e fixação do transdutor.

3.8 Sinal nas amostras finais

Após a adição de calor, as amostras finais foram marcadas e fez-se a coleta do sinal ultrassônico. Ainda com a utilização do suporte, foram feitos 14 pontos em 3 linhas (L1, L2, e L3), sendo 7 em cada lado da zona fundida. Os pontos 7 e 8 foram os primeiros pontos após a zona termicamente afetada. A partir de cada um, outros 6 pontos, distanciados 10 mm, foram feitos, como ilustrado na Figura 35. Em cada ponto, antes de se iniciar a varredura, era feita uma pausa de cerca de 5 a 10 minutos para o sinal se estabilizar.

Devido às limitações geométricas que o suporte causou, conforme mostra a Figura 36, não foi possível serem feitas medições com ultrassom muito próximas ao suporte, já que o cabo do transdutor impedia a varredura de todos os ângulos.

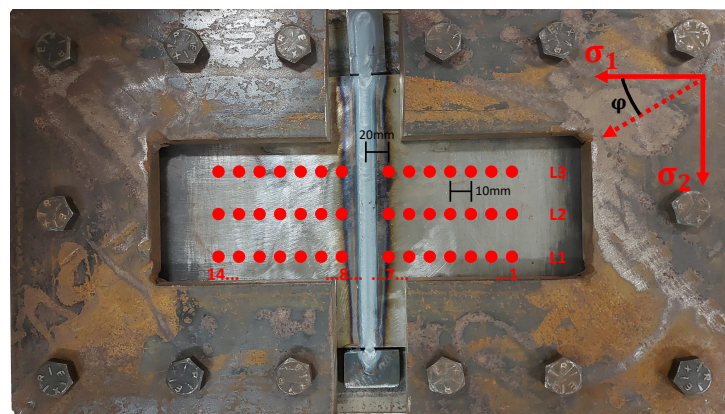


Figura 35: Pontos de medição com ultrassom.

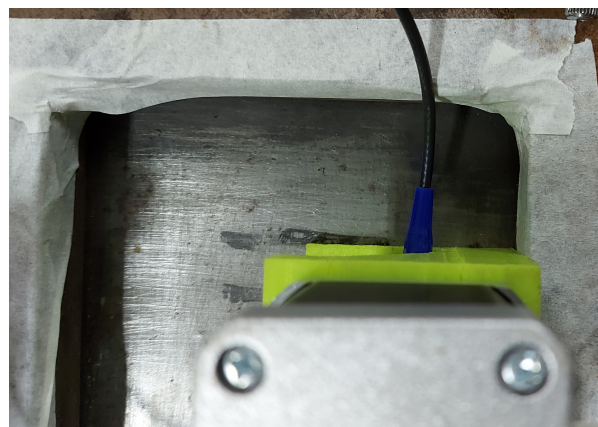


Figura 36: Limitação geométrica causada pelo suporte.

Outra limitação causada pelo suporte foi com relação ao ângulo inicial. Em cada linha, a direção inicial teve que ser alterada. Na primeira linha, o ângulo 0° está alinhado com a direção de laminação e o giro é dado no sentido anti-horário. Na segunda linha, o ângulo 0° está perpendicular à direção de laminação e o giro é dado no sentido anti-horário. Na terceira linha, o ângulo 0° está alinhado com a direção de laminação e o giro é dado no sentido horário.

3.8.1 Resumo dos métodos

Como a quantidade de variáveis avaliadas são muitas, fez-se necessário expôr, de forma resumida, o que precisa ser obtido em cada método para sua solução e o que é obtido como resposta. A Tabela 7 apresenta tal informação. Nela, é mostrado: as constantes, obtidas nas amostras de referência 1 e 2; Os valores de referência, obtida na amostra G3, uma chapa sem adição de calor, como veio de fábrica; Os valores de entrada, obtido das amostras G1 e G2, que passaram por adição de calor, ou seja, nas amostras em que as tensões residuais foram induzidas; Os valores de saída, resultado obtido pelo método escolhido.

É importante notar que os métodos compartilham das constantes e valores de referência, por motivos já explicados anteriormente. Além disso, o método Clark e Hirao II compartilham, até, o resultado de tensão. Logo, teoricamente, o resultado para esses dois deveria ser o mesmo. Por tal motivo, as variáveis escolhidas para representar tais incógnitas são as mesmas para esses métodos.

Tabela 7: Entradas e saída de cada método.

Método	Amostra	Hirao I	Clark	Hirao II
Constantes	De referência 1 e 2	C_B e C_R	C_B e C_R	C_B e C_R
Valores de referência	G3	B_0 e R_0	B_0 e R_0	B_0 e R_0
Valores de entrada	G1 e G2	t_1 , t_2 e t_c	t_φ , $t_{\varphi+90}$, φ e t_c	t_φ , $t_{\varphi+90}$, φ e t_c
Valores de saída	-	σ_1 e σ_2	σ_θ e $\sigma_{\theta+90}$	σ_θ , $\sigma_{\theta+90}$ e θ

3.9 Metodologias de cálculo de tensão por ultrassom

Três métodos para o cálculo de tensão residual foram utilizados neste trabalho, denominados da seguinte forma: Hirao I; Clark; Hirao II. Cada método possui características e considerações específicas, exigindo, também, um processo diferente para sua solução. Apesar dessas diferenças, elas irão compartilhar semelhanças quanto às constantes utilizadas. Os métodos são apresentados nas seções seguintes.

Para o melhor entendimento, a Figura 37 é mostrada novamente, já que várias considerações levam em conta o ângulo entre a polarização da onda cisalhante e a direção de anisotropia inicial (φ). É importante salientar que esse ângulo é diferente do ângulo em que a tensão principal está em relação à direção de anisotropia inicial, sendo este representado por θ .

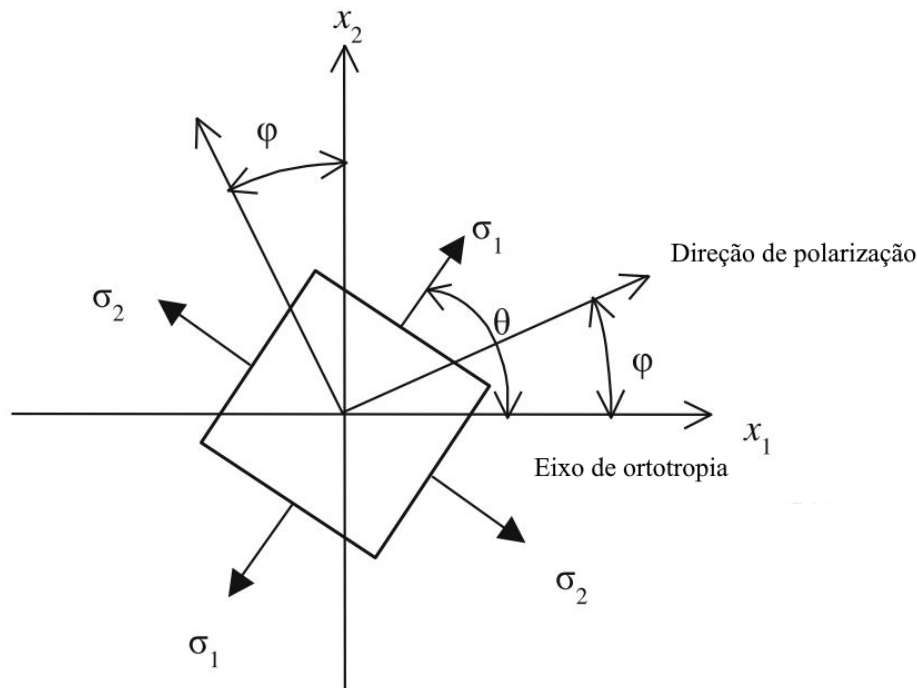


Figura 37: Sistema bidimensional mostrando ao longo dos eixos a textura ortorrópica com a direção das tensões principais e da onda cisalhante polarizada. Adaptado de (HIRAO; OGI, 2017).

3.9.1 Hirao I

Primeiramente o método com mais simplificações, aplicado em outros trabalhos (CRE-CRAFT, 1967; BITTENCOURT et al., 2000; COSTA, 2017). Nesse método, é necessário medir o TOF na direção de anisotropia do material (t_1) e perpendicular a esta (t_2) e, então, fazer o cálculo da birrefringência pela equação (3.1). O cálculo da birrefringência permite com que seja calculado a diferença das tensões, conforme mostrado em destaque na mesma equação.

A consideração que precisa ser feita é que a direção de polarização da onda e das tensões principais estejam alinhadas com as direções de anisotropia e com a direção das tensões principais, ou seja, que $\theta = 0$ e $\varphi = 0$.

Essa consideração é a condição mais simples para se calcular as tensões. Contudo, a medição de cada tensão individual, ou seja, a separação de σ_1 e σ_2 pode ser feita ao se medir o TOF das ondas compressivas, que permite o cálculo da soma das tensões principais (equação (3.2)). Após esse cálculo, o módulo de σ_1 e σ_2 pode ser obtido ao se aplicar um sistema de equações simples usando o resultado da soma e da diferença das tensões.

$$B = -2 \frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} = B_0 + C_B(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3.1)$$

$$R = 2 \frac{t_1 t_2}{t_C(t_1 + t_2)} = R_0 + C_R(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.2)$$

Nessas equações, B e R são, respectivamente, a birrefringência final e a razão das velocidades final do corpo após a adição de calor. B_0 e R_0 são a birrefringência inicial e razão das velocidades inicial, antes da adição de calor, em um material de referência. C_B e C_R são as constantes acustoelásticas de birrefringência e da razão das velocidades. t_1 e t_2 são os TOFs das ondas cisalhantes polarizadas na direção de anisotropia inicial (direção de laminação) e perpendicular a ela. t_C é o TOF da onda compressiva. σ_1 e σ_2 são as tensões principais.

3.9.2 Clark

O segundo método foi apresentado por (CLARK; SCHAPS, 1998), onde o ângulo entre a direção de anisotropia e a direção de polarização da onda (φ) é considerado. O mesmo ângulo serve, também, para selecionar o TOF utilizado para o cálculo da birrefringência (t_φ e $t_{\varphi+90}$).

Para isso, no momento da medição é utilizado o motor de passo para fazer a varredura, rotacionando o transdutor e medindo o TOF. Ao se alterar o ângulo em que o transdutor está direcionado, muda-se, também, o TOF medido. O ângulo em que for obtido o menor TOF será a direção de polarização da onda (φ). Esse TOF, também, será o t_φ . A 90° dele, há o $t_{\varphi+90}$.

