



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

**AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW E  
GMAW-CW POR BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA E DIFRAÇÃO  
DE RAIO X**

**EDNELSON DA SILVA COSTA**

**2017**



Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Recursos Naturais da Amazônia

# **AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW E GMAW-CW POR BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA E DIFRAÇÃO DE RAIO X**

**EDNELSON DA SILVA COSTA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga

**Belém**

**Mairo/2017**

# AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW E GMAW-CW POR BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA E DIFRAÇÃO DE RAIOS X

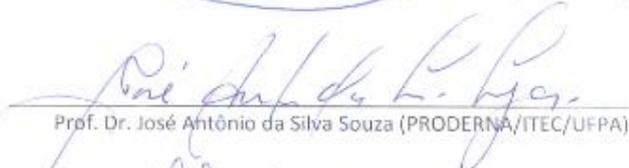
**Ednelson da Silva Costa**

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

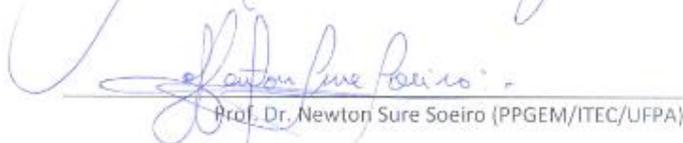
Aprovada por:



Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga (PRODERNA/ITEC/UFPA)



Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza (PRODERNA/ITEC/UFPA)



Prof. Dr. Newton Sure Soeiro (PPGEM/ITEC/UFPA)



Prof. Dr. Márcio Correa de Carvalho (UNIFESSPA)



Prof.ª Dr.ª Sonia Luisa dos Santos Simões (DEMM/UNIVERSIDADE DO PORTO)



Prof. Dr. Américo Scotti (PPGEMM/UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA)

**BELÉM, PA-BRASIL**

**MAIO DE 2017**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

Costa, Ednelson da Silva, 1981

Avaliação de tensões residuais em soldas GMAW e GMAW-CW por birrefringência acústica e difração de raio X/Ednelson da Silva Costa.- 2017.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2017

1. Soldagem elétrica 2. Tensões residuais 3. Difração de raio X I. Título

CDD 22.ed.671.5212

---

*“Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos, e fazer ou não algo só depende de nossa vontade e perseverança”.*

*Albert Einstein*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela graça da vida concedida diariamente e por permitir a realização deste trabalho.

À minha família, em especial a minha mãe Socorro, por sua luta insana na lavoura e assim, poder conseguir criar o meu irmão Adeilson e Eu.

Ao meu padrasto Celso por todos os anos ao nosso lado, prestando todo o apoio necessário.

À minha esposa Mariana e aos meus filhos Gabriel e Gabrielly, os quais amo muitíssimo.

À Dona Francisca (*in memorian*) pela imensa valorização dos meus estudos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Eduardo de Magalhães Braga, pelo desafio proposto, pela sua amizade e pela partilha dos seus conhecimentos para comigo durante a orientação desta tese.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), pela oportunidade de ingresso ao estudo de nível superior; em particular ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERRNA) por me permitir a realização desse sonho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento da bolsa de pesquisa.

A equipe do Instituto de Engenharia Nuclear-IEN, em particular ao Professor Dr. Marcelo Bittencourt, pelo fornecimento do software utilizado nesta tese para medir o sinal da onda ultrassônica.

A todos os membros do LCAM (Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos) que contribuíram de forma ímpar para que esse trabalho fosse concluído.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

E a todos meu muitíssimo obrigado.

Dedico este trabalho às pessoas que mais amo, à minha esposa e aos meus filhos, à minha mãe, ao meu irmão e ao meu padrasto, por estarem ao meu lado nos momentos maravilhosos e também nos momentos mais difíceis desta caminhada.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais. (Dr. Eng.)

## **AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW E GMAW-CW POR BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA E DIFRAÇÃO DE RAIOS X**

**Ednelson da Silva Costa**

MAIO/2017

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais

Neste trabalho foram realizadas soldagens, utilizando-se os processos *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e *Gas Metal Arc Welding-Cold Wire* (GMAW-CW). O metal de base foi o aço naval de classificação ASTM A-131. O objetivo do trabalho foi determinar as tensões residuais para o processo GMAW-CW e comparar os resultados com aqueles do processo GMAW convencional. As tensões residuais foram determinadas usando as técnicas de birrefringência acústica (BA) e difração de raios X (DRX). Análises microestrutural e acustoelástica foram realizadas no metal de base, na condição como recebido, para determinar a direção de laminação, birrefringência acústica (BA0) e constante acustoelástica (CAE). Estas análises foram necessárias para a determinação das tensões residuais usando a técnica de birrefringência acústica. Para ambos os modelos de soldagem, os cordões de solda foram feitos em chapas na posição plana utilizando arame da classe ER70S-6 como eletrodo. A velocidade de alimentação do arame eletrodo foi de 15 m/min, enquanto o arame frio foi alimentado a taxas de 3 e 6 m/min, que são equivalentes a 20% e 40% da taxa de alimentação do arame eletrodo, respectivamente. Os resultados mostraram que os processos produzem diferentes níveis de tensões residuais. Para o processo GMAW-CW, observou-se, em relação ao processo convencional, que com 20% de adição de arame frio as tensões residuais diminuíram significativamente e para 40%, reduziram em menor quantidade.

**Palavras chaves:** Soldagem; GMAW-CW; tensões residuais; ensaios não destrutivos; birrefringência acústica; difração de raios X.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFGA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

**EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN GMAW AND CW-GMAW  
WELDS BY ACOUSTIC BIREFRINGENCE AND X-RAY DIFFRACTION**

**Ednelson da Silva Costa**

MAY/2017

Advisor: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga, D. Eng.

Area of Concentration: Use and Transformation of Natural Resources.

In this work, welding were performed using the Gas Metal Arc Welding (GMAW) and the Cold-Wire Gas Metal Arc Welding (CW-GMAW) processes. The base metal were naval steel of classification ASTM A-131. The goal of this work was to determine the residual stresses for the CW-GMAW process and compare the results with that of the standard GMAW process. The residual stresses were determined using acoustic birefringence (BA) and X-ray diffraction (XRD) techniques. Microstructural and acoustoelastic analysis were performed in the base metal, in the as received condition, to determine the material rolling direction, acoustic birefringence (BA0) and acoustoelastic constant (CAE). These analyzes were required for the determination of the residual stresses using the acoustic birefringence techniques. For both welding models, the welds were bead plate performed in flat position using wire of class ER70S-6 as electrode. The electrode wire feeding speed used was 15 m/min, while the cold-wire was fed at the rates of 3 and 6 m/min, which are equivalent to 20% and 40% of the feeding rate of the electrode, respectively. The results showed that the processes produce different levels of residual stresses. For the GMAW-CW process, it was observed, with respect to the conventional process, that with 20% addition of cold wire the residual stresses decreased significantly and to 40%, reduced in smaller amount.

**Key words:** Welding; CW-GMAW; residual stresses; non-destructive testing; acoustic birefringence; X-ray diffraction.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>	28
1.1 - CONTEXTO GERAL	28
1.2 - JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	30
1.3 - OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	31
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	32
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	33
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	33
2.2 - PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW	33
2.3 - PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO (GMAW-CW)	35
2.4 - TENSÕES RESIDUAIS	36
2.4.1 - Definição e Origens das Tensões Residuais	36
2.4.2 - Tipos de Tensões Residuais	39
2.4.3 - Efeitos das Tensões Residuais	41
2.4.4 - Tensões Residuais em Soldagem	43
2.4.5 - Distribuição de Tensões Residuais e Temperaturas em Juntas Soldadas	49
2.4.6 - Efeitos ou Consequências das Tensões Residuais em Juntas Soldadas	52
2.5 - TÉCNICAS DE MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS	53
2.5.1 - Técnicas Destrutivas e Semi-Destrutivas	54
2.5.1.1 - Técnica de Seccionamento	54
2.5.1.2 - Técnica do Contorno	56
2.5.1.3 - Técnica de Remoção de Camadas ou da Deflexão	57
2.5.1.4 - Técnicas do Furo Cego ( <i>Hole-Drilling Method</i> ) e do Núcleo do Anel ( <i>Ring Core Method</i> )	59
2.5.1.5 - Técnica do Furo Profundo ( <i>Deep Hole Drilling Method</i> )	61
2.5.2 - Técnicas Não-Destrutivas	62
2.5.2.1 - Técnicas Magnéticas	62
2.5.2.2 - Técnica de Difração de Nêutron	64
2.5.2.3 - Técnica de Difração de Raio X (DRX)	65

2.5.2.4 - Técnicas Ultrassônicas	71
<b>CAPÍTULO 3 - TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS</b>	<b>73</b>
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	73
3.2 - ONDAS ACÚSTICAS	73
3.2.1 - Ondas Longitudinais ou de Compressão	74
3.2.2 - Ondas Transversais ou de Cisalhamento	74
3.2.3 - Ondas Superficiais	75
3.2.3.1 - Ondas de <i>Rayleigh</i>	75
3.2.3.2 - Ondas de <i>Lamb</i>	75
3.2.3.3 - Onda Longitudinal Criticamente Refratada (Lcr)	76
3.3 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE ONDAS ACÚSTICAS	77
3.3.1 Velocidade, Comprimento e Frequência	77
3.4 - IMPEDÂNCIA ACÚSTICA	78
3.5 - GERAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS	80
3.6 - TÉCNICAS DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM	82
3.7 - TÉCNICA ULTRASSÔNICA PARA AVALIAÇÃO DE TENSÕES	83
3.7.1 - Teoria Acustoelástica e Birrefringência Acústica	84
3.8 - APLICAÇÕES DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA NA MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAIS EM ESTRUTURAS SOLDADAS	94
3.9 - COMENTÁRIOS SOBRE AS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	107
<b>CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>108</b>
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	108
4.2 - MATERIAL DE ESTUDO	108
4.2.1 - Análise Química	109
4.2.2 - Análises de Propriedades Mecânicas	109
4.2.3 - Análise Microestrutural	110
4.3 - EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DO MATERIAL ANTES E APÓS A SOLDAGEM GMAW E GMAW-CW	111
4.3.1 - Sistema Ultrassônico	111

4.3.2 - Metodologia de Captura do Sinal Ultrassônico	112
4.3.3 - Métodos de Captura do Sinal Ultrassônico	113
4.3.3.1 - Método Par-a-Par	113
4.3.3.2 - Método Contínuo	114
4.3.3.3 - Teste Usando o Método de Captura Par-a-Par	115
4.3.3.4 - Teste Usando o Método de Captura Contínuo	115
4.3.3.5 - Determinação do Método de Captura do Sinal Ultrassônico	116
4.3.4 - Levantamento da Birrefringência Acústica do Material como Recebido ( <i>BA0</i> )	117
4.3.5 - Levantamento da Constante Acustoelástica do Material como Recebido ( <i>CAE</i> )	119
4.4 - CONSUMÍVEIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS UTILIZADOS NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM	120
4.4.1 - Consumível	120
4.4.1.1 - Arame Eletrodo/Arame Frio	120
4.4.1.2 - Gás de Proteção	121
4.4.2 - Equipamentos	121
4.4.2.1 - Fonte de Soldagem	121
4.4.2.2 - Sistema de Alimentação de Arame Energizado e Arame Frio	121
4.4.2.3 - Tocha de Soldagem	122
4.4.2.4 - Sistema de Posicionamento e Deslocamento Semi-Automático da Tocha de Soldagem	123
4.4.2.5 - Sistema de Captura de Sinais de Soldagem	123
4.4.3 - Metodologia de Soldagem das Amostras	124
4.4.3.1 - Obtenção dos Parâmetros de Soldagem	124
4.4.3.2 - Descrição dos Procedimentos de soldagem	125
4.5 - ANÁLISES DAS JUNTAS SOLDADAS	126
4.5.1 - Análise Química das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW- CW(40%)	126
4.5.2 - Análise Macroestrutural das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)	126