A mudança do subscrito nas equações (3.3, 3.4, 3.5, 3.6) mostram que os TOFs utilizados são diferentes do método anterior, pois esses são os TOFs da onda cisalhante polarizada na direção de polarização da onda. Além disso, as tensões calculadas estão fora do eixo de anisotropia do material, fazendo um ângulo θ com ele, porém, o autor não apresenta como determinar esse ângulo. As tensões calculadas por esse método são as tensões principais, porém, tem direção diferente do método Hirao I. Por esse motivo, as tensões foram nomeadas de σ_θ e $\sigma_{\theta+90}$.

$$\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90} = \frac{B_\varphi \cos \varphi - B_0}{C_B} \quad (3.3)$$

$$\sigma_\theta + \sigma_{\theta+90} = \frac{R_\varphi - R_0}{C_R} \quad (3.4)$$

$$B_\varphi = 2 \frac{t_\varphi - t_{\varphi+90}}{t_\varphi + t_{\varphi+90}} \quad (3.5)$$

$$R_\varphi = 2 \frac{t_\varphi t_{\varphi+90}}{t_C(t_\varphi + t_{\varphi+90})} \quad (3.6)$$

3.9.3 Hirao II

O terceiro método, aplicado por (HIRAO, Masahiko; OGI; FUKUOKA, 1993), usa uma forma generalizada da equação (3.1), apresentada na equação (3.7), onde o ângulo θ é usado. A birrefringência calculada aqui é a mesma do método anterior, representada pela equação (3.5). A razão das velocidades calculada pela equação (3.6) é utilizada, também, para a separação.

$$B_\varphi = \sqrt{B_0^2 + 2B_0C_B(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90}) \cos 2\theta + C_B^2(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90})^2} \quad (3.7)$$

Porém, não é possível determinar o ângulo θ diretamente. Portanto, Hirao, também, apresenta a equação (3.8), que mostra como o ângulo φ fica em função de θ , $(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90})$, C_B e B_0 . Esta equação foi apresentada, primeiramente, por (IWASHIMIZU; KUBOMURA, 1973), que estudaram a alteração do ângulo de polarização da onda em função da tensão aplicada fora do eixo de anisotropia.

$$\tan 2\varphi = \frac{C_B(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90}) \sin 2\theta}{B_0 + C_B(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90}) \cos 2\theta} \quad (3.8)$$

Vale ressaltar que, diferentemente do método de Hirao I e Clark, não há uma solução analítica que resolva as equações (3.7) e (3.8), sendo necessário o uso de métodos numéricos. Portanto, o *software Wolfram Mathematica* foi usado para calcular as possíveis soluções dessa equação, em conjunto com a equação (3.7). Utilizando a função *NSolve*, cada ponto de medição oferece quatro soluções, dentro do limite $-\pi/2 < \theta < \pi/2$.

Dois critérios foram usados para escolher a resposta. O primeiro é excluir os dois valores de $(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90})$ mais elevados em módulo, o que já exclui metade das respostas por ponto. O segundo critério é analisar o valor de B para cada ponto. Caso $B_\varphi - B_0 > 0$, $(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90}) > 0$ ou caso $B_\varphi - B_0 < 0$, $(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90}) < 0$. Com isso, é possível encontrar o valor de $(\sigma_\theta - \sigma_{\theta+90})$ e θ para cada ponto. Ao introduzir o TOF compressivo, usando a razão das velocidades das ondas cisalhantes e compressivas, calcula-se as tensões σ_θ e $\sigma_{\theta+90}$, separadamente.

Nos três métodos, é necessário obter os valores de referência (B_0, R_0) , assim como a medição da constante acustoelástica (C_B, C_R) para a realizar o cálculo das tensões. Todos compartilham das mesmas constantes. Isso pode ser feito considerando que, inicialmente, um corpo possui as direções de polarização iguais a de anisotropia, sendo alterado, apenas, em função da tensão aplicada ou residual fora desse eixo.

4 | Resultados e discussões

4.1 Resultado da calibração

4.1.1 Valores de referência

Para determinação de B_0 e R_0 , duas regiões foram analisadas separadamente: as extremidades diagonais; e uma linha central, ambas na amostra G3. A Figura 38 apresenta o TOF da onda compressiva e cisalhante, esta polarizada nas direções paralela e perpendicular à laminação da chapa. À esquerda, o TOF ao longo da linha e, na direita, o TOF ao longo dos pontos nas diagonais.

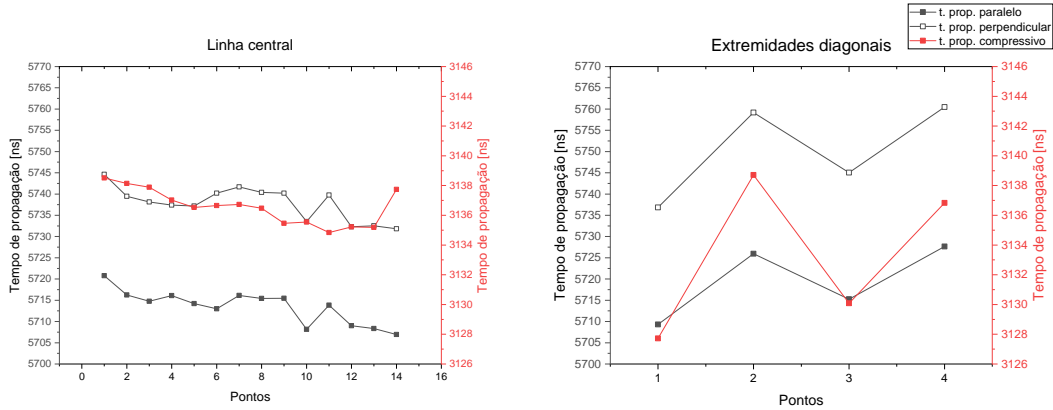


Figura 38: TOF usado na calibração do ultrassom. À esquerda, o TOF ao longo da linha. À direita, o TOF ao longo das diagonais.

Observa-se que o TOF nas diagonais variaram mais do que o medido na linha central, independente da direção ou do tipo da onda. Calculando B_0 médio para ambos, foi encontrado o valor de $4,25E-3 \pm 0,20E-3$ para a linha central e $5,37E-3 \pm 0,30E-3$ para as diagonais. Calculando R_0 , tem-se $1,82 \pm 0,85E-3$ para a linha central e $1,83 \pm 0,61E-3$ para as diagonais. A diferença do valor médio de B_0 entre as diagonais e a linha central é considerável.

Um teste foi feito nas amostras finais, a fim de se observar se o valor de B médio é mais próximo da linha central ou das diagonais (ver apêndice D). Foi observado que a birrefringência calculada nas diagonais é muito distante das vistas nas amostras finais. Isso pode ser explicado pelo relaxamento das tensões que ocorre próximo às extremidades das peças, como já mostrado por (JAVADI; HASANI; SADEGHI, 2015), tensões essas advindas do processo de fabricação. Como o objetivo do trabalho é determinar as tensões geradas apenas pela adição de calor, e não do processo de fabricação da chapa, para o resto do trabalho, os valores de referência usados foram da linha central.

4.1.2 Constantes acustoelásticas

A Figura 39 mostra como a birrefringência varia em função da tensão agindo uniaxialmente sobre o corpo. É possível observar que as inclinações de ambas as amostras são semelhantes. Para obter a constante acustoelástica, é feita uma regressão linear, representada pela linha azul sobre os pontos de medição, e obtém-se seu coeficiente angular. Na amostra 1, o C_B obtido foi $-8,56E-6 \pm 5,24E-7 \text{ MPa}^{-1}$ e, na amostra 2, $-10,5E-6 \pm 2,61E-7 \text{ MPa}^{-1}$, resultando em um valor médio de $-9,54E-6 \text{ MPa}^{-1}$. O valor de R^2 da primeira foi de 98,5% e 99,7% para a segunda, mostrando alta correlação da birrefringência em função da tensão.

Vale ressaltar que tais amostras foram cortadas com o comprimento perpendicular (amostra 1) e paralelo (amostra 2) à direção de laminação do material, o que justifica a mudança dos valores iniciais da birrefringência.

O resultado médio foi um pouco acima do que era esperado ao se observar a literatura. (HIRAO; OGI, 2017) afirmam que as constantes ficam em torno de $-8E-6 \text{ MPa}^{-1}$. (COSTA et al., 2017), que estudaram o mesmo material, encontraram $-7,56E-6 \text{ MPa}^{-1}$ como o valor da constante.

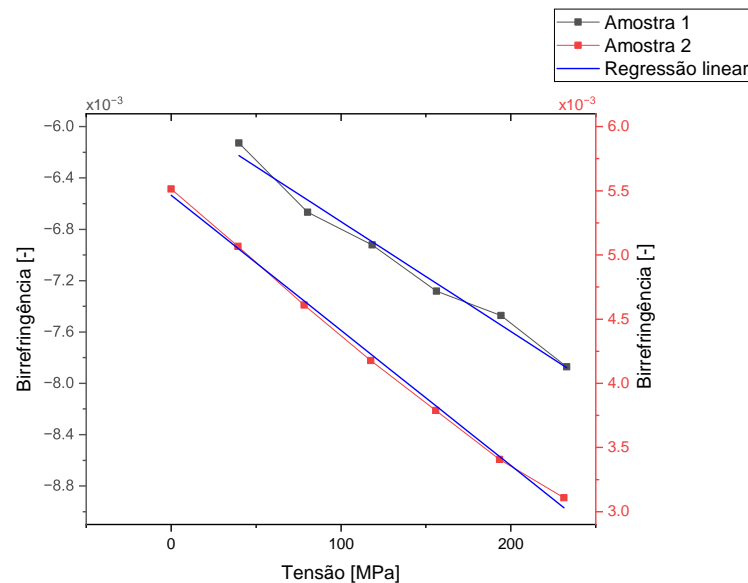


Figura 39: Birrefringência em função da tensão agindo uniaxialmente para as duas amostras.

A constante para a razão das velocidades C_R é encontrada de forma semelhante. A Figura 40 apresenta a razão das velocidades em função da tensão. Diferentemente da birrefringência, como a equação soma as velocidades cisalhantes, a direção de laminação da amostra não importa, já que ambas sofrerão influência na mesma escala. Os pontos iniciais estão próximos. A diferença deve ser decorrente de heterogeneidade do material. A inclinação, ou C_R , também, se mantém semelhante. Para a amostra 1, C_R é $7,58E-6 \pm 206E-7 \text{ MPa}^{-1}$ e $9,41E-6 \pm 4,45E-7 \text{ MPa}^{-1}$ para a amostra 2. O R^2 foi de 99,7% e 99,1%, respectivamente. O valor médio é de $8,50E-6 \text{ MPa}^{-1}$.

4.1.3 Desvio padrão em termos da tensão

Com os valores das constantes, foi calculado o valor de erro em MPa dos valores de referência. O cálculo pode ser feito utilizando a equação (3.1). O valor de B_0 é o valor médio da birrefringência. O valor de B é a soma do valor médio com o desvio padrão. Tendo a constante, calcula-se a diferença de tensão. O mesmo processo é feito para a razão das velocidades, usando a equação (3.2). Para B_0 , o valor de incerteza foi de $\pm 21,58$ MPa. Para R_0 , ± 100 MPa. Em suma, os valores de calibração usados para calcular as tensões estão expostos na Tabela 8.

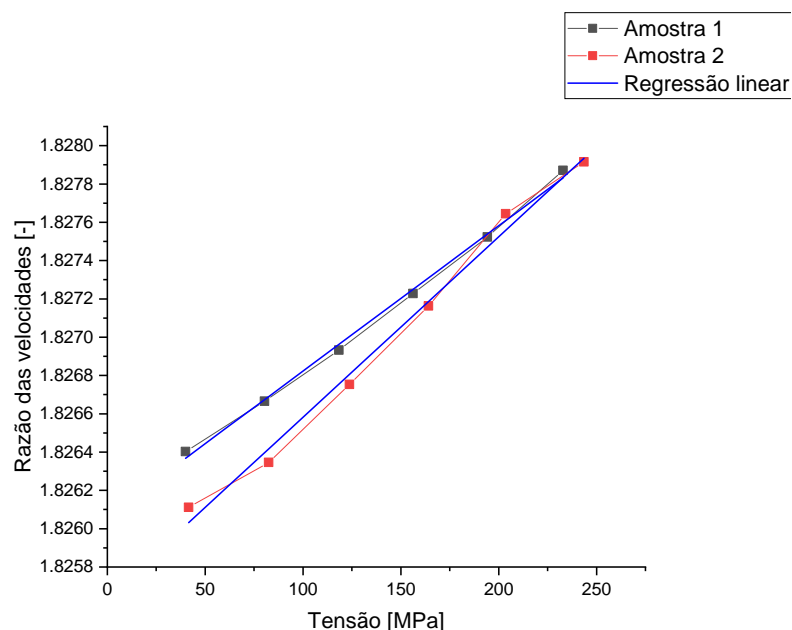


Figura 40: Razão das velocidades em função da tensão agindo uniaxialmente para as duas amostras.

Tabela 8: Resultado da calibração do ultrassom.

Variável	Média	Desvio padrão	Desvio padrão [MPa]
B_0	$4,25E - 3$	$0,20E - 3$	$\pm 21,5$
R_0	1,82	$0,85E - 3$	± 100
C_B	$-9,54 \text{ MPa}^{-1}$	$0,59E - 6 \text{ MPa}^{-1}$	-
C_R	$8,50 \text{ MPa}^{-1}$	$0,53E - 6 \text{ MPa}^{-1}$	-

4.1.4 Direção de polarização da onda cisalhante

Tomando como referência o trabalho de (OKADA, 1980), a Figura 41 apresenta a direção de polarização após a adição de calor, nas amostras finais. É possível observar que elas possuem um alinhamento preferencial na direção de laminação da chapa.

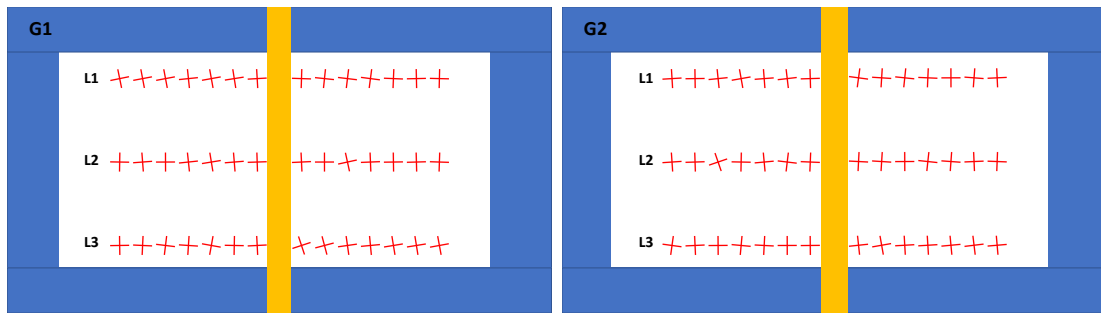


Figura 41: Direção de polarização da onda.

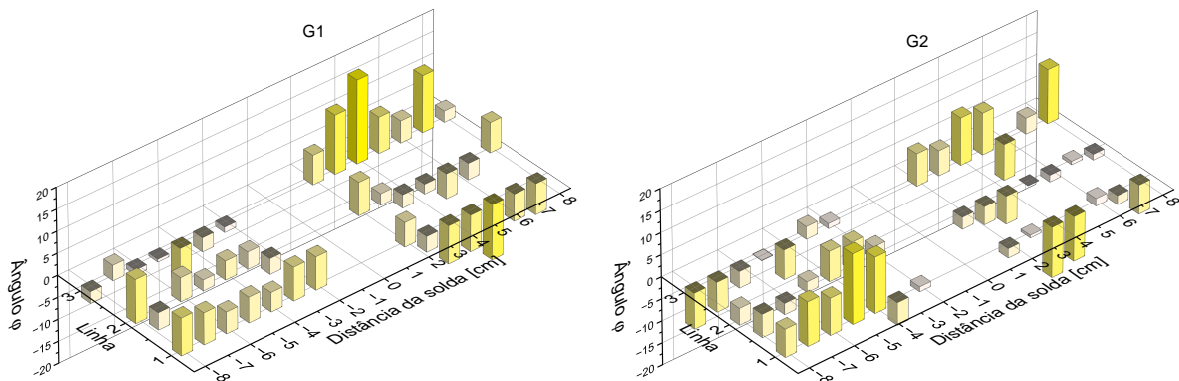


Figura 42: Ângulo φ encontrado nas amostras G1 e G2.

Para se ter uma observação quantitativa de quanto é o desalinhamento da direção de polarização da direção de laminação, foi montando um gráfico de barras (Figura 42). É possível observar que os pontos com maiores φ estão mais distantes da região fundida, principalmente nas linhas 1 e 3. Isso pode ser consequência das tensões residuais preservadas pelos suportes. Na linha 2, o maior alinhamento com a direção de laminação aparenta que as tensões estão agindo sobre o eixo de anisotropia do material.

A linha 2, destacada em negrito na Tabela 9, possui o menor valor de φ , em média, nas duas amostras. Para a amostra G1, os valores de φ médio absoluto são 7,05, 4,71 e 6,37 para as linhas 1, 2 e 3, respectivamente. Da mesma forma, para a amostra G2, φ é 6,77, 3,39 e 6,25. Tal resultado mostra que, caso um componente esteja sendo submetido a esforços agindo na mesma direção que os eixos de anisotropia, não há alteração significativa da direção de polarização, como já demonstrado por (IWASHIMIZU; KUBOMURA, 1973) de forma matemática.

Tabela 9: Ângulo φ médio encontrado nas amostras G1 e G2.

Chapa	L1	L2	L3
G1	7,05	4,71	6,37
G2	6,77	3,39	6,25

4.2 Método de Hirao I

Começando pela consideração mais simples, é necessário calcular a birrefringência com os TOFs na direção paralela e ortogonal à direção de anisotropia do material, com a consideração de que a direção de polarização coincide na mesma direção. Com os TOFs, os valores de referência e as constantes acustoelásticas, é possível calcular a birrefringência e a razão das velocidades e, então, calcular a tensão nas direções 1 e 2, separadamente, sendo que a direção 1 é a direção de laminação 2 é paralela à ela (Figura 37). A Figura 43 mostra as tensões calculadas para cada chapa e direção.

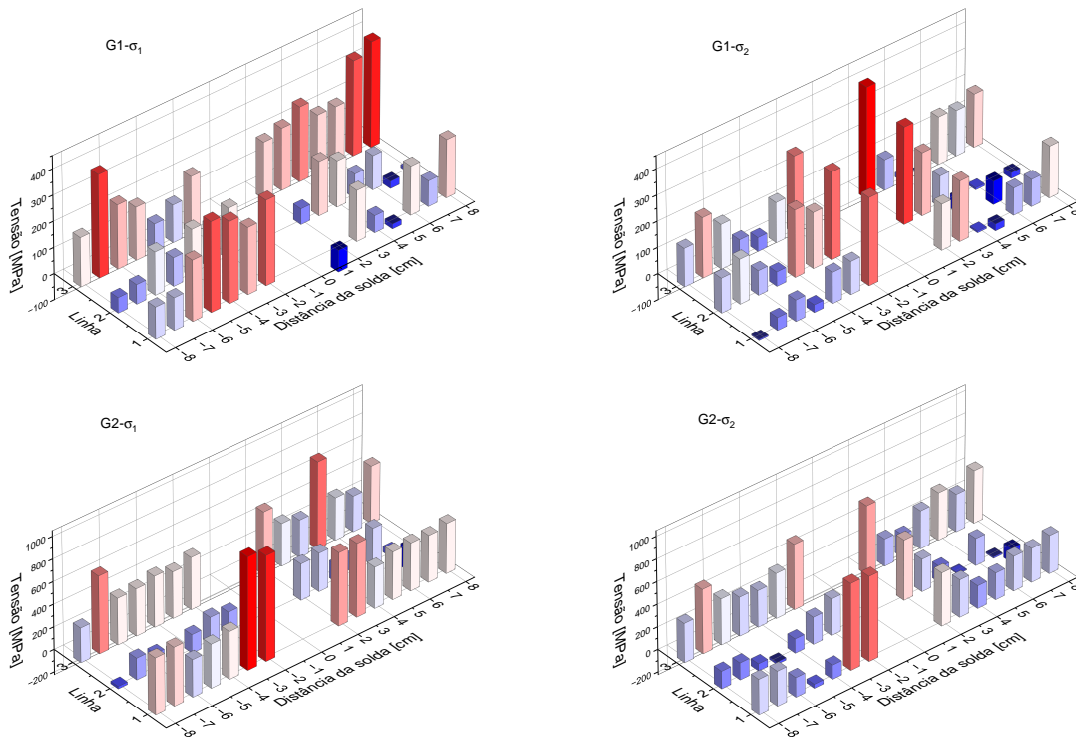


Figura 43: Tensões nas direções 1 e 2 utilizando o método de Hirao I.

É possível observar tensões bem elevadas nas linhas 1 e 3, para ambas as amostras, o que mostra que os suportes preservaram o nível de tensões residuais próximas a elas, conforme mostrou (JAVADI; HASANI; SADEGHI, 2015). Também é possível observar que o σ_2 é bem elevado próximo à região fundida, e cai rapidamente conforme se aumenta a distância, nas duas amostras. σ_1 se mantém com uma tensão mais uniforme, principalmente na amostra G2, se mantendo, também, dentro do esperado, conforme já bem debatido na literatura (ZINN; SCHOLTES, 2002; PARADOWSKA et al., 2009; MURÁNSKY et al., 2012).

4.3 Método de Clark

Para Clark, a equação utilizada considera a direção de polarização da onda φ , mostrada na Figura 41. A onda ultrassônica cisalhante possui uma direção preferencial de propagação. A onda polarizada, ou seja, com as partículas vibrando nessa mesma direção vão se propagar com a maior velocidade. Perpendicular a ela, tem-se a direção em que a onda se propaga com menor velocidade. A Figura 44 mostra o resultado das tensões principais calculadas a partir da equação 3.3. Aqui, θ representa o ângulo entre a direção das tensões e a de laminação, sendo esta ortogonal à direção da zona fundida.

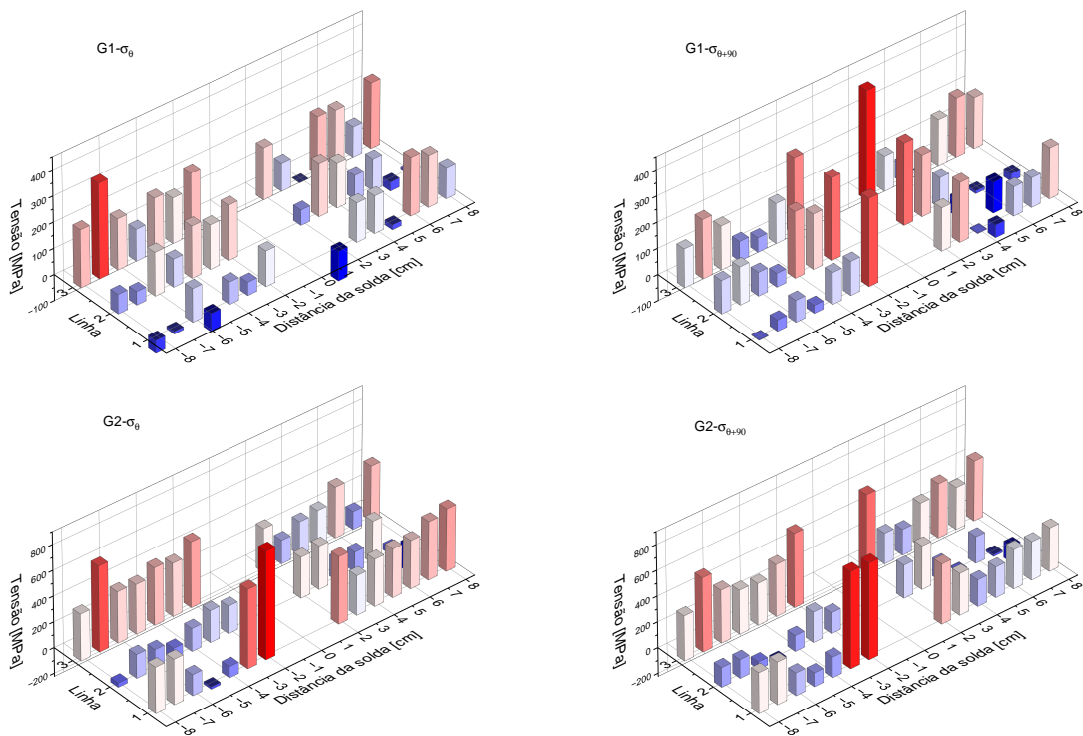


Figura 44: Tensões nas direções 1 e 2 utilizando o método de Clark após normalização.