4.5.3 - Análise Microestrutural das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)	127
4.5.4 Metodologias Utilizadas na Medição da Birrefringência Acústica no Metal de Base Após a Soldagem	127
4.6 - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO METAL DE BASE PELA TÉCNICA DE BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA	128
4.7 - MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA UTILIZADOS NA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS POR DIFRAÇÃO DE RAIO X	128
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	130
5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	130
5.2 - RESULTADOS DO METAL DE BASE	130
5.2.1 - Análise Química	130
5.2.2 - Análise de Resistência Mecânica	131
5.2.3 - Análise Microestrutural	131
5.3 - RESULTADOS APÓS A SOLDAGEM	133
5.3.1 - Análise Química das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)	133
5.3.2 - Análise Macroestrutural ou geométrica das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)	134
5.3.3 - Análise Microestrutural das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)	135
5.4 - SELEÇÃO DA METODOLOGIA DE CAPTURA DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS	138
5.4.1 - Resultados da Metodologia Par-a-Par	138
5.4.2 - Resultados da Metodologia Contínua	142
5.5 - BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA DO MATERIAL COMO RECEBIDO (BA0)	145
5.6 - CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA DO MATERIAL COMO RECEBIDO (CAE)	151
5.7 - TENSÕES RESIDUAIS DETERMINADAS POR BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA	154
5.7.1 - Tensões Residuais GMAW	155

5.7.2 - Tensões Residuais GMAW-CW(20%)	159
5.7.3 - Tensões Residuais GMAW-CW(40%)	163
5.8 - TENSÕES RESIDUAIS DETERMINADAS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X	167
5.8.1 - Tensões Residuais GMAW	168
5.8.2 - Tensões Residuais GMAW-CW(20%)	171
5.8.3 - Tensões Residuais GMAW-CW(40%)	173
5.9 Comentários dos resultados de Tensões Residuais medidos por Birrefringência Acústica e Difração de Raios X	178
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</b>	180
<b>CAPÍTULO 7 - PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	181
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	183
<b>APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR</b>	197
<b>APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DO DIFRATÔMETRO DE RAIOS X</b>	200
<b>APÊNDICE C - ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A SELEÇÃO DA METODOLOGIA DE CAPTURA DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS</b>	201
<b>APÊNDICE D - TEMPO DE PERCURSO DA ONDA ULTRASSÔNICA E BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA ANTES DA SOLDAGEM</b>	204
<b>APÊNDICE E - ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DETERMINAR A HOMOGENEIDADE OU HETEROGENEIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DA ANISOTROPIA (<math>BA\theta</math>) AO LONGO DO MATERIAL COMO RECEBIDO</b>	213
<b>APÊNDICE F - TEMPO DE PERCURSO DA ONDA ULTRASSÔNICA E BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA APÓS A SOLDAGEM</b>	219
<b>APÊNDICE G - TENSÕES RESIDUAIS DE CADA AMOSTRA POR BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA</b>	228
<b>APÊNDICE H - TENSÕES RESIDUAIS DE CADA AMOSTRA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X</b>	231

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Desenho esquemático do processo GMAW	34
Figura 2.2 - Esquema representativo dos equipamentos utilizados na soldagem GMAW-CW	34
Figura 2.3 - Desenho esquemático do processo GMAW-CW	36
Figura 2.4 - Diagrama esquemático da seção transversal de uma folha de vidro temperado que mostra como as tensões residuais podem existir na ausência de uma carga externa	37
Figura 2.5 - Exemplos de algumas formas típicas de tensões residuais	38
Figura 2.6 - (a) Macro tensões residuais ou Tipo I. (b) Micro tensões residuais ou Tipo II e (c) Micro tensões residuais ou Tipo III	40
Figura 2.7 - Classificação das tensões residuais de acordo com seus níveis	41
Figura 2.8 - Superposição das tensões residuais e aplicadas	42
Figura 2.9 - (a) Conjunto de barras presas nas extremidades e (b) barra central sendo aquecida	46
Figura 2.10 - Variação das tensões internas em função da variação da temperatura na barra central	47
Figura 2.11 - (a) Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas no modelo de três barras. (b) tensões residuais geradas na direção longitudinal ( $\sigma_x$ ) do cordão, medidas ao longo de $y$ , de uma solda de topo.	49
Figura 2.12 - Distribuição de temperatura, $\Delta T$ , e tensão, $\sigma_x$ , durante a produção de um cordão de solda em uma placa	50
Figura 2.13 - Distribuição de tensões; (a) tensões longitudinais e (b) tensões transversais	51
Figura 2.14 - Distribuição de tensões em um componente com uma solda de topo submetido a carregamentos crescentes (curvas 1, 2 e 3) e distribuição de tensões residuais após a liberação do carregamento (curva 4)	52
Figura 2.15 - Fluxograma das técnicas de medição de tensões residuais	54
Figura 2.16 - Sequência da técnica de seccionamento	55
Figura 2.17 - Representação esquemática da técnica do seccionamento	55

Figura 2.18 - Método do contorno (a) tensões originais, (b) livre de tensões após o corte, (c) tensões restauradora da superfície plana e (d) medidas do perfil de tensão de um trilho de trem	57
Figura 2.19 - Deflexão de uma placa devido ao relaxamento de tensão influenciado pela remoção de material	58
Figura 2.20 - Ilustração esquemática dos parâmetros envolvidos na técnica da remoção de camadas	58
Figura 2.21 - Esquema de corte transversal em torno de um furo mostrando tensões trativas. (a) antes de furação e (b) após a usinagem do furo	59
Figura 2.22 - Roseta extensométrica (dimensões em mm)	60
Figura 2.23 - (a) Técnica do furo cego (b) Técnica do núcleo do anel	61
Figura 2.24 - Técnica do furo profundo	62
Figura 2.25 - Estrutura de domínios em um material policristalino	63
Figura 2.26 - Mapa de tensões residuais em uma chapa soldada utilizando método magnético	64
Figura 2.27 - As três orientações diferentes usados para determinar a tensão transversal ( $\epsilon_T$ ), tensão axial ( $\epsilon_A$ ), e tensão normal ( $\epsilon_N$ ). Mostra também a direção da carga ( $F_{aplicada}$ ) e também a direção do feixe de neutros incidente e difratado	65
Figura 2.28 - Incidência dos raio X sobre a amostra e Intensidade do raio difratado para um determinado ângulo $2\theta$	66
Figura 2.29 - Princípios da medição de tensões por difração de raio X. (a): $\psi = 0$ . (b) $\psi = \psi$ (amostra rotacionada através de algum ângulo $\psi$ conhecido). D, detector de raio X; S, fonte de raio X; N, normal à superfície	67
Figura 2.30 - Difração de raio X pelos átomos (A-A' e B-B')	67
Figura 2.31 - Varredura da superfície da amostra	68
Figura 2.32 - Deslocamento dos picos de difração quando comparados com o padrão	68
Figura 2.33 - Definição da direção da inclinação de $\psi$ e da direção da medição de tensão, $\emptyset$ , usando o modelo plano de tensões elásticas	70
Figura 2.34 - Gráfico de $d(311)$ versus $\sin^2\psi$ para shot peening em liga de alumínio 5056, com tensões superficiais de -148 MPa	71
Figura 3.1 - Classificação das frequências sonoras	73

Figura 3.2 - Onda longitudinal ou de compressão	74
Figura 3.3 - Onda transversal ou de cisalhamento	75
Figura 3.4 - Representação esquemática da onda de <i>Rayleigh</i>	75
Figura 3.5 - Ondas de Lamb. (a) simétrica e (b) assimétrica	76
Figura 3.6 - Geração de onda Lcr	76
Figura 3.7 - (a) Transdutor normal ou reto. (b) Transdutor angular e (c) Transdutor de duplo cristal	81
Figura 3.8 - (a) Conjunto de cristais operando em fase e (b) excitação dos cristais de forma defasada	81
Figura 3.9 - (a) Transdutor piezelétrico e (b) Transdutor EMAT	82
Figura 3.10 - (a) Técnica pulso-eco. (b) Técnica da transparência	83
Figura 3.11 - NDT: técnica de imersão	83
Figura 3.12 - Velocidade da onda ultrassônica cisalhante como função do Angulo de polarização. (a) Um material isotrópico sem tensão, (b) Um material sem tensão e com textura e (c) Um material com tensão	84
Figure 3.13 - O efeito da tensão induzida sobre a separação atômica. (a) Energia atômica, (b) Força interatômica e (c) Resposta macroscópica causada pelas forças interatômicas	85
Figura 3.14 - Representação da propagação de ondas acústicas em materiais tracionados	86
Figura 3.15 - Ilustração das direções de tensões (direção do carregamento), de polarização e de simetria ortotrópica e seus respectivos ângulos usadas pela teoria da birrefringência	93
Figura 3.16 - Comparação de distribuição de tensão em tubo de aço inoxidável soldado utilizando as técnicas de Ultrassom e Difração de raio-X. (a) Distribuição de ( $\sigma_L$ ) e (b) Distribuição de ( $\sigma_T$ )	95
Figura 3.17 - Comparação de distribuição de tensões residuais medidas com técnicas diferentes (Ultrassom e Difração de raio-X) em uma chapa de Al-Mg. (a) Distribuição de ( $\sigma_L$ ) e (b) Distribuição de ( $\sigma_T$ )	96
Figura 3.18 - Perfil de tensões residuais longitudinal obtido pelos métodos de ultrassom (5MHz) e furo	97

Figura 3.19 - Comparação dos perfis de tensão obtidos pelos métodos ultrassom e furo após tratamento completo para alívio de tensão-material-aço S355 - 8 mm de espessura	97
Figura 3.20 - Comparação dos perfis de tensões residuais obtidos pelos métodos de ultrassom e difração de raio-X - Material aço S355 - 30 mm de espessura	98
Figura 3.21 - Resultados após o tratamento térmico para alívio de tensões residuais	98
Figura 3.22 - Resultados após correções da microestrutura	99
Figura 3.23 - (a) Dois primeiros ecos do sinal ultrassônico capturados após a onda ultrassônica ter percorrido a espessura da chapa de alumínio. (b) Primeiro eco do sinal anterior. (c) Resultado da correlação cruzada entre os sinais mostrados nas Figuras 3.23(a) e 3.23(b)	100
Figura: 3.24 - Distribuição de tensões ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) longitudinal ao cordão de solda em chapas de liga Al-Mg	101
Figura 3.25 - Distribuição de tensões ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) perpendicularmente ao cordão de solda em chapas de liga Al-Mg	101
Figura 3.26 - Pontos de medições dos tempos percurso da onda ultrassônica para a obtenção das curvas de distribuição de tensões na chapa soldada.	102
Figura 3.27 - Perfis de distribuição de tensões perpendicularmente ao cordão de solda pela técnica da birrefringência	103
Figura 3.28 - Distribuição transversal de tensões pela técnica do furo cego e ultrassom	104
Figura 3.29 - (a) Esquema da câmara hiperbárica e (b) Birrefringência acústica nos locais próximos do cordão de solda na câmara hiperbárica antes e após tratamento de alívio de tensões	104
Figura 3.30 - (a) Desenho esquemático da peça de referência (PR) e (b) Birrefringência acústica ( $B$ ) na peça de referência com e sem tratamento de alívio de tensões	105
Figura 3.31 - (a) Pontos analisados na chapa e (b) Pontos analisados nos tubos	106
Figura 4.1 - Imagem ilustrativa da chapa como recebida com seus respectivos cortes e dimensões em mm	109
Figura 4.2 - Esquema ilustrativo dos corpos de prova usados nos ensaios de tração e suas dimensões em mm	110

Figura 4.3 - Imagem ilustrativa das faces analisadas para determinar a microestrutura do MB	111
Figura 4.4 - Sistema ultrassônico utilizado na captura do tempo de percurso da onda ultrassônica	112
Figura 4.5 - Direção de polarização (movimento das partículas); Posição 1 - paralela à direção de laminação (longitudinal) e Posição 2 - transversal à direção de laminação	113
Figura 4.6 - Transdutor no ponto central da chapa como recebida para a determinação do método de captura	114
Figura 4.7 - Tela do osciloscópio mostrando o sinal ultrassônico	116
Figura 4.8 - Imagem ilustrativa de uma amostra apresentando os pontos de medição e a direção de laminação do material. Dimensões em mm	117
Figura 4.9 - Esquema ilustrativo dos corpos de prova e suas dimensões (mm) utilizados para obtenção da constante acustoelástica do metal de base	119
Figura 4.10 - Corpo de prova tracionado uniaxialmente para determinação da constante acustoelástica do metal de base	120
Figura 4.11 - Tocha de soldagem adaptada para soldagem com o arame frio	122
Figura 4.12 - Sistema de posicionamento e deslocamento da tocha	123
Figura 4.13 - Fluxograma dos processos de soldagem	124
Figura 4.14 - Ângulo de soldagem do arame frio e ângulo de trabalho	125
Figura 4.15 - Amostra indicando os pontos de medição de tensões residuais por BA e DRX após a soldagem	128
Figura 4.16 - Risco de contato entre o arco-detectores e as restrições das amostras soldadas	129
Figura 5.1 - Micrografia do metal de base, ASTM A-131, apresentando grãos de Ferrita identificados pela coloração clara e ilhas de Perlita em cor escura com aumento de 200x (duzentas vezes), face - X	132
Figura 5.2 - Micrografia do metal de base, ASTM A-131, apresentando grãos de Ferrita identificados pela coloração clara e ilhas de Perlita em cor escura com aumento de 200x (duzentas vezes), face - Y	132
Figura 5.3 - Macrografias dos processos de soldagem GMAW, GMAW-CW (20%) e GMAW-CW (40%). Dimensões em mm	134

Figura 5.4 - Macrografia que identifica as regiões onde foram realizadas as análises micrográficas, metal de base (MB); zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). Ataque nital 2%	136
Figura 5.5 - (a) Micrografia da ZTA e (b) micrografia ZF de uma amostra GMAW, indicando a presença de Ferrita Acicular-(AF); Ferrita com Segunda Fase Alinhada-FS(A); Ferrita Alotriomórfica; Ferrita Windmastatten; Ferrita de Contorno de Grão-PF(G); Ferrita Poligonal Intragranular-PF(I); Ferrita Primária-FP e Inclusões, respectivamente. Aumento de 200X em M.O. Ataque nital 2%	136
Figura 5.6 - (a) Micrografia da ZTA e (b) micrografia ZF de uma amostra GMAW-CW(20%), indicando a presença de Ferrita Acicular-(AF); Ferrita com Segunda Fase Alinhada- FS(A); Ferrita Alotriomórfica; Ferrita de Contorno de Grão-PF(G); Ferrita Poligonal Intragranular-PF(I); Ferrita Primária-FP e Inclusões, respectivamente. Aumento de 200X em M.O. Ataque nital 2%	137
Figura 5.7 - (a) Micrografia da ZTA e (b) micrografia ZF de uma amostra GMAW-CW(40%), indicando a presença de Ferrita com Segunda Fase Alinhada-FS(A); Ferrita Alotriomórfica; Agregado Ferrita-Carbeto-FC; Ferrita de Contorno de Grão-PF(G); Ferrita Poligonal Intragranular-PF(I); Ferrita Primária-FP e Inclusões, respectivamente. Aumento de 200X em M.O. Ataque nital 2%	137
Figura 5.8 - Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização longitudinal (53,33% de frequência do tempo em torno de 6251 ns)	140
Figura 5.9 - Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização transversal (50 % de frequência do tempo em torno de 6290 ns)	140
Figura 5.10 - Defasagem do tempo de percurso da onda nas direções longitudinal e transversal pelo método de captura Par-a-Par	141
Figura 5.11 - Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização longitudinal	143
Figura 5.12 - Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização transversal	144
Figura 5.13 - Defasagem de tempo de percurso da onda nas direções longitudinal e transversal para método de captura Contínuo	144

Figura 5.14 - Distribuição dos 36 (trinta e seis) tempos médio de percurso da onda ultrassônica polarizada nas direções longitudinal e transversal ao longo do material como recebido	147
Figura 5.15 - Variação de $BA0$ ao longo do material como recebido	149
Figura 5.16 - Gráfico da variação dos tempos em função das cargas aplicadas no metal de base	152
Figura 5.17 - Gráfico da variação de birrefringência x tensão para obtenção da $CAE$ do metal de base	154
Figura 5.18 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção paralela ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW	156
Figura 5.19 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção transversal ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW	157
Figura 5.20 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) nas direções paralela e transversal ao cordão medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW	159
Figura 5.21 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção paralela ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(20%)	160
Figura 5.22 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção transversal ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(20%)	161
Figura 5.23- Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) nas direções paralela e transversal ao cordão medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(20%)	163
Figura 5.24 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção paralela ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(40%)	164
Figura 5.25 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção transversal ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(40%)	165

Figura 5.26- Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) nas direções paralela e transversal ao cordão medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(40%)	167
Figura 5.27 - Perfis da distribuição de tensões residuais paralelas ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW	169
Figura 5.28 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW	169
Figura 5.29 - Perfis da distribuição de tensões residuais paralelas ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW-CW(20%)	172
Figura 5.30 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW-CW(20%)	172
Figura 5.31 - Perfis da distribuição de tensões residuais paralelas ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW-CW(40%)	174
Figura 5.32 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW-CW(40%)	175
Figura 5.33 - Perfis da distribuição de tensões residuais paralelas ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após os três procedimentos de soldagem	177
Figura 5.34 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após os três procedimentos de soldagem	177
Figura 5.35 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX e BA após os três procedimentos de soldagem	178

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais	72
Tabela 5.1 - Análise química do aço ASTM A-131	131
Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A-131	131
Tabela 5.3 - Composição química do arame ER70S-6, pré e pós soldagem (ZF)	133
Tabela 5.4 - Dados da Análise Geométrica	134
Tabela 5.5 - Tempos obtidos no teste com a metodologia de captura de sinal Par-a-Par aplicada a chapa como recebida	138
Tabela 5.6 - Tempos obtidos no teste com a metodologia de captura de sinal Contínua aplicada a chapa como recebida	142
Tabela 5.7 - Variação dos tempos médios (ns) de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal antes da soldagem	145
Tabela 5.8 - Variação dos tempos médios (ns) de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção transversal antes da soldagem	146
Tabela 5.9 - Birrefringências acústicas distribuídas ao longo do material como recebido( <i>BA0</i> )	148
Tabela 5.10 - Resultados das análises estatísticas das linhas <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i> do material como recebido	150
Tabela 5.11 - Resultados das análises estatísticas dos pontos de 1 a 9	150
Tabela 5.12 - Cargas aplicadas para a obtenção da <i>CAE</i> e seus correspondentes valores de tensões e tempos obtidos nas direções longitudinal e transversal durante o ensaio de tração uniaxial	152
Tabela 5.13 - Valores das constantes acustoelásticas do ASTM A-131 como recebido	154
Tabela 5.14 - Valores de tensões residuais médios obtidos por <i>BA</i> após a soldagem GMAW	155
Tabela 5.15 - Valores de tensões residuais médios obtidos por <i>BA</i> após a soldagem GMAW-CW(20%)	159
Tabela 5.16 - Variação de corrente e energia de soldagem dos processos GMAW e GMAW-CW	162

Tabela 5.17 - Valores de tensões residuais médios obtidos por <i>BA</i> após a soldagem GMAW-CW(40%)	163
Tabela 5.18 - Valores de tensões residuais médios obtidos por DRX após a soldagem GMAW	168
Tabela 5.19 - Valores de tensões residuais médios obtidos por DRX após a soldagem GMAW-CW(20%)	171
Tabela 5.20 - Valores de tensões residuais médios obtidos por DRX após a soldagem GMAW-CW(40%)	174

## LISTA DE SÍMBOLOS OU NOMENCLATURAS

<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>AWS</i>	American Welding Society
<i>BA</i>	Birrefringência acústica
<i>BA0</i>	Birrefringência acústica do material como recebido
<i>BA's</i>	Birrefringência acústica no metal de base após a soldagem
<i>CAE</i>	Constante acustoelástica do material como recebido
<i>k</i>	Constante acustoelástica
<i>l<sub>0</sub></i>	Comprimento inicial
<i>l</i>	Comprimento final
<i>AM</i>	Amostra
<i>CP</i>	Corpo de prova
<i>I</i>	Corrente (A)
$(\sigma_L - \sigma_T) / (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$	Diferença de tensões residuais nas direções paralela e transversal ao cordão de solda
<i>d</i>	Espaçamento interplanar
<i>d<sub>0</sub></i>	Espaçamento interplanar na ausência de tensão
<i>GMAW</i>	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
<i>GMAW-CW</i>	<i>Gas Metal Arc Welding - Cold Wire</i>
<i>gl</i>	Grau de liberdade
<i>hkl</i>	Índices de Miller
<i>IEN</i>	Instituto de Engenharia Nuclear
<i>LE</i>	Limite de escoamento
<i>L.A</i>	Linha A
<i>L.B</i>	Linha B
<i>L.C</i>	Linha C
<i>L.D</i>	Linha D
<i>L.A-DL</i>	Medição em pontos da linha A na direção longitudinal à solda
<i>L.B-DL</i>	Medição em pontos da linha B na direção longitudinal à solda
<i>L.C-DL</i>	Medição em pontos da linha C na direção longitudinal à solda
<i>L.D-DL</i>	Medição em pontos da linha D na direção longitudinal à solda
<i>L.A-DT</i>	Medição em pontos da linha A na direção transversal à solda

L.B-DT	Medição em pontos da linha B na direção transversal à solda
L.C-DT	Medição em pontos da linha C na direção transversal à solda
L.D-DT	Medição em pontos da linha D na direção transversal à solda
MQ	Média quadrática
MQG	Média quadrática entre grupos
MQR	Média quadrática dentro do grupo
MB	Metal de base
$E$	Módulos de elasticidade
Valor-P	Nível de significância Calculado
$L_{cr}$	Onda longitudinal Criticamente Refratada
PTS	Pontos
SAE	Society of Automotive Engineers
GMAW-CW(20%)	Soldagem com introdução de 20% de arame frio
GMAW-CW(40%)	Soldagem com introdução de 40% de arame frio
SQ	Soma quadrática
$U$	Tensão (V)
$T_0$	Tempo inicial
$T$	Tempo final
$t_l$	Tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização alinhada com a de laminação do material
$t_t$	Tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização perpendicular à de laminação.
$\sigma_L$	Tensões residuais paralela ao cordão de solda
$\sigma_T$	Tensões residuais transversal ao cordão de solda
F	Teste F (Valor calculado)
$F_{crítico}$	Teste F (Valor tabelado)
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
$\Delta l$	Variação de comprimento
$\Delta T$	Variação de temperatura
$v_0$	Velocidade da onda em um meio sem tensão
$v$	Velocidade da onda em um meio tensionado
$V_{11}$	Velocidade das partículas na direção de propagação da onda