É possível observar um comportamento semelhante ao método de Hirao I. Na direção 2, há a presença de tensões trativas próximas à região fundida, que tendem à zero. A maior diferença observada em alguns valores está relacionado principalmente à seleção de t_φ e $t_{\varphi+90}$, que alteram consideravelmente o módulo de B , além do produto $B \cos \varphi$.

4.4 Método de Hirao II

A Figura 45 mostra as tensões para cada direção e amostra. Os resultados obtidos aqui se assemelham aos obtidos pelo método de Clark. O sentido das tensões se manteve, assim como o padrão que ela obedece ao longo da linha. A maior diferença observada foi com relação ao módulo de algumas tensões, que, geralmente, são maiores em Clark se comparado com Hirao II.

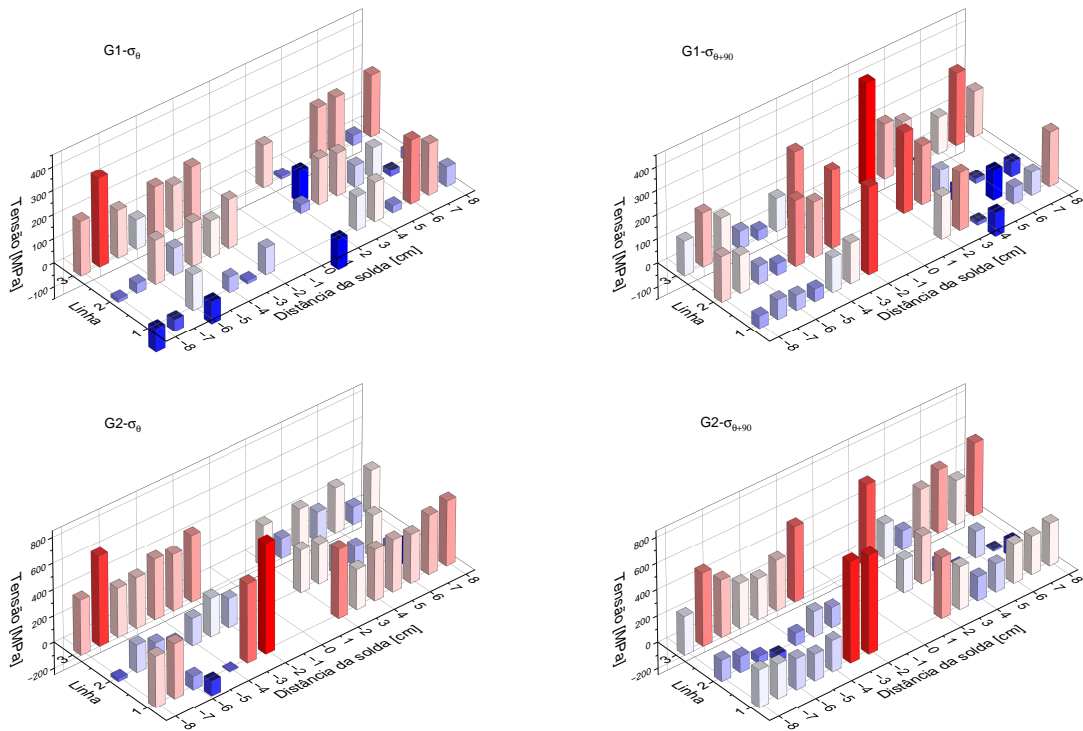


Figura 45: Tensões nas direções 1 e 2 utilizando o método de Hirao II após normalização.

4.4.1 Direção das tensões principais

Ainda neste método (Hirao II), existe a possibilidade de se avaliar o ângulo θ . A Figura 46 apresenta as tensões principais com ângulo θ em relação à direção de anisotropia para uma avaliação qualitativa. O tamanho das semi-retas representa a intensidade da tensão, normalizadas em relação ao quarto maior valor de tensão encontrado, em módulo. O quarto valor foi escolhido para excluir os valores muito elevados de tensão, que ofuscariam os menores valores. Em vermelho, é representado tensões trativas e, em azul, tensões compressivas.

Nessa figura, fica mais fácil enxergar o nível elevado das tensões nas linhas 1 e 3, principalmente na amostra G2. Além disso, há a tendência de tensões bem elevadas na direção 2 próximo à ZTA, reforçando o que foi visto no método Hirao I. Outra observação é a diminuição da dominância das tensões na direção 2 conforme se aumenta a distância da ZTA, que passa a ter tensões mais elevadas na direção 1.

Esse tipo de apresentação de resultados permitiu que fossem observadas tendências que eram esperadas ao se consultar a literatura. De forma qualitativa, os resultados se mostraram bem satisfatórios, diferente do que foi observado até então de forma quantitativa. A tensão de escoamento desse material é cerca de 315 MPa. Os valores máximos de tensão encontrados deveriam estar próximos a este valor (LEGGATT, 2008).

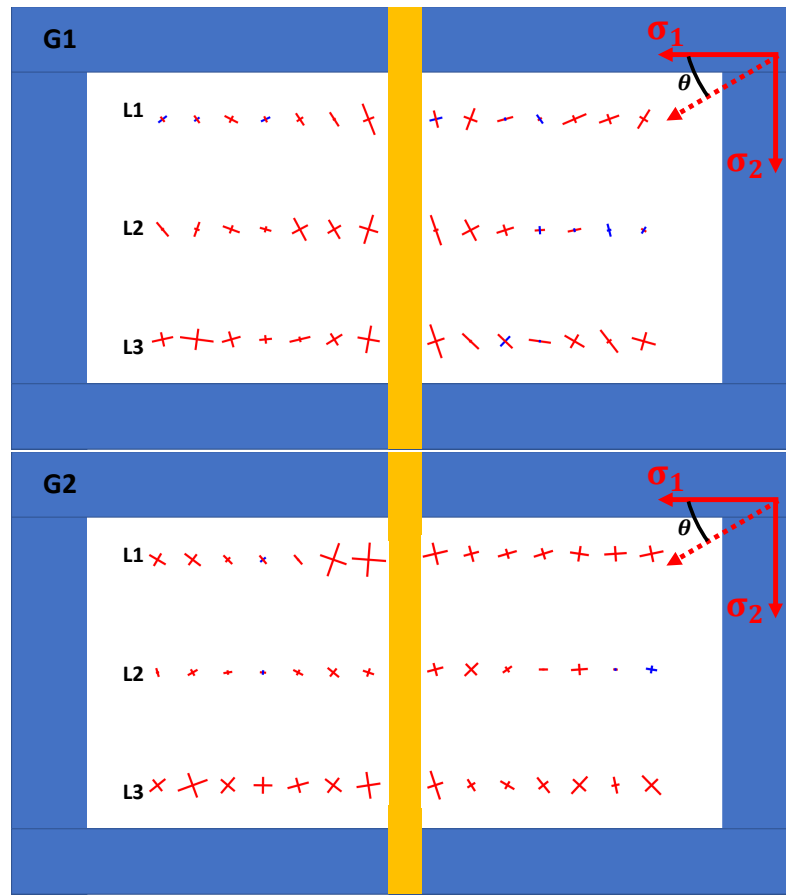


Figura 46: Direção das tensões principais.

4.4.2 Variação das tensões

Apesar das tensões obedecerem a um padrão, as tensões máximas foram bem aquém do que se era esperado. É possível que essas tensões elevadas sejam provenientes de variações inesperadas do sinal de resposta do ultrassom. A Figura 47 apresenta o espectro da amplitude do sinal de resposta do transdutor. A maior quantidade de energia está sendo recebida a 2 MHz. Porém, a frequência de ressonância do transdutor usado nesse trabalho é de 5 MHz, logo, era esperado um pico de energia próximo a esta frequência. Ou seja, há alta atenuação causada pela difração da onda na frequência de 5 Mhz.

É possível que essa grande perda de energia da onda esteja ocorrendo devido à frequência da onda e do tamanho de grão do material (WAN et al., 2017). A influência da atenuação do sinal na avaliação de tensões residuais ainda precisa ser estudada em trabalhos futuros, porém, a perda de energia pode causar distorções no formato da onda, alterando o resultado da tensão.

Um estudo usando transdutores com diferentes frequências deve ser feito, considerando o efeito da frequência de ressonância do transdutor na avaliação de tensões residuais. Além disso, as medições mais próximas à zona fundida estão, provavelmente, sobre a ZTA, região onde a constante acustoelástica sofre alteração devido às mudanças

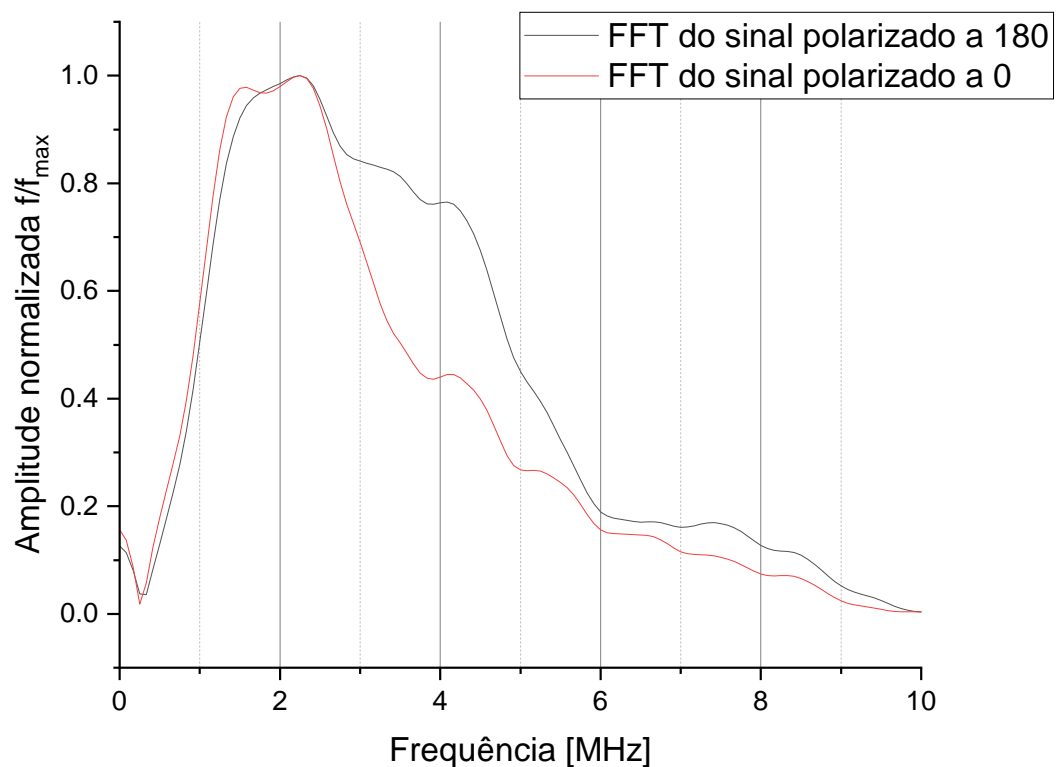


Figura 47: Espectro de amplitude do sinal recebido em função do sentido do transdutor.

microestruturais (JAVADI; AKHLAGHI; NAJAFABADI, 2014). Para tal região, é necessário realizar calibração para a microestrutura resultante do efeito do calor, demanda que necessita ser trabalhada futuramente. Além dessas variações, foram observadas outras variações inesperadas. Porém, como elas não foram escopos desse trabalho, elas foram apresentadas com mais detalhes no Apêndice E.