$V_{12}$	Velocidade das partículas transversal à direção de propagação da onda
$V_{13}$	Velocidade das partículas transversal à direção de propagação da onda
$V_l$	Velocidade da onda ultrassônica cisalhante com a direção de polarização alinhada com a de laminação
$V_t$	Velocidade da onda ultrassônica cisalhante com a direção de polarização transversal a de laminação
$V_s$	Velocidade de soldagem (cm/min)
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona fundida
$\theta$	Ângulo de difração
$\nu$	Coefficiente de <i>Poisson</i>
$\lambda$	Comprimento de onda
$\epsilon_{\phi\psi}$	Deformação do espaçamento interplanar da rede cristalina
$\psi$	Psi (ângulo que caracteriza a inclinação do feixe de raio X)
$\sigma$	Tensão (MPa)
$\sigma^I$	Tensões residuais Tipo I
$\sigma^{II}$	Tensões residuais Tipo II
$\sigma^{III}$	Tensões residuais Tipo III
$\sigma_t$	Tensão total
$\sigma_r$	Tensões residual
$\sigma_s$	Tensões de serviço ou aplicada
$\sigma_\phi$	Tensão medida
PF(G)	Ferrita de contorno de grão
PF(I)	Ferrita poligonal intragranular
FS(A)	Ferrita com segunda fase alinhada
FS(NA)	Ferrita com segunda fase não alinhada
FA	Ferrita acicular
FC	Agregado ferrita-carbeto
M.O	Microscopia Ótica

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONTEXTO GERAL

Com a crescente exigência da competitividade do mercado a níveis espantosos, o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) convencional começou a não atender mais a demanda das indústrias no que diz respeito à produtividade. E com a perspectiva de inovação e superação da produtividade em relação ao processo GMAW, foi desenvolvido o processo GMAW-CW (*Gas Metal Arc Welding-Cold Wire*), o qual é uma variante do processo GMAW, que tem como característica principal a inserção de um arame frio no arco e/ou poça de fusão, conforme as velocidades impostas baseadas na velocidade do arame energizado do primeiro processo.

A proposta da soldagem GMAW-CW, que se estabeleceu como uma técnica alternativa e econômica em relação à soldagem GMAW convencional, apresenta-se consolidada em vários aspectos, como por exemplo, estabilidade do arco, análise econômica, análise geométrica, sanidade da solda, comportamento dos microconstituintes formados e propriedades mecânicas (MARQUES, 2011). Porém, para sua plena consolidação, não basta levar em consideração somente alguns aspectos, o econômico e comportamento mecânico, por exemplo. Outras características do processo precisam ser estudadas, nesse sentido, um parâmetro fundamental a ser investigado é o nível de tensões residuais gerado pelo mesmo. De acordo com Santos (2013), a quantificação das tensões residuais e o seu monitoramento são essenciais para a prevenção contra falhas de componentes e estruturas mecânicas, gerando informação para que, por exemplo, sejam otimizados os intervalos de manutenção de um sistema mecânico. Vários componentes industriais podem ser danificados e terem sua função de trabalho comprometida se a composição das tensões, ou seja, as tensões residuais e de serviço, ultrapassar o limite de escoamento do material.

Para a medição dessas tensões, residuais ou aplicadas, existem atualmente várias técnicas. Técnicas estas, geralmente, classificadas em destrutivas e não destrutivas. Uma das técnicas destrutivas mais utilizadas é a técnica do furo, por outro lado, a difração de raio X é a técnica não destrutiva mais usada (WALASZEK *et al.*, 2000), embora existam

outras técnicas como a difração de nêutrons e ultrassom (acustoelasticidade). Esta última, geralmente foi utilizada para detectar e localizar descontinuidade, medir espessura, etc., entretanto, esse paradigma foi quebrado, quando na década de 1950, Hughes e Kelly, baseados na teoria de deformações finitas de Murnaghan, desenvolveram equações, as quais puderam relacionar a variação da velocidade ultrassônica com as tensões presente em um material.

A acustoelasticidade como é conhecida a relação tensão-velocidade da onda ultrassônica, destaca-se segundo Ivanova e Telbizov (2008) apud Santos (2013), por utilizar equipamentos portáteis relativamente baratos, ser rápida em comparação aos outros dois métodos (difração de raio X e difração de nêutrons), fácil de usar, não causar nenhum dano à saúde do operador, devido sua exposição às ondas de raio X, além do fato de que utiliza ondas ultrassônicas que já têm sido estudadas há décadas para aplicações que envolvem inspeção. Bittencourt (2000), comenta que a utilização do ultrassom através da técnica de birrefringência acústica usada para análise de tensões é caracterizada por medir a velocidade ou tempo de propagação da onda ultrassônica cisalhante em relação a duas ondas polarizadas ortogonalmente entre si incidente no material em análise.

Diversos trabalhos estão disponíveis na literatura utilizando a birrefringência acústica para determinação de tensões residuais e aplicadas. No Brasil, o seu início se deu no final da década de 1990 através de um projeto entre a Agência Internacional de Energia Atômica e o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) com o objetivo de medir tensões nas paredes de usinas nucleares. Outro projeto foi entre o IEN e a Petrobrás, com o objetivo de medir tensões em tubulações usadas em oleodutos e/ou gasodutos.

Nesse contexto, afim de consolidar o processo GMAW-CW, este trabalho propõe determinar e analisar, de forma comparativa, as tensões residuais geradas pelos processos GMAW e GMAW-CW. Para a medição dessas tensões foram utilizadas duas técnicas não destrutivas, a birrefringência acústica (BA) e a difração de raio X (DRX). Sendo que a primeira técnica realiza uma avaliação ao longo de toda espessura, porém com o fator limitante dos resultados serem uma média de tensões em duas direções ortogonais entre si. Já a segunda apresenta a limitação de realizar uma avaliação somente na superfície do material. Contudo, independente das limitações de análises das técnicas, é importante verificar a influência da introdução do arame frio no nível dessas tensões residuais gerado pelo processo GMAW-CW e a partir do conhecimento desse nível de tensões, ponderar sobre o processo, comparando-o ao GMAW, de forma a consolidá-lo e, conseqüentemente, aplicá-lo em escala industrial.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

No Brasil, em particular na região Amazônica, mais especificamente, no Estado do Pará, existem dois setores de grande importância para a economia local, tais setores são o da mineração e o da indústria naval. Como se sabe, quase todo o aparato estrutural desses setores é construído se utilizando processos de soldagem, os quais apresentam como uma das características principais de fabricação a geração de tensões residuais, que podem comprometer de forma importante a utilidade e o desempenho da estrutura soldada. Portanto, é imprescindível o conhecimento do estado dessas tensões e das tensões externas aplicadas, para que se possa realizar a prevenção e controle das mesmas.

Com o objetivo de consolidar a aplicação do processo de soldagem GMAW-CW, este trabalho apresenta como sua principal justificativa a possível utilização do processo na indústria metal-mecânica regional na medida em que o mesmo oferece várias características positivas, como por exemplo, maior produtividade, melhora metalúrgica (redução de tamanho de grão) e menor deformação estrutural da junta soldada em comparação a processo GMAW convencional, conforme já comprovado, experimentalmente. Essas características positivas são de grande interesse para as indústrias, pois, quanto maior produtividade, por exemplo, menor tempo na entrega dos produtos acabados, conseqüentemente, mais rápida a entrada de receita para a empresa.

Em relação a motivação, a principal motivação desta tese é baseada no processo de soldagem GMAW-CW, desenvolvido na Universidade Federal do Pará pelo grupo de pesquisa LCAM (Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos), na medida em que se busca a tomada do conhecimento dos níveis de tensões residuais quando há a entrada do arame frio no processo GMAW convencional e que, teoricamente, supõe-se que essas tensões são menores em relação às geradas pelas soldas GMAW. Portanto, a partir do conhecimento dessas tensões, pode-se melhorar o processo CW, elevando-se o grau de confiança de emprego do mesmo e, conseqüentemente, uma maior possibilidade de sua aplicação em escala industrial.

A outra motivação para o desenvolvimento desta tese, é a empregabilidade de técnicas não destrutivas utilizadas para determinar tensões residuais, através das técnicas de ultrassom (birrefringência acústica) e difração de raio X. A difração de raio X já é uma técnica consolidada no mercado e existem diversos trabalhos na literatura sobre a empregabilidade da mesma. Por outro lado, a birrefringência acústica é mais recente,

principalmente no Brasil. Dessa forma, a birrefringência acústica foi utilizada de forma a consolidar sua metodologia de aplicação, comparar com a técnica de difração de raio X e disseminar sua aplicação pelo Brasil. Além disso, cabe ressaltar que a utilização de técnicas não destrutivas na medição de tensões adotadas neste trabalho é de relevante importância, pois a aplicação dessas técnicas em laboratório e em campo sem a necessidade de destruir o material é objeto de estudos tanto da comunidade acadêmica quanto da indústria.

### 1.3 OBJETIVOS

- **Objetivo Geral**

- Determinar e avaliar o nível de tensões residuais gerado pelo processo de soldagem GMAW-CW em comparação ao processo GMAW, de forma a consolidar o primeiro processo e com isso, aplica-lo na indústria.

- **Objetivos Específicos**

Para o alcance do objetivo principal, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinar e analisar a birrefringência acústica do material como recebido, BA0.
- Determinar e analisar as tensões residuais nas direções longitudinal e transversal ao cordão no MB após as soldagens GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%) por birrefringência acústica.
- Determinar e analisar as tensões residuais nas direções longitudinal e transversal ao cordão na ZF, na ZTA e MB após as soldagens GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%) por difração de raio X.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese está dividida em sete capítulos. O Capítulo 1 tem como finalidade apresentar o tema, a justificativa, a motivação, o objetivo da pesquisa e listar o conteúdo dos capítulos que serão apresentados no decorrer do trabalho. O Capítulo 2 apresenta uma revisão geral sobre tensões residuais, seus conceitos, origens, classificações e as tensões originadas por processos de soldagem, além de suas principais técnicas de medições. O Capítulo 3 descreve uma revisão dos conceitos de acustoelasticidade e birrefringência acústica e pesquisas sobre a técnica de birrefringência acústica utilizada para a medição de tensões residuais. No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos, bem como o planejamento dos experimentos, equipamentos utilizados nos procedimentos experimentais de soldagem, equipamentos utilizados para caracterização química, mecânica e metalográfica do material e equipamentos adotados para determinar o tempo de percurso da onda ultrassônica e medição de tensões residuais por difração de raio X. No Capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões relativos aos experimentos realizados. As discussões convergem para o objetivo principal, que é determinar através da birrefringência acústica e difração de raio X, as tensões residuais geradas por processos de soldagem. O Capítulo 6 apresenta as conclusões principais derivadas dos estudos realizados e no Capítulo 7 são apresentadas as propostas de futuros trabalhos nessa linha de pesquisa, bem como sugestões para aprimoramento do trabalho desenvolvido nesse doutoramento, a partir dos resultados deste. Após este último capítulo são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Ao final, são mostrados os Apêndices com conteúdo que auxiliarão no entendimento do trabalho.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta inicialmente uma breve revisão dos processos de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e GMAW-CW (*Gas Metal Arc Welding-Cold Wire*), os quais serão confrontados no que tange a introdução de tensões residuais pelos dois processos em uma junta soldada. Em seguida, é abordado o tópico sobre tensões residuais, discorrendo-se sobre seu conceito, origens, tipos, seu comportamento (trativas ou compressivas) na soldagem e, por último, são abordadas as principais técnicas utilizadas para medição de tensões residuais.