4.5 Mesclando resultados

Visando fazer uma breve discussão dos resultados de tensão obtidos pelos três métodos, apresentam-se as tensões de forma agrupadas na Figura 48, levando-se em consideração que todas estão na mesma direção. Em linha contínua está a tensão na direção 1, e, para a direção 2, a linha tracejada. Cada cor separa o método de cálculo usado: preto para Hirao I; vermelho para Clark; e azul para Hirao II. A linha com o círculo como símbolo representa o ângulo φ , onde a escala fica à direita do gráfico, variando de -20° a 20° . A linha horizontal preta é a tensão de escoamento do material, a 315 MPa.

Era esperado que os resultados de tensão máxima ficassem próximo ou um pouco acima da tensão de escoamento do material, principalmente próximo da poça de fusão. Esse comportamento foi observado na amostra G1, que obedece a esse padrão em quase todas as linhas, com exceção em um ponto distante da poça de fusão na linha 3 possui tensão maior. Para a amostra G2, as tensões observadas ficaram muito acima da tensão

de escoamento do material nas linhas 1 e 3.

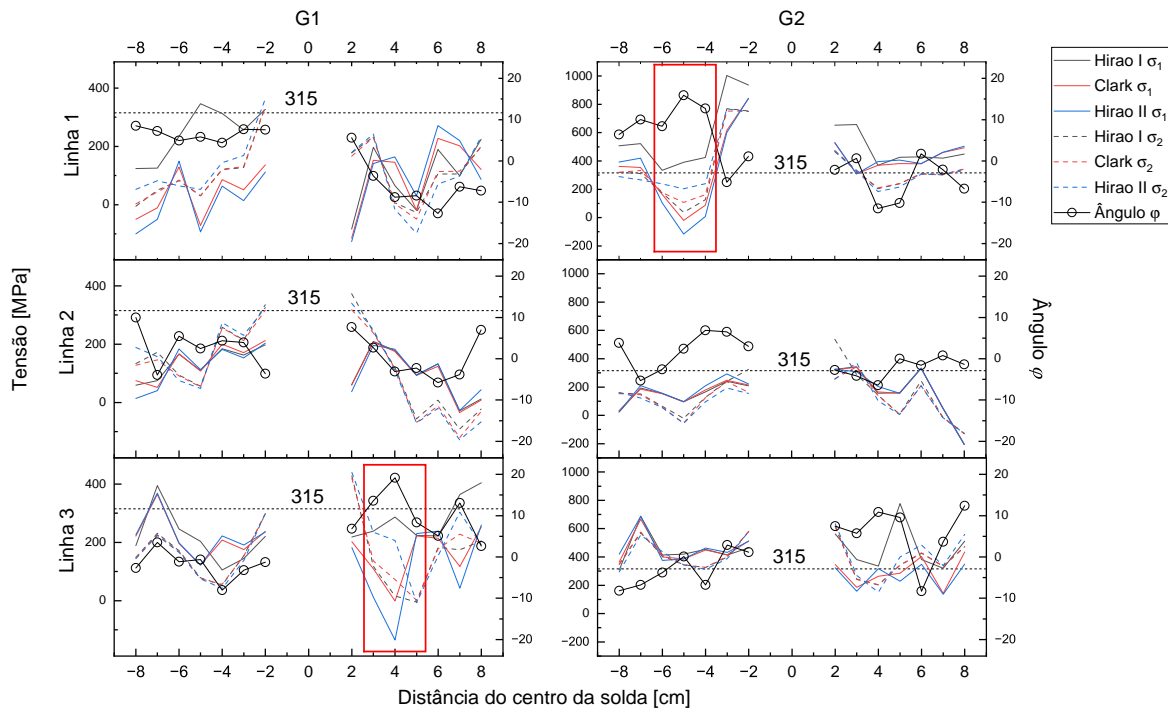


Figura 48: Tensões ao longo da distância do centro da solda para cada linha.

4.5.1 Análise da velocidade de avanço da fonte de calor

Com a variação da velocidade de avanço da fonte de calor, era esperado que a amostra G1, que absorveu mais calor, possuísse maiores valores de tensão que G2, o que não foi observado. G2 apresenta tensões muito mais elevadas que G1, na maior parte dos pontos. Supõe-se que a quantidade de calor absorvida pela amostra G1 foi o suficiente para realizar tratamento térmico na peça, o que reduziu as tensões geradas no processo. Como na amostra G2 a quantidade de calor absorvida foi menor, ela não passou por tratamento, preservando as tensões residuais. Um comportamento similar foi observado, também, em trabalhos como de (TAWFIK; MUTTON; CHIU, 2008), onde houve diminuição das tensões residuais com o aumento da ZTA (aumento do calor inserido) na soldagem de trilhos.

4.5.2 Análise dos métodos aplicados

De forma geral, na maioria dos pontos, não foram observadas grandes diferenças entre os métodos estudados para a medição de tensão residual geradas por TIG. As maiores diferenças são observadas em regiões onde o ângulo φ é elevado. Os retângulos vermelhos destacam duas regiões onde φ fica em torno ou acima de 10° . Nessas regiões, as tensões

variam cerca de 200 MPa, mostrando a importância de se determinar o ângulo de polarização da onda. Essa diferença não está restrita apenas à introdução do ângulo φ na equação, mas, também, da substituição de t_1 por t_φ e de t_2 por $t_{\varphi+90}$.

Isso mostra que, caso as tensões estejam alinhadas com a direção de anisotropia do material, não se há necessidade de se optar métodos que necessitem a determinação no ângulo φ . Porém, o contrário também se aplica. Com as tensões principais mais distantes do eixo de anisotropia, conhecer φ é essencial.

Em suma, o método Hirao I apresenta resultados satisfatórios de forma rápida. Caso as tensões estejam alinhadas com a direção de anisotropia do material, não haverá muita diferença com relação aos outros métodos. Porém, caso o estado plano de tensões se apresente fora do eixo de anisotropia, maior será o erro obtido por esse método. Neste caso, utilizam-se os métodos Clark e Hirao II. Porém, ao utilizá-los, o tempo de medição aumenta consideravelmente, já que há a necessidade de se encontrar o ângulo φ . Apesar dos métodos Clark e Hirao II dependerem do ângulo φ , eles possuem resultados de tensão diferentes para maiores valores dessa variável. Caso se faça necessário conhecer a direção das tensões principais, o método Hirao II deve ser usado.

5 | Conclusão

Este trabalho teve como objetivo a determinação do estado plano das tensões residuais através da combinação de ondas ultrassônicas cisalhantes e compressivas através de diversos métodos. Para isso, chapas de aço ASTM A131 tiveram tensões residuais induzidas ao se introduzir calor com uma fonte de soldagem TIG. A calibração do ultrassom foi feita em amostras separadas. Além disso, *softwares* para medição e tratamento dos dados foram desenvolvidos e um equipamento para o apoio do transdutor foi construído. Tendo isso, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Os valores de referência B_0 e R_0 determinados na chapa G3 foram de $4,25E - 3 \pm 0,20E - 3$ e $1,82 \pm 0,85E - 3$, respectivamente;
- As constantes acustoelásticas médias C_B e C_R determinadas nas amostras 1 e 2 $-9,54 \text{ MPa}^{-1}$; e $8,50 \text{ MPa}^{-1}$, respectivamente;
- As tensões calculadas pelos três métodos obedecem padrões parecidos, onde foram observadas tensões bem elevadas próximo à zona fundida, preferencialmente na direção paralela ao cordão. As tensões diminuem rapidamente ao se afastar do centro da zona fundida, onde, também, há a mudança da predominância na direção da tensão, que se torna maior perpendicular ao cordão. Além disso, foram observadas maiores tensões próximo aos suportes, mostrando que eles preservaram as tensões originadas no processo;
- A direção preferencial de propagação da onda ultrassônica se mantém bem próxima à direção de laminação das chapas (ângulo φ), mostrando que a tensão fora do eixo de anisotropia do material não possui grande influência na direção preferencial de propagação. Apesar disso, foi observado que houve um menor valor de φ na linha 2, em comparação com as linhas 1 e 3, mostrando que houve influência do suporte sobre as tensões, resultando no aumento desse ângulo. Essa diferença resultou, em termos da tensão, cerca de 200 MPa de diferença em alguns pontos, mostrando o quão grande pode ser a influência da direção preferencial sobre o resultado das tensões;
- O método de Hirao I se mostrou muito similar aos outros, principalmente quando o valor de φ no ponto foi baixo. Isso mostra que, tendo componentes submetidos a tensões uniaxiais ou a um estado plano de tensões sobre o eixo de anisotropia, não há necessidade de fazer a varredura para encontrar o ângulo φ . Isso permite que as tensões sejam avaliadas de forma bem mais rápida. Porém, em caso de tensões fora do eixo de anisotropia, a varredura é essencial, apesar de aumentar bastante o tempo de medição.

5.1 Contribuições tecnológicas

- O *software* desenvolvido para aquisição do sinal e controle do Arduino e osciloscópio permite ao grupo continuar, de forma independente, as medições de tensão por ultrassom, com a capacidade de se expandir para trabalhos mais complexos;
- Os dados aquisitados podem ser tratados rapidamente através dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho;
- Os resultados obtidos, agora, são quantitativos, sendo possível obter o módulo, direção e sentido das tensões.

6 | Propostas para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos e das observações feitas, são listadas propostas de trabalhos futuros dentro dessa área:

- Verificar a repetibilidade do ensaio;
- Verificar a influência de outras variáveis no momento da medição, como temperatura, força de aperto do transdutor, tipo de acoplante;
- Integrar os *softwares* para aquisição de sinal e processamento, para que o resultado de saída do processo de medição seja a tensão;
- Verificar a influência da condição da superfície na exatidão das medições de tensão por ultrassom;
- Verificar a influência da frequência de ressonância do transdutor na avaliação de tensões residuais;
- Realizar o mesmo trabalho utilizando o domínio da frequência ao invés do domínio do tempo. Alguns autores mostram que o uso da frequência aumenta a confiabilidade das medições;
- Validar os resultados obtidos por técnicas já consolidadas, com alto poder de penetração, como difração de nêutrons ou de sincrotron;

Referências

- LASMIS, J. Lu. Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress Problem. In: TOTTEN, G.; HOWES, M.; INUE, T. (Ed.). **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. Materials Park, Ohio 44073-0002: ASM International, 2002. cap. 2, p. 11–26. ISBN 0-87170-729-2.
- PELLIZZARI, M.; DE FLORA, M. G. Influence of laser hardening on the tribological properties of forged steel for hot rolls. **Wear**, Elsevier B.V., v. 271, n. 9-10, p. 2402–2411, 2011. ISSN 00431648. DOI: [10.1016/j.wear.2011.01.044](https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.044).
- LV, You; LEI, Liqun; SUN, Lina. Effect of shot peening on the fatigue resistance of laser surface melted 20CrMnTi steel gear. **Materials Science and Engineering A**, v. 629, p. 8–15, 2015. ISSN 09215093. DOI: [10.1016/j.msea.2015.01.074](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.074).
- HUGHES, Do S; KELLY, JL. Second-order elastic deformation of solids. **Physical review**, American Physical Society, v. 92, n. 5, p. 1145, 1953. DOI: [10.1103/PhysRev.92.1145](https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145).
- HE, Jingbo et al. Comparison of the Lcr wave TOF and shear-wave spectrum methods for the uniaxial absolute stress evaluation of steel members. **Structural Control and Health Monitoring**, Wiley Online Library, v. 26, n. 6, e2348, 2019. DOI: [10.1002/stc.2348](https://doi.org/10.1002/stc.2348).
- EGLE, DM; BRAY, DE. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. **The journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 60, n. 3, p. 741–744, 1976. DOI: [10.1121/1.381146](https://doi.org/10.1121/1.381146).
- HIRAO, Masahiko; OGI, Hirotsugu. **Electromagnetic Acoustic Transducers**. [S.l.]: Springer, jan. 2017. ISBN 978-4-431-56034-0. DOI: [10.1007/978-4-431-56036-4](https://doi.org/10.1007/978-4-431-56036-4).
- CLARK, AV; SCHAPS, SR. Acoustoelastic determination of residual stress by measurement of resonance peaks and phase shifts. **Journal of nondestructive evaluation**, Springer, v. 17, n. 2, p. 89–102, 1998. DOI: [10.1007/BF02995486](https://doi.org/10.1007/BF02995486).
- LI, Zuohua et al. Absolute stress measurement of structural steel members with ultrasonic shear-wave spectral analysis method. **Structural Health Monitoring**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 18, n. 1, p. 216–231, 2019. DOI: [10.1177/1475921717746952](https://doi.org/10.1177/1475921717746952).
- IWASHIMIZU, Y; KUBOMURA, K. Stress-induced rotation of polarization directions of elastic waves in slightly anisotropic materials. **International Journal of Solids and Structures**, Elsevier, v. 9, n. 1, p. 99–114, 1973. DOI: [10.1016/0020-7683\(73\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0020-7683(73)90035-8).