#### 2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

O processo de soldagem GMAW, conhecido também como soldagem MIG/MAG (*MIG-Metal Inert Gas e MAG-Metal Active Gas*) é um processo de soldagem que utiliza um arco elétrico entre um eletrodo metálico de alimentação contínua e a poça de fusão. O processo é utilizado com a blindagem de um gás fornecido externamente, e sem a aplicação de pressão. O conceito básico de GMAW foi introduzido em 1910, mas, somente em 1948 o processo foi disponibilizado comercialmente. Inicialmente, sua aplicação foi utilizada para soldagem de alumínio, magnésio e suas ligas utilizando gás inerte (argônio) (AWS, 1997). O processo GMAW é normalmente operado de forma semi-automática, podendo ser também mecanizado ou automatizado (AWS, 2001). A Figura 2.1, mostra esquematicamente algumas regiões da junta soldada pelo processo GMAW, como por exemplo, o metal fundido e solidificado. Além de alguns acessórios, como o arame energizado e o bico de contato.

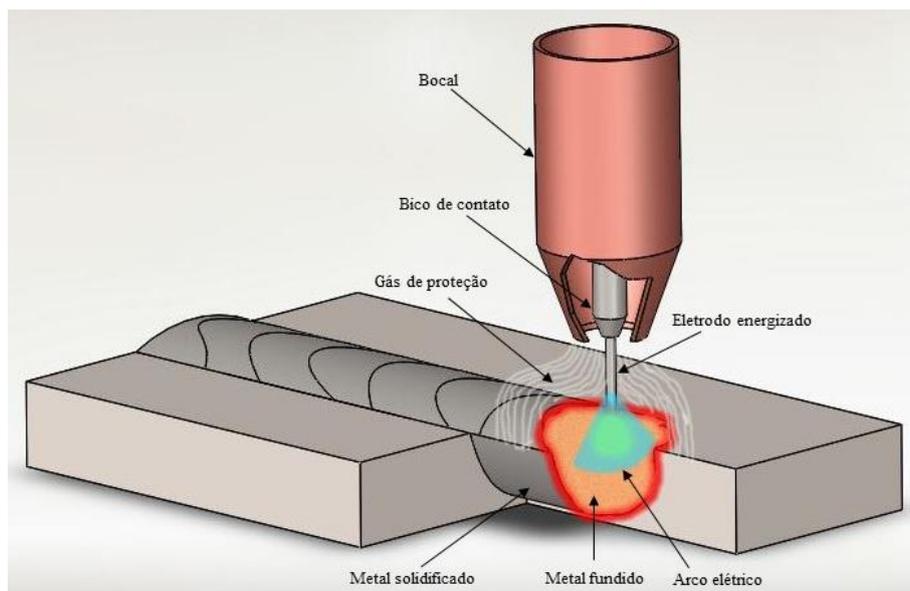


Figura 2.1 - Desenho esquemático do processo GMAW. Fonte: Autor (2017).

Os equipamentos e acessórios básicos utilizados no processo GMAW e adaptado para o GMAW-CW, conforme mostrados na Figura 2.2, consistem de uma fonte de soldagem (unidade de alimentação), tocha de soldagem (resfriada a ar ou a água), o eletrodo; gás de proteção; cabos e mangueiras; no caso de tochas arrefecido a água, um sistema de circulação de água (AWS, 2001).

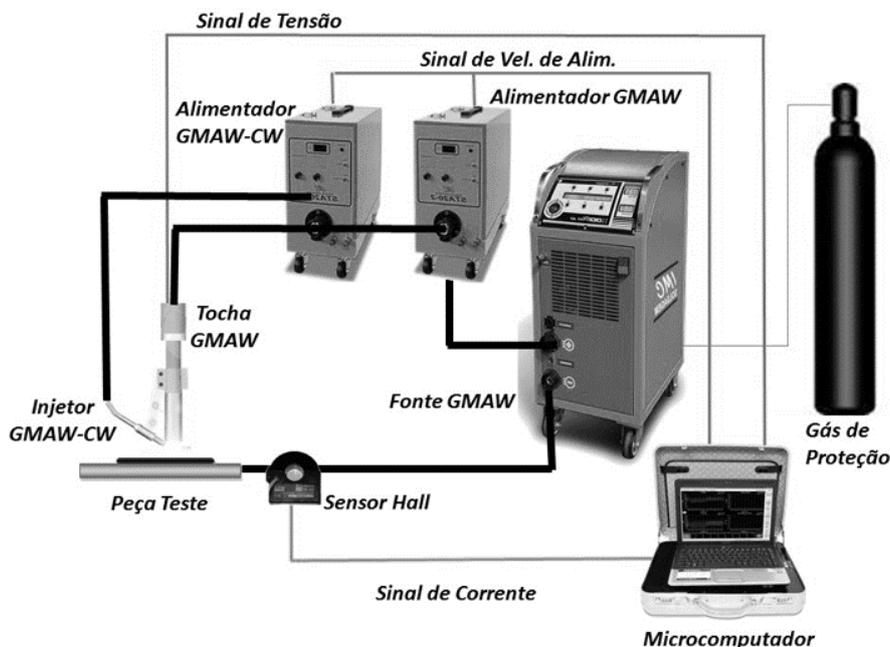


Figura 2.2 - Esquema representativo dos equipamentos utilizados na soldagem GMAW-CW. Fonte: CABRAL, (2011).

Segundo Hibino (2011), as características do processo de soldagem GMAW dependem de ajustes de parâmetros de soldagem, como por exemplo, tensão ( $U$ ), corrente ( $I$ ), velocidade de soldagem ( $V_s$ ), gás de proteção utilizado, composição química e bitola do eletrodo, tipo de junta, entre outros. Ainda segundo o autor, a combinação destes fatores influencia inúmeros fenômenos no processo de soldagem, tais como: comprimento do arco, penetração da solda, geometria da solda, modo de transferência de metal, etc.

Descrições mais completas do processo GMAW, abrangendo desde as técnicas operatórias às suas inovações recentes, podem ser encontradas em vários trabalhos disponíveis na literatura (AWS, 1997, 2001; MESSLER JR., 2004; MARQUES, *et al.*, 2016).

### 2.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO (GMAW-CW)

Os estudos da soldagem GMAW com alimentação adicional de um arame frio (não energizado) surgiram como uma variante do processo de soldagem GMAW duplo arame. Desde o início de seu desenvolvimento, em 2005, o Laboratório de Soldagem da UFPA, vem estudando as viabilidades operacionais, econômicas e metalúrgicas da soldagem com adição de arame frio para a soldagem de revestimento e enchimento de chanfros.

A proposta da soldagem GMAW-CW se estabelece como uma alternativa técnica e econômica em relação à soldagem GMAW convencional. Esta nova versão da soldagem GMAW utiliza apenas um equipamento convencional (uma fonte de tensão constante) com um cabeçote extra para alimentação do arame frio conectado à tocha de soldagem, conforme é ilustrado na Figura 2.2. Em relação ao processo duplo arame energizado (GMAW-DW), uma diferença operacional entre os processos está na inserção de apenas um arame eletrodo (energizado) conectado à fonte de soldagem que gera um único arco voltaico e outro arame frio (não energizado) adicionado à poça de fusão por um cabeçote auxiliar adicional, também mostrado na Figura 2.2. Na Figura 2.3 é apresentado de forma esquemática o arame frio no processo GMAW-CW.

Estudos iniciais desenvolvidos por Bacelar e Ferraz (2005) apresentaram para a soldagem GMAW-CW uma produção média de 70% acima da soldagem GMAW convencional, com bons níveis de estabilidade do arco elétrico e qualidade superficial da união. A introdução do arame frio também reduz a diluição, o tamanho da zona termicamente afetada (ZTA) e, também gera menor deformação estrutural da junta soldada (RIBEIRO, 2017).

Vários trabalhos, (Sábio, 2007; Cabral, 2011; Marques, 2012; Assunção, 2013 e Ribeiro, 2017), disponíveis na literatura podem ser consultados para um entendimento mais detalhado e para um conhecimento mais sólido dos resultados do processo GMAW-CW.

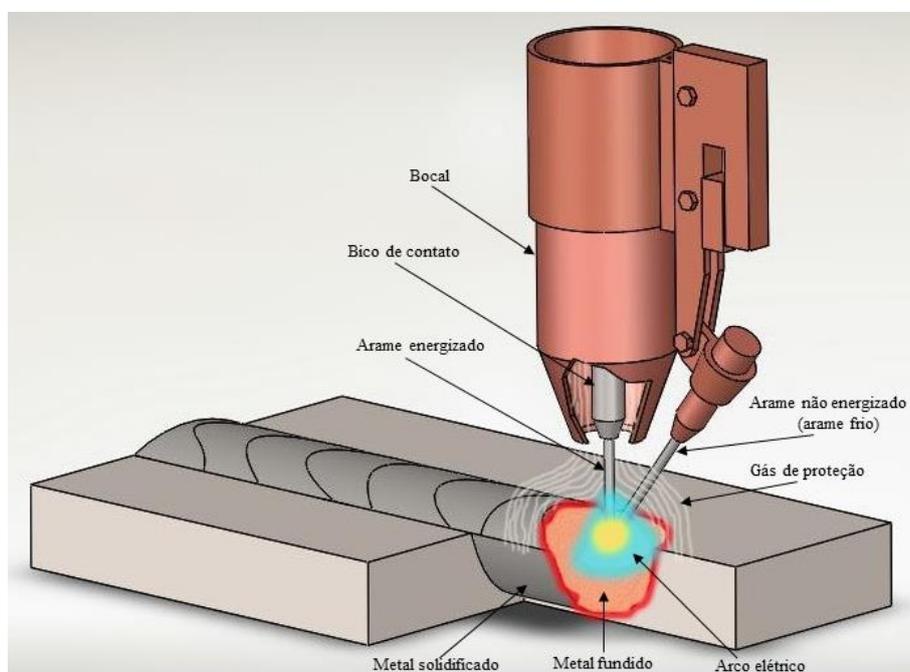


Figura 2.3 - Desenho esquemático do processo GMAW-CW. Fonte: Autor (2017).

## 2.4 TENSÕES RESIDUAIS

### 2.4.1 Definição e Origens das Tensões Residuais

As tensões residuais são tensões que existem em materiais e estruturas, independente da presença de quaisquer cargas externas ou gradientes térmicos (AWS, 2010). Essas tensões são auto equilibrante, isto é, a soma da força e momento resultantes

de tensões trativas e compressivas em todo o volume do material ou estrutura devem ser nulos. Por exemplo, a Figura 2.4 ilustra, esquematicamente, como a distribuição de tensões residuais em uma folha de vidro temperado pode existir sem uma carga externa. Nessa figura, as tensões trativas na região central (no interior da peça) equilibram as tensões de compressão nas superfícies (SCHAJER, 2013).

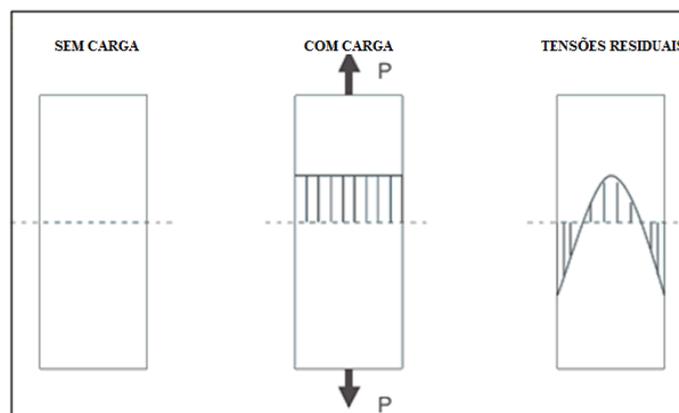


Figura 2.4 - Diagrama esquemático da seção transversal de uma folha de vidro temperado que mostra como as tensões residuais podem existir na ausência de uma carga externa. Fonte: Adaptado de SCHAJER, (2013).

Esse auto equilíbrio das tensões residuais mostrado na Figura 2.4 também pode ser verificado nas Equações 2.1 e 2.2 (MASUBUCHI, 1980).

$$\int \sigma \cdot dA = 0 \quad (2.1)$$

$$\int dM = 0 \quad (2.2)$$

em que  $dA$  é a área e  $dM$  é momento resultante.

Ainda segundo Schajer (2013), quase todos os processos de fabricação criam tensões residuais. Além disso, as tensões podem também se desenvolver durante a vida do componente fabricado em serviço. Estas tensões se desenvolvem como uma resposta a deformações elásticas locais desordenadas no interior do componente, e também devido a deformações plásticas não uniformes. Os mecanismos para a criação de tensões residuais incluem os itens relacionados a seguir.

- a) Deformação plástica não uniforme. Ocorrem, por exemplos, em processos de fabricação que alteram a forma do material incluindo forjamento, laminação, dobramento e extrusão;
- b) Modificação da superfície. Exemplos desses geradores de tensões residuais ocorrem na fabricação durante a usinagem, moagem, chapeamento, etc., e em serviço, por corrosão ou oxidação;
- c) Mudanças de fase e/ou densidade do material, muitas vezes na presença de grandes gradientes térmicos. Como por exemplo, durante o processo de soldagem (devido a dilatação, contração e aos ciclos térmicos não uniformes da junta soldada), fundição e têmpera, em que ocorre a transformação de fase de metais.

A Figura 2.5 ilustra, esquematicamente, exemplos de algumas formas típicas em que as tensões residuais são criadas em materiais de engenharia.



Figura 2.5 - Exemplos de algumas formas típicas de tensões residuais. Fonte: Adaptado de WITHERS e BHADESHIA, (2001a).

## 2.4.2 Tipos de Tensões Residuais

Com base em Withers e Bhadeshia (2001a), as tensões residuais podem ser classificadas em três tipos básicos ou também como macro ou microtensões, as quais são descritas a seguir.

### a) Macrotensões Residuais ou Tipo I

As macrotensões residuais (Figura 2.6a), as quais são muitas vezes chamadas de tensões residuais do tipo I, podem variar dentro do corpo do componente em uma escala muito maior do que o tamanho do grão. Exemplos desses tipos de tensões residuais são aquelas causadas por deformação plástica não uniforme de uma barra dobrada, por exemplo, e, também se originam a partir de pequenos gradientes térmicos, como por exemplo, aqueles causados durante as operações de soldagem ou de tratamento térmico. Além disso, as tensões residuais do Tipo I também representam as tensões residuais média que atuam dentro de todas as fases presentes no volume do material macroscópico

### b) Microtensões Residuais ou Tipo II

As tensões residuais Tipo II (Figura 2.6b) descrevem o desvio médio do nível de tensões residuais macroscópicas de um cristal individual (material de fase única). Estas tensões variam em escala individual de grão. As tensões residuais do tipo II estão, geralmente, presentes em materiais policristalinos, devido sua estrutura apresentar características elásticas e plásticas diferentes entre as regiões vizinhas e diferentes orientações de grãos. Tensões mais significativas ocorrem em escala de grão quando a microestrutura apresenta várias fases ou transformação de fase.

### c) Microtensões Residuais ou Tipo III

Esses tipos de microtensões residuais representam o desvio local (pontual) das tensões residuais média de um cristal individual a nível atômico. Esses tipos de tensões

ocorrem dentro de um grão (Figura 2.6c), essencialmente, como um resultado da presença de discontinuidades nas redes cristalinas ou de outros defeitos cristalinos, como por exemplo, vazios e átomos de soluto (impurezas).

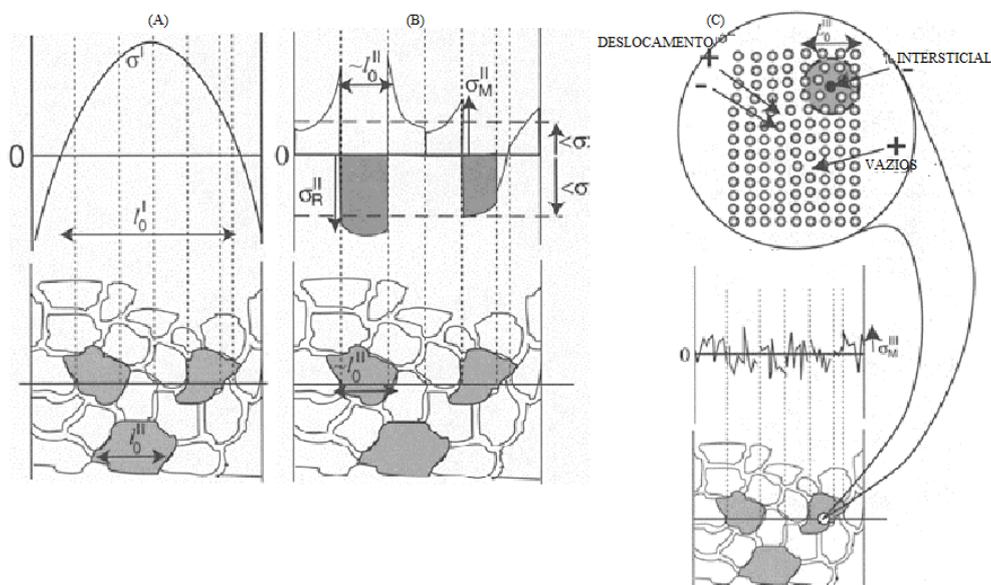


Figura 2.6 - (a) Macro tensões residuais ou Tipo I. (b) Micro tensões residuais ou Tipo II e (c) Micro tensões residuais ou Tipo III. Fonte: Adaptado de HUTCHINGS *et al.*, (2005).

Em relação ao tipo de tensões residuais a ser medido, Kandil *et al.*, (2001) afirmam que ao se comparar resultados de diferentes técnicas de medições, algumas considerações devem ser feitas em relação ao volume da amostra a ser retirada e a resolução de cada técnica de medição, principalmente, quando as tensões residuais de interesse são as dos Tipos II e III. Nesse sentido, é importante considerar o conceito de volume característico da amostra, o qual pode ser usado para descrever o volume sobre o qual dado tipo de tensões residuais tende a zero. Baseado nisso, a maioria das técnicas de remoção de material (furo, remoção de camadas, por exemplo) remove grandes volumes de material, portanto, as tensões residuais dos tipos II e III tendem a zero, assim, somente as tensões do tipo I (macrotensões residuais) podem ser medidas.

A Figura 2.7 mostra um esquema em detalhes os três tipos de tensões residuais. Ainda de acordo com Andrino (2003), a Figura 2.7 mostra também o patamar médio descrito como tensão  $\sigma^I$ , a variação em torno dessa média, ocorrida de grão para grão, chamada de tensão  $\sigma^{II}$ , e a variação em cada grão definida como tensão  $\sigma^{III}$ .

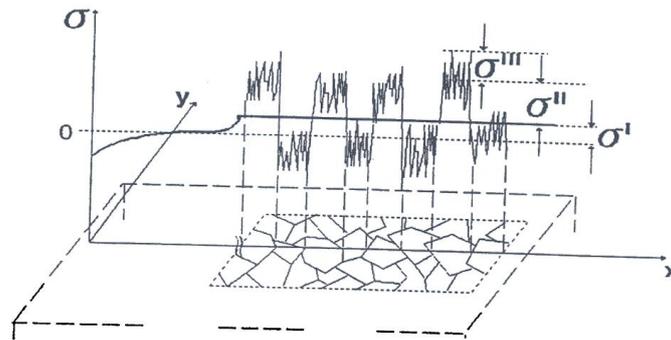


Figura 2.7 - Classificação das tensões residuais de acordo com seus níveis. Fonte: KANDIL *et al.*, (2001).

### 2.4.3 Efeitos das Tensões Residuais

As tensões residuais, conforme mencionado anteriormente no item 2.4.1, originam-se durante a maioria dos processos de fabricação envolvendo a deformação plástica do material, tratamento térmico, usinagem ou operações de processamento que modificam a forma do material ou alteram suas propriedades. Essas tensões podem ser suficientemente elevadas para causar deformação plástica tanto a nível macroscópico quanto microscópico, o que pode afetar severamente o desempenho dos componentes, além da estabilidade dimensional da estrutura. Por esta razão, é vital que algum conhecimento do estado interno de tensões seja adquirido através de medidas experimentais ou por meio de modelo que façam a predição dessas tensões (KANDIL *et al.*, 2001).

Também de acordo com Kandil *et al.*, (2001), tanto a magnitude quanto a distribuição de tensões residuais podem ser consideradas críticas para o desempenho dos componentes e devem ser consideradas em projetos. Pois, em todo corpo livre, o equilíbrio de tensões deve ser mantido, o que significa que a presença de tensões residuais trativas em um componente deve ser equilibrada pelas tensões compressivas. Contudo, cabe ressaltar que, na realidade isso não ocorre, ou seja, tanto a magnitude, quanto a natureza das tensões residuais são imprevisíveis, dessa forma, não se pode afirmar que as mesmas são auto equilibrantes. Kandil *et al.*, (2001) afirmam ainda que as tensões residuais trativas na superfície de um componente são geralmente indesejáveis, uma vez que podem contribuir para o surgimento trincas, reduzem a resistência à falha por fadiga, além de gerarem corrosão sob tensão. Por outro lado, as tensões residuais de compressão presentes nas camadas superficiais são, geralmente, benéficas, já que produzem o efeito

oposto às tensões trativas, isto é, aumentam a resistência à fadiga e a resistência à corrosão sob tensão no material.

Andrino (2003) comenta que os efeitos das tensões residuais na resistência mecânica de um material podem ser melhor compreendidos, considerando-se por exemplo, uma placa metálica contendo tensões residuais em toda sua extensão. Pois se uma tensão, com comportamento conhecido, for aplicada no mesmo ponto e plano de atuação das tensões residuais existentes, a tensão total ( $\sigma_t$ ) será a soma dos efeitos das tensões residual ( $\sigma_r$ ) e da aplicada ou de serviço ( $\sigma_s$ ), dada pela Equação 2.3. Para explicar melhor a Equação 2.3, Lu (2002) afirma que se as tensões residuais são adicionadas às tensões de serviço ou aplicada (tensão de residual tração, por exemplo), assim, a estrutura é sobrecarregada localmente devido a tensões residuais e dependendo da magnitude resultante, a mesma pode entrar em colapso ou não.

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_r \quad (2.3)$$

Entretanto, ainda segundo Lu (2002), se pelo contrário, uma operação de acabamento apropriado (Jateamento por granalha, por exemplo) é utilizado para introduzir tensões residuais de compressão, a tensão local presente na peça é aliviada, tendo como resultado, o aumento do desempenho mecânico dos materiais. Andrino (2003) também afirma que existem muitos tratamentos térmicos e mecânicos que utilizam esse conceito (adição de tensões residuais) buscando introduzir tensões residuais em componentes mecânicos, com o objetivo de reduzir as tensões trativas e, dessa forma, permitir uma condição de trabalho melhor ao equipamento. Nesse contexto, a Figura 2.8 mostra a superposição das tensões aplicada ou de serviço e residual em um componente qualquer.