- BARILE, Iury K. P. **Medição do campo de tensões em trilhos por ultrassom**. [S.l.: s.n.], 2021. Experimentos preliminares. Engenheiro com mestrado em engenharia industrial.
- BHADESHIA, H. K. D. H. Material Factors. In: TOTTEN, G.; HOWES, M.; INUE, T. (Ed.). **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. Materials Park, Ohio 44073-0002: ASM International, 2002. cap. 1, p. 3–10. ISBN 0-87170-729-2.
- TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. United States of America: ASM International, 2002. ISBN 0-87170-729-2.
- SCHAJER, Gary S.; RUUD, Clayton O. **Practical Residual Stress Measurement Methods**. Edição: Gary S. Schajer. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, ago. 2013. ISBN 9781118402832. DOI: [10.1002/9781118402832](https://doi.org/10.1002/9781118402832).
- KRAUSS, George. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. Edição: George Krauss. 2. ed. Materials Park, Ohio, United States: ASM International, 2015. ISBN 978-1-62708-083-5.
- EBERT, L. J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steels. **Metallurgical Transactions A**, v. 9, n. 11, p. 1537–1551, 1978. ISSN 03602133. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02661936>.
- SAMIH, Y. et al. Microstructure modifications and associated hardness and corrosion improvements in the AISI 420 martensitic stainless steel treated by high current pulsed electron beam (HCPEB). **Surface and Coatings Technology**, Elsevier B.V., v. 259, PC, p. 737–745, 2014. ISSN 02578972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2014.09.065](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.065).
- LEE, M. K. et al. Control of surface hardnesses, hardening depths, and residual stresses of low carbon 12Cr steel by flame hardening. **Surface and Coatings Technology**, v. 184, n. 2-3, p. 239–246, 2004. ISSN 02578972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2003.10.063](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.063).
- SANTOS, EC et al. Fatigue strength improvement of aisi E52100 bearing steel by induction heating and repeated quenching. **Materials Science**, v. 47, n. 5, p. 677–682, 2012. ISSN 1573885X. DOI: [10.1007/s11003-012-9443-8](https://doi.org/10.1007/s11003-012-9443-8).
- CHANG, Seky; PYUN, Young Sik; AMANOV, Auezhan. Wear enhancement of wheel-rail interaction by ultrasonic nanocrystalline surface modification technique. **Materials**, v. 10, n. 2, 2017. ISSN 19961944. DOI: [10.3390/ma10020188](https://doi.org/10.3390/ma10020188).
- RADAJ, Dieter. **Heat Effect of Welding**. [S.l.]: Springer, 1992. ISBN 978-3-642-48642-5. DOI: [10.1007/978-3-642-48640-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48640-1).

- MARQUES, Paulo V.; MONDENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2009. ISBN 978-85-7041-748-0.
- ZINN, W.; SCHOLTES, B. Residual Stress Formation Processes during Welding and Joining. In: TOTTEN, G.; HOWES, M.; INUE, T. (Ed.). **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. Materials Park, Ohio 44073-0002: ASM International, 2002. cap. 5, p. 391–396. ISBN 0-87170-729-2.
- JAVADI, Yashar; HASANI, Mahmood; SADEGHI, Seyedali. Investigation of clamping effect on the welding sub-surface residual stress and deformation by using the ultrasonic stress measurement and finite element method. **Journal of Nondestructive Evaluation**, Springer, v. 34, n. 1, p. 1–11, 2015. DOI: [10.1007/s10921-015-0277-9](https://doi.org/10.1007/s10921-015-0277-9).
- FARAJIAN, M et al. Residual stress field determination in welds by means of X-ray, synchrotron and neutron diffraction. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Wiley Online Library, v. 42, n. 11, p. 996–1001, 2011. DOI: [10.1002/mawe.201100782](https://doi.org/10.1002/mawe.201100782).
- MOAVENI, Saeed. **Finite element analysis: Theory and Application with ANSYS**. [S.l.]: Pearson Education, 2015. ISBN 0-273-77430-1.
- BRAY, Don E.; STANLEY, Roderic K. **Nondestructive Evaluation: A Tool in Desing, Manufacturing, and Service**. [S.l.]: Taylor & Francis, 1996. ISBN 0-8493-2655-9.
- ALBUQUERQUE, Lucas. **Metodologia para a determinação das constantes acustoelásticas em trilhos ferroviários acustoelásticas em trilhos ferroviários**. 2019. Graduação – Universidade Federal do Pará.
- FELICE, Maria V; FAN, Zheng. Sizing of flaws using ultrasonic bulk wave testing: A review. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 88, p. 26–42, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830917080046>.
- SANO, Mitsuhiro et al. Measurement of Material Properties of Steel Sheets Using Laser Ultrasonic Technology. **Procedia Engineering**, v. 81, p. 1414–1419, 2014. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. ISSN 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.166>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814014453>.
- HUBEL, Sebastian et al. Ultrasonic evaluation of residual stresses in aero engine materials using bulk and Rayleigh surface waves. v. 1581, n. 1, p. 607–614, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4864876>.

JAVADI, Yashar; AKHLAGHI, Mehdi; NAJAFABADI, Mehdi Ahmadi. Nondestructive Evaluation of Welding Residual Stresses in Austenitic Stainless Steel Plates. **Research in Nondestructive Evaluation**, Taylor & Francis, v. 25, n. 1, p. 30–43, 2014. DOI: [10.1080/09349847.2013.822134](https://doi.org/10.1080/09349847.2013.822134).

DEMI, M. 2.12 - The Basics of Ultrasound. In: BRAHME, Anders (Ed.). **Comprehensive Biomedical Physics**. Oxford: Elsevier, 2014. P. 297–322. ISBN 978-0-444-53633-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53632-7.00213-6>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444536327002136>.

BADIDI BOUDA, A.; LEBAILI, S.; BENCHAAALA, A. Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation. **NDT E International**, v. 36, n. 1, p. 1–5, 2003. ISSN 0963-8695. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00043-9).

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869502000439>.

AKI, Keiiti; RICHARDS, Paul. **Quantitative Seismology, 2nd edition**. 2. ed. Sausalito, CA: University Science Books, set. 2002. ISBN 978-1-891389-63-4.

SMITH, RT. Stress-induced anisotropy in solids—the acousto-elastic effect. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 1, n. 3, p. 135–147, 1963. DOI: [10.1016/0041-624X\(63\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(63)90003-9).

MURNAGHAN, Francis Dominic. Finite deformations of an elastic solid. **American Journal of Mathematics**, JSTOR, v. 59, n. 2, p. 235–260, 1937. DOI: [10.2307/2371405](https://doi.org/10.2307/2371405).

BERGMAN, RH; SHAHBENDER, RA. Effect of statically applied stresses on the velocity of propagation of ultrasonic waves. **Journal of Applied Physics**, American Institute of Physics, v. 29, n. 12, p. 1736–1738, 1958. DOI: [10.1063/1.1723035](https://doi.org/10.1063/1.1723035).

BENSON, R.W.; RAELSON, V.J. Acoustoelasticity. **Production Engineering**, v. 30, p. 56–59, 1959.

CRECRAFT, DI. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. **Journal of Sound and Vibration**, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 173–192, 1967. DOI: [10.1016/0022-460X\(67\)90186-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90186-1).

HSU, Nelson N. Acoustical birefringence and the use of ultrasonic waves for experimental stress analysis. **Experimental Mechanics**, Springer, v. 14, n. 5, p. 169–176, 1974.

CLARK, AV; MIGNOGNA, RB. A comparison of two theories of acoustoelasticity. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 21, n. 5, p. 217–225, 1983. DOI: [10.1016/0041-624X\(83\)90045-8](https://doi.org/10.1016/0041-624X(83)90045-8).

- OKADA, Kenichi. Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique. **Journal of the Acoustical Society of Japan (E)**, v. 1, n. 3, p. 193–200, 1980. ISSN 03882861. DOI: [10.1250/ast.1.193](https://doi.org/10.1250/ast.1.193).
- IMANISHI, Etsujiro; SASABE, Mitsuo; IWASHIMIZU, Yukio. Experimental study on acoustical birefringence in stressed and slightly anisotropic materials. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 71, n. 3, p. 565–572, 1982. DOI: [10.1121/1.387526](https://doi.org/10.1121/1.387526).
- SAYERS, CM; ALLEN, DR. The influence of stress on the principal polarisation directions of ultrasonic shear waves in textured steel plates. **Journal of Physics D: Applied Physics**, IOP Publishing, v. 17, n. 7, p. 1399, 1984. DOI: [10.1088/0022-3727/17/7/014](https://doi.org/10.1088/0022-3727/17/7/014).
- ALLEN, DR; SAYERS, CM. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 22, n. 4, p. 179–188, 1984. DOI: [10.1016/0041-624X\(84\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(84)90034-9).
- HIRAO, Masahiko; FUKUOKA, Hidekazu; MURAKAMI, Yoshinori. Resonance acoustoelasticity measurement of stress in thin plates. **Research in Nondestructive Evaluation**, Springer, v. 4, n. 3, p. 127–138, 1992. DOI: [10.1007/BF01617523](https://doi.org/10.1007/BF01617523).
- HIRAO, Masahiko; OGI, H; FUKUOKA, H. Resonance EMAT system for acoustoelastic stress measurement in sheet metals. **Review of Scientific Instruments**, American Institute of Physics, v. 64, n. 11, p. 3198–3205, 1993. DOI: [10.1063/1.1144328](https://doi.org/10.1063/1.1144328).
- HIRAO, M; OGI, H; FUKUOKA, H. Advanced ultrasonic method for measuring rail axial stresses with electromagnetic acoustic transducer. **Research in Nondestructive Evaluation**, Springer, v. 5, n. 3, p. 211–223, 1994. DOI: [10.1007/BF01606409](https://doi.org/10.1007/BF01606409).
- FUKUOKA, H et al. Nondestructive assessments of residual stresses in railroad wheel rim by acoustoelasticity, 1985. DOI: [10.1115/1.3185999](https://doi.org/10.1115/1.3185999).
- PALANICHAMY, P et al. Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel. **NDT & E International**, Elsevier, v. 28, n. 3, p. 179–185, 1995. DOI: [10.1016/0963-8695\(95\)00011-L](https://doi.org/10.1016/0963-8695(95)00011-L).
- DUQUENNOY, Marc et al. Influence of natural and initial acoustoelastic coefficients on residual stress evaluation: Theory and experiment. **Journal of applied physics**, American Institute of Physics, v. 86, n. 5, p. 2490–2498, 1999. DOI: [10.1063/1.371082](https://doi.org/10.1063/1.371082).
- BITTENCOURT, Marcelo de Siqueira Queiroz et al. Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido da onda ultra-sônica e análise do estado de tensões em materiais metálicos pela técnica da birrefringência acústica. Instituto de Engenharia Nuclear, 2000.

JAVADI, Yashar; AFZALI, Omid et al. Nondestructive evaluation of welding residual stresses in dissimilar welded pipes. **Journal of Nondestructive Evaluation**, Springer, v. 32, n. 2, p. 177–187, 2013. DOI: [10.1007/s10921-013-0171-2](https://doi.org/10.1007/s10921-013-0171-2).

JAVADI, Yashar; AZARI, Khaled et al. Comparison between using longitudinal and shear waves in ultrasonic stress measurement to investigate the effect of post-weld heat-treatment on welding residual stresses. **Research in Nondestructive Evaluation**, The American Society for Nondestructive Testing, v. 28, n. 2, p. 101–122, 2017.

WANG, Yingzhu et al. Combination of transverse and longitudinal ultrasonic waves for plane stress measurement of steel plates. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 188, p. 108500, 2022. DOI: [10.1016/j.apacoust.2021.108500](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108500).

MORA, P.; SPIES, M. Perturbation theory for acoustoelastic effects in heterogeneous media. **Wave Motion**, v. 86, p. 1–10, 2019. ISSN 0165-2125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2018.12.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165212518303275>.

COSTA, E. S. et al. Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, Taylor & Francis, v. 22, n. 8, p. 706–713, 2017. DOI: [10.1080/13621718.2017.1306014](https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1306014).

COSTA, EDNELSON DA SILVA. **Avaliação De Tensões Residuais Em Soldas GMAW E GMAW-CW Por Birrefringência Acústica E Difração De Raio X**. 2017. F. 234. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará.

RAVISANKAR, A et al. Influence of welding speed and power on residual stress during gas tungsten arc welding (GTAW) of thin sections with constant heat input: A study using numerical simulation and experimental validation. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 200–211, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.11.002>.

KOU, Sindou. **Welding metallurgy**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2002. ISBN 0-471-43491-4.

VANGI, D; VIRGA, A. A practical application of ultrasonic thermal stress monitoring in continuous welded rails. **Experimental mechanics**, Springer, v. 47, n. 5, p. 617–623, 2007. DOI: [10.1007/s11340-006-9016-6](https://doi.org/10.1007/s11340-006-9016-6).

PARADOWSKA, A M et al. Residual stress distribution in steel butt welds measured using neutron and synchrotron diffraction. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 21, n. 12, p. 124213, 2009. DOI: [10.1088/0953-8984/21/12/124213](https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/12/124213). Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/21/12/124213>.

- MURÁNSKY, Ondrej et al. Comprehensive numerical analysis of a three-pass bead-in-slot weld and its critical validation using neutron and synchrotron diffraction residual stress measurements. **International Journal of Solids and Structures**, Elsevier, v. 49, n. 9, p. 1045–1062, 2012.
- LEGGATT, R.H. Residual stresses in welded structures. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 85, n. 3, p. 144–151, 2008. Special Issue: The Impact of Secondary and Residual Stresses on Structural Integrity. ISSN 0308-0161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.10.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016107001391>.
- WAN, Tao et al. Effects of Grain Size on Ultrasonic Attenuation in Type 316L Stainless Steel. **Materials**, v. 10, n. 7, 2017. ISSN 1996-1944. DOI: [10.3390/ma10070753](https://doi.org/10.3390/ma10070753). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/7/753>.
- TAWFIK, David; MUTTON, Peter John; CHIU, Wing Kong. Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localised rapid post-weld heat treatment. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 196, n. 1, p. 279–291, 2008. ISSN 0924-0136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.055>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607005651>.
- DAVIS, Joseph R; MILLS, KM; LAMPMAN, SR. Metals handbook. Vol. 1. Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. **ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA, 1990. 1063**, 1990.
- RUANO, Shirley. **Avaliação de tensões residuais em soldas FSW em alumínio 7050 utilizando acustoelasticidade**. 2017. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

A | Testes de parâmetros para adição de calor

O objetivo desse teste foi encontrar parâmetros de adição de calor que aumentassem ao máximo a quantidade de calor que a peça recebia da fonte de calor, evitando que a poça de fusão atravessasse-a. Foram preparadas peças de sacrifício, com dimensões 20 cm x 10 cm. As velocidades de avanço da tocha foram 3, 5, 7 e 10 cm/min. A Figura 1 apresenta o resultado do experimento. Na velocidade 3 cm/min, a região fundida atravessou a espessura da peça, inviabilizando o uso dessa velocidade. Portanto, a menor velocidade escolhida foi de 5 cm/min, pois esta garantia que a amostra fosse destruída no processo.



Figura 1: Testes preliminares da velocidade de adição de calor.

B | Software para tratamento dos dados

O *software* para tratamento dos dados foi desenvolvido de modo a se acelerar a quantidade de dados obtida na aquisição do sinal ultrassônico. A ideia desse software é ler todos os sinais adquiridos nos pontos feitos em uma região, para cada ângulo, realizar o tratamento do sinal, realizar os cálculos para determinar o tempo de propagação da onda e as frequências características. O código-fonte do software para tratamento dos dados está disponibilizado no GitHub, e pode ser acessado a partir deste [link](#).

Para tal, foi utilizada a linguagem Python em conjunto com os pacotes numpy, scipy e cupy. Essa linguagem em conjunto com os pacotes permitem a realização do tratamento dos dados de forma mais simples. O numpy permite a leitura e tratamento dos dados como se estivesse trabalhando com matrizes. O scipy é um conjunto de algoritmos matemáticos que utilizam o numpy como base. Eles poupam tempo de desenvolvimento e processamento, visto que não é necessário conhecer toda a implementação para ser usado. Por último, o pacote principal utilizado foi o cupy. Este tem a função de substituir o numpy e o scipy em algumas funções específicas. Essas funções são, agora, processadas pela placa de vídeo ao invés do processador. Essa troca acelerou o processamento dos dados em quase 9 vezes.

De forma resumida, o software lê um sinal e faz os seguintes processamentos: remoção do pico inicial, sendo este o pulso inicial que excita o cristal do transdutor; aproximação da média do sinal para zero; aplicação de um filtro de amplitude, que iguala a 0 o que é considerado ruído no sinal. A partir daí, busca-se isolar dois ecos consecutivos, detectando seus picos. Com a posse de dois ecos isolados, usa-se o método da correlação cruzada para encontrar o tempo de propagação de percurso da onda.

C | Propriedades mecânicas

Conforme a norma ASTM E494, tendo a densidade do material e as velocidades da onda compressiva e cisalhante, é possível calcular alguns parâmetros do material: o módulo de Young E ; o coeficiente de poisson ν ; o módulo de cisalhamento G e o módulo volumétrico κ . As equações C.1 apresentam como calcular tais parâmetros através das velocidades de onda compressiva e cisalhante. A velocidade cisalhante foi calculada a partir do valor médio do TOF com a onda polarizada paralela e perpendicular com a direção de laminação. O resultado médio, com desvio padrão, é mostrado na Tabela 1, incluindo os valores de referência, para comparação.

É possível observar que os parâmetros calculados foram bem próximas aos valores tabelados, mostrando que a relação da velocidade da onda está estritamente relacionada às propriedades do material. Esse resultado indica que o *software* pôde medir o TOF com exatidão suficiente para calcular as propriedades mecânicas.

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{1 - 2 \left(\frac{V_S}{V_C}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{V_S}{V_C}\right)^2\right)} \\ E &= \frac{\rho V_S^2 (3V_C^2 - 4V_S^2)}{V_C^2 - V_S^2} \\ G &= \rho V_S^2 \\ \kappa &= \rho (V_C^2 - (4/3)V_S^2)\end{aligned}\tag{C.1}$$

Tabela 1: Parâmetros do material calculados por ultrassom.

Material	ν	E	G	κ
Aço ASTM A131	0,29	200 GPa	80 GPa	160 GPa
Parâmetro calculado	0,287±7,85E-4	212±0,85 GPa	82,3±0,33 GPa	166±0,93 GPa

Fonte: (DAVIS; MILLS; LAMPMAN, 1990)

D | Diferença da calibração

Para escolher qual valor de birrefringência inicial deveria ser usado, foi feita a comparação entre os valores obtidos nas diagonais e do centro com os valores de birrefringência final obtido nas chapas soldadas. A Figura 2 apresenta a birrefringência calculada para cada região, com seus respectivos desvios padrões. Pode-se observar que a birrefringência medida no centro da chapa de referência possui um desvio padrão menor e média mais próxima da birrefringência medida nas chapas soldadas. Isso pode ser consequência de que, ao se medir a birrefringência próximo das extremidades diagonais, a birrefringência é alterada devido ao alívio da tensão. Como, nesse trabalho, o objetivo é verificar as tensões residuais causadas pela adição de calor e como a tensão calculada depende da referência inicial, se for usado a birrefringência das diagonais, a diferença do valor de referência com o final irá considerar as tensões geradas no processo de fabricação somado com as tensões geradas pelo gradiente de calor elevado. Portanto, o B_0 escolhido foi o medido no centro da chapa.

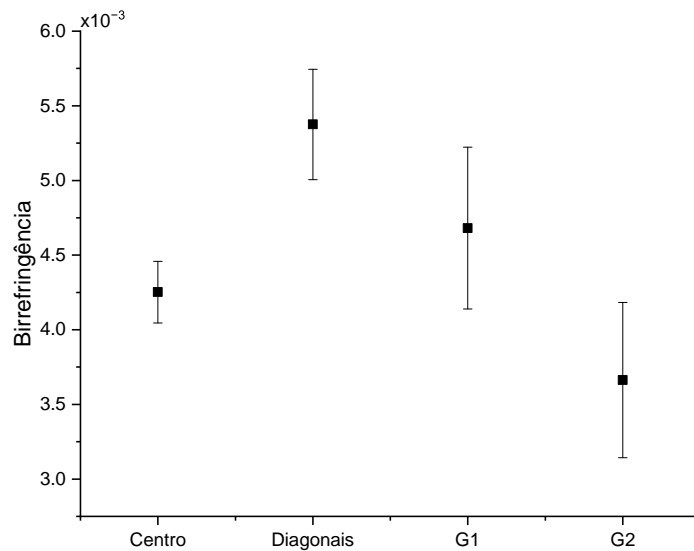


Figura 2: Birrefringência média calculada em cada amostra.

E | Análise do sinal de resposta

Ao se analisar os dados, foi observada uma resposta inesperada: a mudança do formato de resposta do sinal da onda cisalhante em função do sentido do transdutor. A Figura 3 apresenta os ecos 1 e 2 como sinais de resposta do ponto 9 na linha 2 com o transdutor direcionado a 0° e a 180° como exemplo, com um *offset* de tensão de 0,6 V. Era esperado um sinal de resposta igual nos dois sentidos, porém, o que foi obtido é bastante diferente. A primeira observação a ser feita é a diferença de amplitude do sinal. Inicialmente, a onda polarizada a 0° possui uma tensão máxima de cerca de 0,2 V. A 180° , a onda possui tensão máxima de 0,4 V, o que mostra que mais energia chegou ao transdutor. Além disso, o formato da onda também está diferente para cada sentido de polarização.