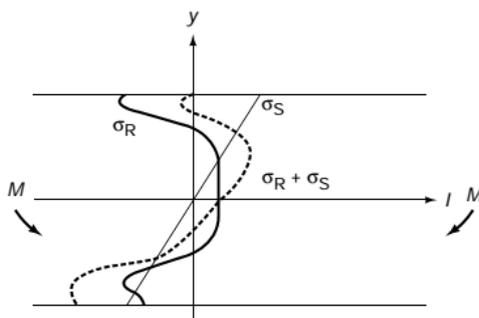


Figura 2.8 - Superposição das tensões residuais e aplicadas. Fonte: (LU, 2002).

#### 2.4.4 Tensões Residuais em Soldagem

Nas operações de soldagem de um modo geral, em particular nos processos por fusão, há o envolvimento de aquecimento alto e localizado da região a se unir. Nesse sentido, essas regiões aquecidas tendem a se dilatar, entretanto, essa dilatação é dificultada pelas regiões adjacentes submetidas a temperaturas menores, surgindo dessa forma, deformações elásticas e, muitas das vezes, deformação plástica no cordão de solda e nas regiões mais próximas deste. Tendo assim, como resultado, ao final da soldagem, tensões residuais e mudanças permanentes na forma e na dimensão (distorções) da estrutura soldada (MARQUES *et al.*, 2016).

Como se verifica no parágrafo acima, surgiu a frase “tensões residuais em soldagem”. Aqui é importante colocar a diferença de dois conceitos que estão intrinsicamente relacionados, mas que de acordo com a literatura são diferentes, são os conceitos de tensões térmicas e de tensões residuais. As tensões térmicas são aquelas geradas quando a variação de temperatura não for distribuída uniformemente ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico (BARRON e BARRON, 2011; MARQUES *et al.*, 2016). Já tensões residuais, conforme a norma AWS (2010) são aquelas que estão presentes numa junta soldada e/ou material de base que não estão submetidos aos esforços externos e/ou gradientes térmicos.

No caso da soldagem, Scotti (2014), denomina tensões térmicas as tensões geradas pela soldagem, mesmo após o resfriamento à temperatura ambiente da junta. No mesmo trabalho, o autor afirma que, quando o material não se deforma (macroscopicamente, como distorções, ou microscopicamente, na forma de acomodações de tensões), as tensões térmicas que permanecem internamente presas no material se tornam em tensões residuais, denominação esta utilizada por outros autores. Masubushi (1980) afirma que, como junta soldada é aquecida localmente pela fonte de calor e como a distribuição de temperatura não é uniforme e além disso, muda com o avanço da soldagem, então, durante o ciclo de soldagem, deformações complexas ocorrem no metal de solda e no metal de base de regiões perto da solda, gerando tensões térmicas transientes.

Como se observa, os conceitos de tensões térmicas e residuais em soldagem são aplicados de forma diferente por vários autores, porém, neste trabalho, será adotado e denominadas de tensões residuais, as tensões térmicas que permanecerem nas juntas soldadas após o resfriamento das mesmas.

Nesse contexto, as tensões residuais que se originam do processo de soldagem são funções de diversas variáveis como os parâmetros utilizados na execução do cordão, entre eles, têm-se o número de passes, aplicações a geometria do cordão e da junta, composição química dos metais de base e de adição, restrições à dilatação e contração térmica, etc. (SIQUEIRA FILHO, 2012).

Estefen *et al.*, (2008) afirmam que as fontes de tensões residuais consideradas após a soldagem são a contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas (*shrinkage residual stresses*), surgimento de deformações plásticas, resfriamento superficial mais intenso (*quenching residual stresses*) e transformação de fase (*transformation residual stresses*). De acordo com Estefen *et al.*, (2008) e Siqueira Filho, (2012), a principal parcela que contribui durante um processo de soldagem, para a formação final de tensões residuais é a originada pela restrição à contração do material durante o resfriamento. Em que esta contração ocorre devido ao gradiente de temperatura existente na peça que faz com que a região com temperatura elevada seja contida pela região com temperatura mais baixa, ocasionando plastificação local. O nível de tensões residuais alcançado após o resfriamento de uma estrutura é também dependente das deformações plásticas acumuladas, as quais variam ponto a ponto.

Em relação as tensões residuais que surgem devido ao resfriamento ser mais rápido da superfície, elas ocorrem porque o processo de resfriamento não é homogêneo ao longo da espessura. Assim, a superfície se resfria mais rapidamente do que o interior. Desta forma, além do gradiente de temperatura nas direções longitudinal e transversal ao cordão de solda, será também estabelecido um gradiente de temperatura ao longo da espessura da peça. Este gradiente de temperatura poderá ocasionar deformação plástica localizada e, conseqüentemente, tensões residuais ao longo da espessura. Ocorrerá um nível elevado de tensões residuais deste tipo quando a junta soldada apresentar elevado gradiente de temperatura ao longo da espessura (no caso de chapas espessas), e baixo limite de escoamento nesta faixa de temperaturas (ESTEFEN *et al.*, 2008).

Por último, tem-se as tensões residuais devido à transformação de fases metalúrgicas que ocorre na zona térmica afetada pelo calor (ZTA) e na zona fundida (ZF). Nestas regiões, as transformações de fases possuem maior volume específico causando uma expansão térmica, o que é impedida pelo restante do material, gerando tensões compressivas na região transformada (ESTEFEN *et al.*, (2008); SIQUEIRA FILHO, (2012)).

De um modo geral, as tensões residuais oriundas da soldagem estão associadas com a ocorrência de deformação plástica devido aos ciclos térmicos não uniformes do processo, quando o material é aquecido. Esse aquecimento provoca aumento das dimensões, proporcionalmente, à variação de temperatura, como pode ser confirmado pela Equação 2.4.

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Em que ( $\Delta l$ ) corresponde a variação entre o comprimento inicial ( $l_0$ ) e o final ( $l$ ), ( $\alpha$ ) é o coeficiente de dilatação térmica linear e ( $\Delta T$ ) é a variação entre de temperatura inicial e final ( $\Delta T = T - T_0$ ).

Como a variação de temperatura ao longo da junta soldada não apresenta uma distribuição uniforme e também para o caso da peça não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões térmicas surgem nesse momento e tensões residuais podem se desenvolver posteriormente se essas tensões térmicas não forem aliviadas completamente após o ciclo térmico do processo. Nesse contexto, vários modelos são utilizados para explicar o fenômeno das tensões residuais originadas pelas tensões térmicas (tensões residuais). O modelo básico estudado por vários autores (MASUBUCHI, 1980; OKUMURA e TANIGUCHI, 1982; AWS, 2001; MESSLER JR, 2004; 2001; MARQUES, *et al.*, 2016), consiste de um arranjo experimental com três barras metálicas de mesmo comprimento e seção transversal (barras 1, 2 e 3), conectadas firmemente a barras da base (barras estas rígidas, ou seja, podem se mover, mas não fletem ou se deformam plasticamente) comuns em suas extremidades, conforme mostra a Figura 2.9, de forma que nenhuma dessas barras e as bases tenham suas dimensões modificadas, independentemente uma da outra. Essa dependência de movimento entre cada componente da estrutura permite que as tensões residuais, oriundas das tensões térmicas, sejam transmitidas a todos os componentes da estrutura.

Segundo Scotti (2014), o modelo de três barras é muito usado para estimar qualitativamente as tensões residuais a serem geradas num material, na ausência de solicitação externa e em que o sistema está em auto-equilíbrio. Ainda de acordo com o autor, só com esse modelo não se consegue explicar a transição da intensidade das tensões entre o metal de solda e o metal de base. Tampouco se consegue prever o comportamento das intensidades de tensões caso a propriedades mecânicas da ZAC (Zona Afetada pelo

Calor) e do metal de solda sejam diferentes. Também não é possível com esse modelo explicar o perfil das tensões transversais. Nesse sentido, Scotti (2014), propõe dois modelos, de uma e cinco barras para descrição dos fundamentos da geração de tensões residuais em juntas soldadas, formulados a partir do modelo de três barras, mas que consegue um maior alcance nas definições das intensidades de tensões ao longo da seção transversal e longitudinal de uma união soldada.

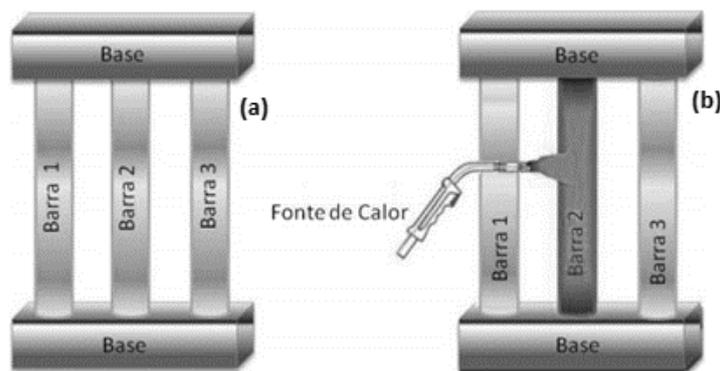


Figura 2.9 - (a) Conjunto de barras presas nas extremidades e (b) barra central sendo aquecida. Fonte: Adaptado de AWS, (2001).

Tendo como base o modelo das três barras, no qual um aquecimento é imposto somente à barra 2, a mesma tenderá a se dilatar, entretanto, será impedida pelas outras através das bases. Por causa da dilatação, tensões de compressão se desenvolverão, inicialmente, na barra central e, tensões de tração de magnitude igual à metade do valor da barra central surgirão nas barras laterais, ou seja, o sistema entra em auto equilíbrio, para esse modelo. Este fato é mostrado pela Equação 2.1, em que as tensões existentes no material na ausência de uma solicitação externa são nulas (a força e o momento resultantes destas tensões em uma dada seção da peça são nulos) e corroborado pela Equação 2.5, a qual comprova o auto equilíbrio do sistema em relação as tensões existentes no mesmo.

$$\sigma_1 \cdot A_1 \cdot \sigma_2 \cdot A_2 \cdot \sigma_3 \cdot A_3 = 0 \quad (2.5)$$

Nesta equação,  $(\sigma_i)$  e  $(A_i)$  são a tensão média e a área da seção transversal de cada barra, respectivamente. E, considerando-se que as seções das barras são iguais ( $A_1 =$

$A_2 = A_3 = 0$ ) e que o mesmo ocorre nas barras externas, ou seja,  $\sigma_1 = \sigma_3$ . Assim, a tensão nas barras laterais é obtida de acordo com a Equação 2.6.

$$\sigma_1 = -\frac{\sigma_2}{2} \quad (2.6)$$

Fazendo-se uma analogia do modelo de três barras com a situação que ocorre em uma junta soldada, a Figura 2.10 mostra a evolução da tensões térmicas na barra central em função da variação de sua temperatura. Nessa figura, no ponto (A), o nível de tensões térmicas ou residuais é nulo. Quando se inicia o aquecimento da barra 2, esta tende a se expandir passando a empurrar as barras da base. Pensando no equilíbrio de ação e reação, as bases estariam comprimindo a barra 2. Assim, as barras 1 e 3 ficariam sob ação de tração, porém a barra 2 ficaria sob ação de compressão. Nesse caso, a barra central apresenta um esforço de compressão, que tende a aumentar com a elevação da temperatura, deformando-se elasticamente em compressão, ponto (B), onde as tensões térmicas atingem o limite de escoamento em compressão.