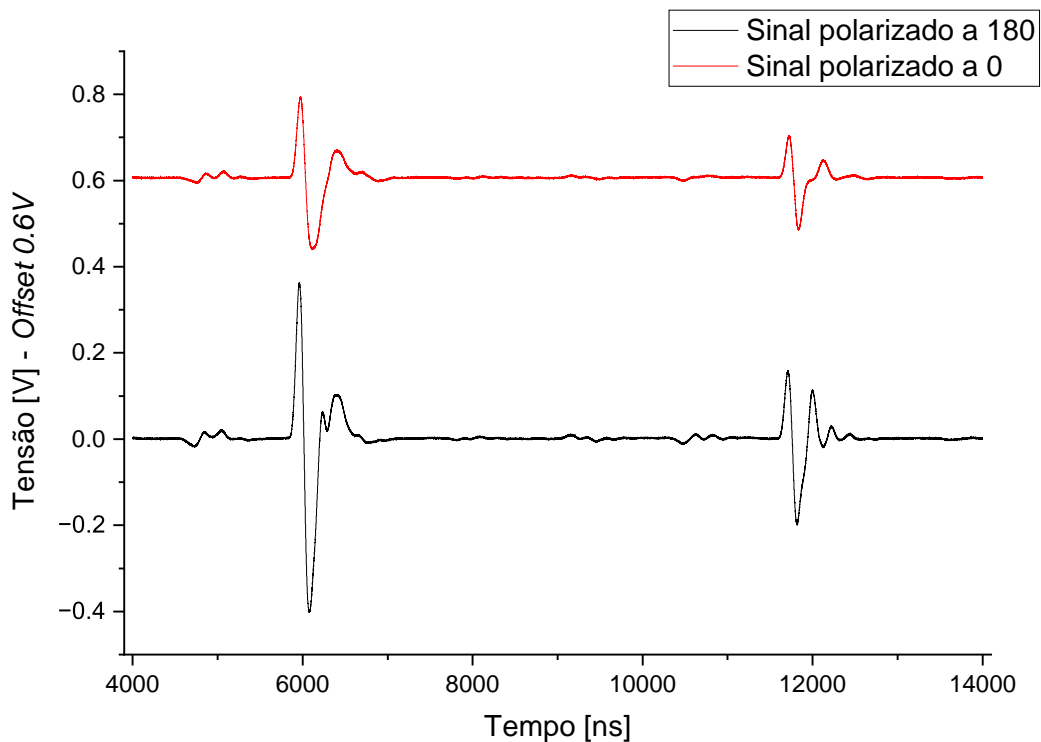


Figura 3: Sinal recebido em função do sentido de polarização do transdutor de ondas cisalhantes.

Para entender melhor a alteração do formato da onda, aplicou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre um eco isolado, conforme mostra a Figura 4, que apresenta o espectro de amplitude do sinal. A amplitude do sinal foi normalizada pela maior amplitude da resposta. Era esperado que ambos sinais de resposta fossem bem similares, porém, os dois diferem bastante, principalmente na quantidade de energia a 4 MHz. Essa diferença ocorreu em todos os pontos de medição, com mais ou menos intensidade.

Uma possível hipótese é que isso possa estar relacionado com a condição da superfície, que foi lixada manualmente e não retificada, porém, a repetição desse efeito em todos os

pontos indica que algo além da condição da superfície está o ocasionando. A segunda suposição é a diminuição da camada de acoplante ao longo do tempo. Como o tempo de medição para cada ponto é cerca de 20 minutos para cada ponto, o que permite com que o acoplante escoe para fora da camada entre o transdutor e a peça. Isso justifica o aumento da amplitude do sinal na Figura 3, mas não a mudança no formato da onda.

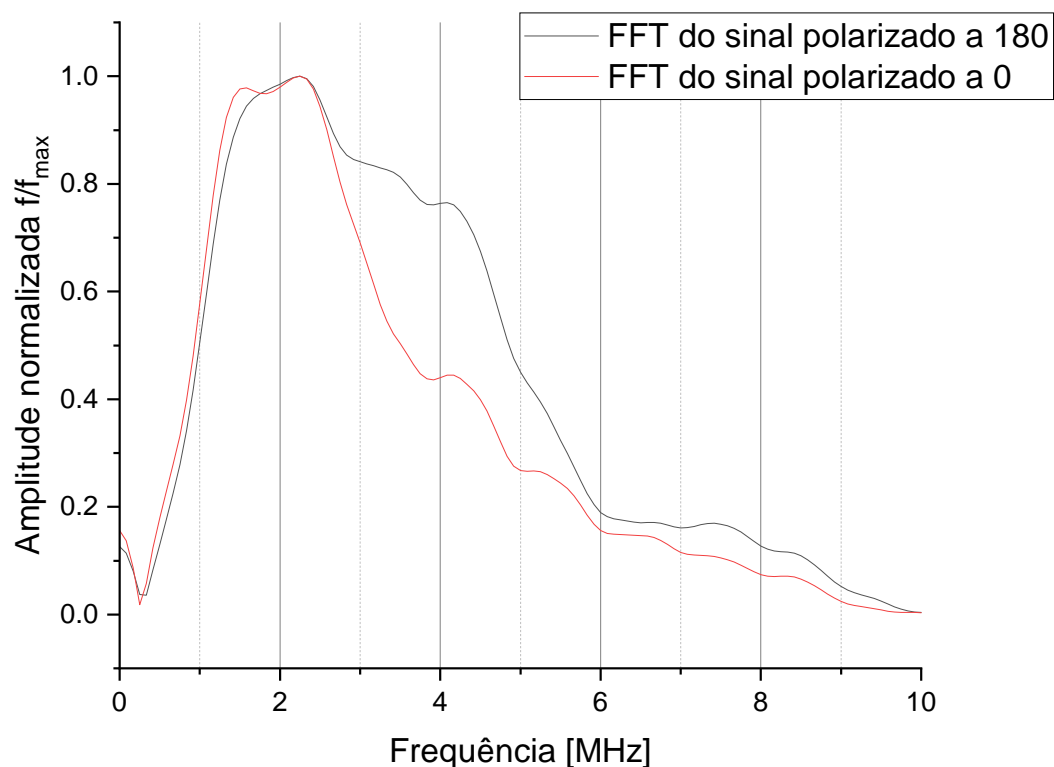


Figura 4: Espectro de amplitude do sinal recebido em função do sentido de polarização do transdutor.

Uma terceira suposição é quanto à atenuação do sinal. O sinal pode ser atenuado através de três formas diferentes: pela propagação; absorção; e espalhamento. Dessas, a de maior influência é o espalhamento da onda, que é reflexo da onda em contornos de grãos, pequenas trincas e outras heterogeneidades no material. O espalhamento em materiais policristalinos cria ondas dispersivas, alterando o formato da onda para cada eco consecutivo (BADIDI BOUDA; LEBAILI; BENCHALA, 2003).

Esta suposição é reforçada ao se observar a amplitude do sinal. Na Figura 4, a maior quantidade de energia está sendo recebida a 2 MHz. Porém, a frequência de ressonância do transdutor usado nesse trabalho é de 5 MHz, logo, era esperado um pico de energia próximo a esta frequência. Ou seja, há alta atenuação causada pelo espalhamento da onda na frequência de 5 Mhz. É possível que essa grande perda de energia e alteração do formato da onda esteja ocorrendo devido à frequência da onda e do tamanho de grão do material (WAN et al., 2017). A influência da atenuação do sinal na avaliação de tensões residuais ainda precisa ser estudada em trabalhos futuros. É possível que o problema da

Tabela 2: Diferença do TOF em função do sentido de polarização da onda.

Linha	Distância do centro da solda [cm]													
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	2	3	4	5	6	7	8
G1L1	7,80	7,90	5,90	23,9	12,2	14,9	9,60	-18,7	3,00	-3,50	-10,0	-2,50	-7,1	6,20
G1L2	21,2	24,3	14,6	17,1	22,2	15,8	-7,20	14,3	8,40	9,1	5,70	1,6	2,00	-0,50
G1L3	-2,20	12,2	2,50	4,20	-6,20	-1,80	-1,00	0,7	9,50	14,4	-0,80	2,7	13,1	7,50
G2L1	9,60	11,1	11,2	24,4	21,3	20,5	5,0	6,60	18,5	-3,50	3,70	2,50	-2,2	-1,00
G2L2	20,9	14,0	5,40	1,70	13,7	17,5	8,6	16,2	-4,0	24,0	9,00	1,60	15,0	17,9
G2L3	-2,10	2,60	1,30	1,60	1,30	-1,90	-2,70	13,1	11,9	7,20	31,3	15,8	13,2	6,00

atenuação seja o motivo principal da alteração do formato da onda em função do sentido de polarização. A alteração do formato da onda em função do sentido de propagação fez com que o TOF medido não fosse o mesmo a 0° e a 180° .

A Tabela 2 apresenta a diferença obtida entre o TOF calculado com a onda polarizada a 0° e a 180° , em nanossegundos. É possível observar que houve diferenças máximas de cerca de 31 ns, aumentando consideravelmente a incerteza do resultado. O valor da incerteza, em MPa, será discutido posteriormente. Devido a essas variações, a automatização de todo o processamento se tornou muito difícil, necessitando maiores cuidados. Por isso, outros *softwares* mais específicos, como o *OriginPro* e *Wolfram mathematica* foram usados para o cálculo da tensão, como será mostrado nas seções seguintes.

E.1 Sensibilidade da medição

A partir das constantes, é possível calcular a sensibilidade da medição (α_σ), em ns por MPa, pela equação 2.26. Esse termo também foi utilizado por (RUANO, 2017), que observou uma sensibilidade bem elevada no alumínio, utilizando Lcr, comprovando o que já tinha sido demonstrado por (EGLE; BRAY, 1976), que demonstraram que ondas compressivas se propagando na direção da tensão tem a maior sensibilidade dentre os outros tipos de onda. A variação depende de dois parâmetros, a diferença de TOF da onda cisalhante polarizada na direção preferencial (Δt_S) e outra perpendicular a essa e o TOF da onda compressiva (t_C). A sensibilidade está diretamente relacionado com os valores dos constantes acustoelásticas obtidos e da velocidade de propagação no material. A Tabela 3 apresenta a sensibilidade da medição. Quanto menor o valor da sensibilidade, maior a possibilidade dos valores de tensão calculados estarem com erros elevados. Um valor de sensibilidade maior garante menos erros provenientes de outras fontes. Observa-se uma sensibilidade muito maior em Δt_S que em t_C , mostrando que a influência do t_C por outros fatores é bastante elevada, justificando o erro elevado do R_0 em comparação com B_0 .

Tendo a sensibilidade para Δt_S , foi avaliada a influência da diferença de sentido de polarização da onda no resultado da tensão. A Tabela 4 apresenta os valores de tensões

Tabela 3: Sensibilidade do TOF em função da tensão.

Parâmetro	σ [MPa/ns]	α_σ [ns/MPa * 100]
Δt_S	9, 11	10, 9
t_C	34, 5	2, 89

Tabela 4: Tensão calculada em função do sentido de polarização da onda.

Linha	Distância do centro da solda [cm]													
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	2	3	4	5	6	7	8
G1L1	72,1	72,9	54,2	220	112	137	88,4	171	27,7	32,9	92,7	22,9	65,8	57,1
G1L2	194	222	134	157	204	145	65,8	131	77,1	83,2	5,24	15,0	18,5	5,31
G1L3	20,8	111	23,6	39,1	57,1	16,7	9,50	7,05	87,6	132	7,37	25,4	120	68,8
G2L1	88,4	103	103	225	196	190	45,5	61,0	170	32,3	34,7	23,4	20,7	9,84
G2L2	192	129	50,1	15,6	125	161	78,8	148	37,1	221	82,6	15,4	138	164
G2L3	19,6	24,3	12,1	14,8	11,9	17,9	25,0	121	110	66,3	289	145	121	55,0

calculados apenas pela diferença de TOF causado pelo sentido da onda. É possível observar que há diferenças consideráveis, perto de 300 MPa, próximo à tensão de escoamento do material (315 MPa). Isso mostra que a diferença do TOF em função do sentido da onda tem um grande impacto ao se analisar as tensões residuais.