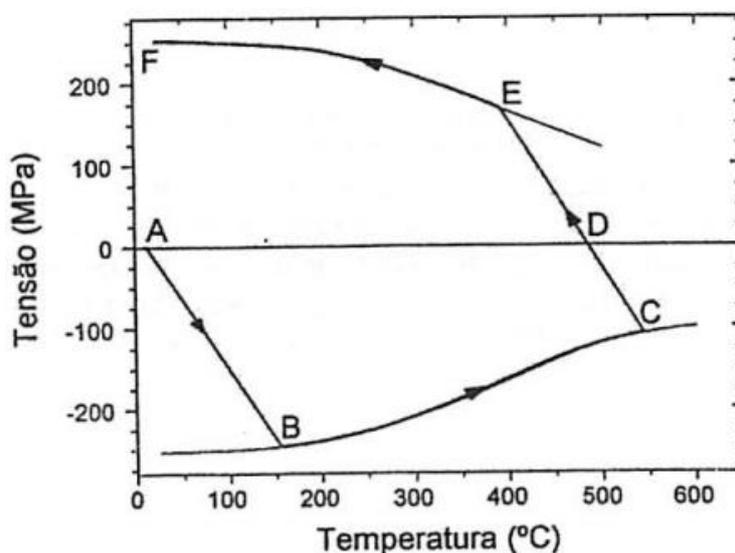


Figura 2.10 - Variação das tensões internas em função da variação da temperatura na barra central. Fonte: MARQUES *et al.*, (2016).

Entretanto, supondo que a barra 2 continue sendo aquecida, esta passa a ter seu limite de escoamento reduzido na mesma proporção do aquecimento (a força aplicada faz apenas o material deformar plasticamente, curva B-C, sem aumentar sua força de reação).

Assim, a força exercida sobre as barras da base devido à dilatação vai progressivamente se tornando menor. Supondo também que a barra 2 alcance a temperatura de fusão, esta dilatação se torna nula (o líquido dilatando é compressível, além de compensar o crescimento pelas laterais sem resistência), assim como os esforços de tração sobre as barras 1 e 3 e o de compressão sobre a barra 2.

Se o aquecimento é interrompido no ponto *C*, a barra central se contrai termicamente com a queda da temperatura e a contração que agora atua nesta região passa a puxar as barras da base, que, por sua vez, passam a comprimir as barras 1 e 3. Devido às restrições impostas pelas barras externas, as tensões de compressão na barra central são reduzidas e se tornam nulas para uma dada temperatura acima da temperatura inicial (ponto *D*), quando o seu comprimento se torna igual ao das barras 1 e 3. Com a continuação do resfriamento, a barra 2 tem seu limite de escoamento aumentado progressivamente, assim, tensões de tração na ordem desse limite de escoamento do material (Ponto *E*) e deformação elástica (curva *C-D*) passam a atuar nessa barra.

Quando o processo termina, voltando à temperatura ambiente (Ponto *F*), a barra central, devido a deformações elásticas e plásticas geradas pelo gradiente térmico do processo de soldagem, a barra 2 apresentará tensões residuais e as barras 1 e 3 apresentarão tensões residuais de compressão (valor igual à metade da tensão na barra central), contanto que as seções transversais sejam semelhantes.

Como se pode verificar, o processo de soldagem por fusão de uma junta soldada é análogo ao modelo das três barras, ou seja, a região da solda se comporta como a barra 2 e as regiões mais afastadas do metal de base, como as barras 1 e 3. Logo, com base nesse raciocínio, a junta soldada apresenta o desenvolvimento de tensões residuais de tração, enquanto na região do metal de base mais afastado do cordão de solda são desenvolvidas tensões de compressão. Porém, voltando a ressaltar, que esse modelo não leva em consideração a formação da zona termicamente afetada (*ZTA*) e nem a geração de tensões transversais ao cordão. Portanto, tornando-o limitado para a análise. De forma simplificada, a Figura 2.11 ilustra esquematicamente a distribuição de tensões residuais no sentido longitudinal do cordão soldado e medidas ao longo da sua direção transversal, em comparação ao modelo de três barras.

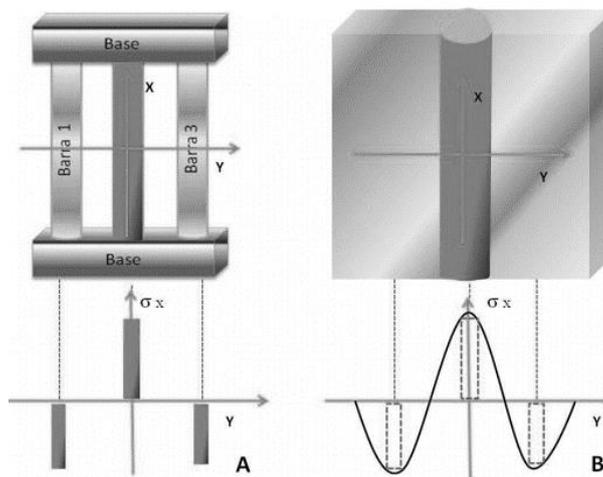


Figura 2.11 - (a) Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas no modelo de três barras. (b) tensões residuais geradas na direção longitudinal ( $\sigma_x$ ) do cordão, medidas ao longo de  $y$ , de uma solda de topo. Fonte: (AWS, 2001).

#### 2.4.5 Distribuição de Tensões Residuais e Temperaturas em Juntas Soldadas

Devido a junta soldada ser aquecida localmente pela fonte de calor do processo, a distribuição de temperatura não é uniforme, dessa forma, algumas alterações estruturais e metalúrgicas, por exemplo, progridem durante a soldagem. Nesse contexto, a Figura 2.12, mostra esquematicamente as mudanças típicas na temperatura e nas tensões térmicas que ocorrem durante o procedimento de soldagem em uma placa fina medidas na direção do eixo  $x$ , mas em pontos ao longo do eixo  $y$ . O arco de soldagem que está se deslocando a uma velocidade  $v$ , está atualmente localizado no ponto  $O$ . A área em que ocorre a deformação plástica durante ciclo térmico é mostrado pela área sombreada  $M-M$ . A região em que o metal é fundido é indicado pela elipse perto de  $O$ . A região fora da área sombreada permanece no regime elástico ao longo de todo o ciclo térmico de soldagem (AWS, 2001; MESSLER JR, 2004; MASUBUCHI, 2011).

Ainda de acordo com AWS, 2001; Messler Jr, 2004; Masubuchi, 2011, o gradiente de temperatura ao longo de vários cortes transversais do cordão de solda é indicado na Figura 2.12b. No corte  $A-A$ , não existem variações de temperatura e o material ainda está isento de tensões, isto porque esta região está distante da poça de fusão e também ainda não foi aquecida pela fonte de calor. No entanto, a distribuição de temperatura é muito alta no corte  $B-B$ , pois o mesmo atravessa o arco de soldagem. Ao longo do corte  $C-C$ , um pouco distante do arco de soldagem, a distribuição de temperatura é muito menos severa e, por último, mais afastado do arco de soldagem, a temperatura no corte  $D-D$  retorna para uma distribuição uniforme.

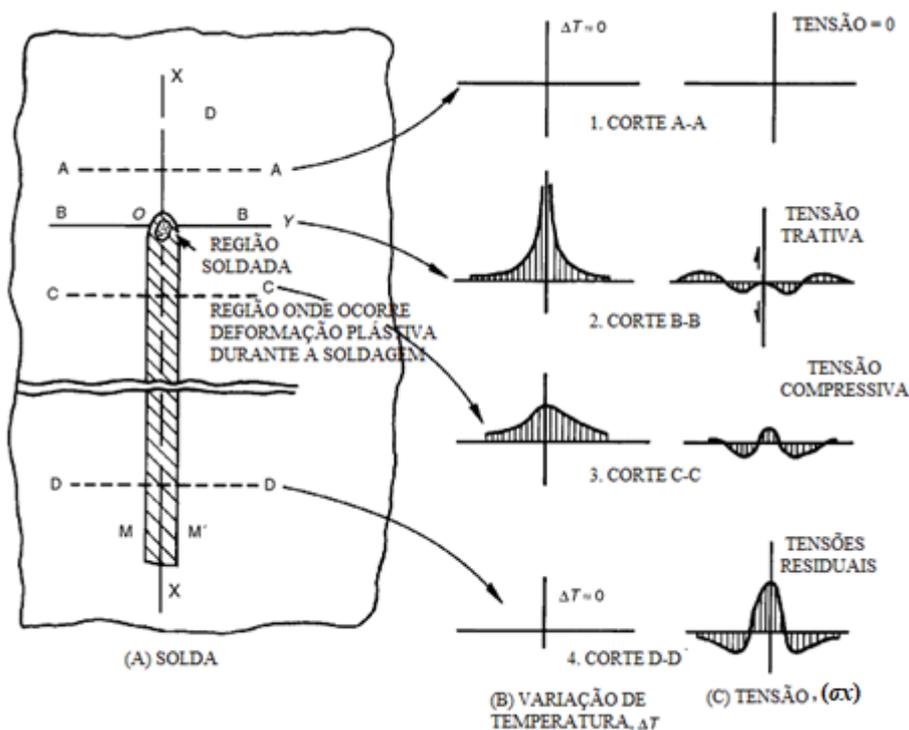


Figura 2.12 - Distribuição de temperatura,  $\Delta T$ , e tensão  $\sigma_x$  durante a produção de um cordão de solda em uma placa. Fonte: Adaptado de MASUBUCHI, (1980); AWS, (2001); MESSLER JR, (2004).

A distribuição das tensões longitudinal ou paralelas ao cordão ( $\sigma_x$ ) nos cortes A-A, B-B, C-C e D-D é ilustrada na Figura 2.12 (c). As tensões transversais ao cordão ( $\sigma_y$ ) e as tensões de cisalhamento ( $\tau_{xy}$ ), também existem em um campo de tensões bidimensional, embora estes não sejam mostrados na Figura 2.12 (c). As tensões ao longo do corte A-A são mínimas, próximas de zero, haja visto que essa região está distante da poça de fusão. A distribuição de tensões ao longo do corte B-B é complicada devido haver o aquecimento intenso dessa região. Contudo, próximo a poça de fusão surgem tensões de compressão porque o material aquecido tende a se expandir e é restringido pelas regiões mais frias do metal de base, enquanto nas regiões um pouco mais distantes da zona fundida surgem tensões trativas (AWS, 2001; MESSLER JR, 2004; MASUBUCHI, 2011).

Uma vez que as temperaturas das áreas da poça de fusão são bastante elevadas, a tensão de escoamento do material se torna muito baixa. Em outras palavras, ocorre uma situação em que as tensões nestas áreas são tão elevadas quanto o limite de escoamento do metal de base nas correspondentes temperaturas. A magnitude das tensões de compressão passa através de um máximo com o aumento da temperatura. Já as tensões

de natureza trativas a qualquer distância da solda são simplesmente geradas devido a vários fatores, como por exemplo, deformações plásticas não homogêneas.

Para o corte *C-C*, devido ao resfriamento das regiões de solda e da zona afetada pelo calor após a solidificação, o material dessa região passa a se contrair, mas é restringido por regiões mais frias e afastadas da junta soldada, surgindo dessa forma tensões trativas e compressivas junto ao cordão e nas regiões mais longe deste, respectivamente. Finalmente, após o resfriamento completo, na seção *D-D*, as tensões residuais trativas no centro da solda e na zona afetada pelo calor chegam a níveis maiores do que o limite de escoamento do material, enquanto tensões de compressão surgem em diferentes regiões do metal de base (AWS, 2001; MESSLER JR, 2004; MASUBUCHI, 2011).

A distribuição bidimensional idealizada das tensões residuais devido à contração longitudinal e transversal após a soldagem é representada pela Figura 2.13. Considerando para esta figura o eixo *x* ao longo do comprimento do cordão e o eixo *y*, transversal a este comprimento, fica claro a distribuição das tensões residuais paralelas e transversais ao cordão de solda, sendo as tensões trativas mais elevadas na região central do cordão. Fica evidente também na referida figura que, não há um equilíbrio de tensões, mas sim a geração das mesmas baseadas nas suas condições formadoras, que no caso da soldagem, pode ser devido a contração durante o processo de resfriamentos do junta.

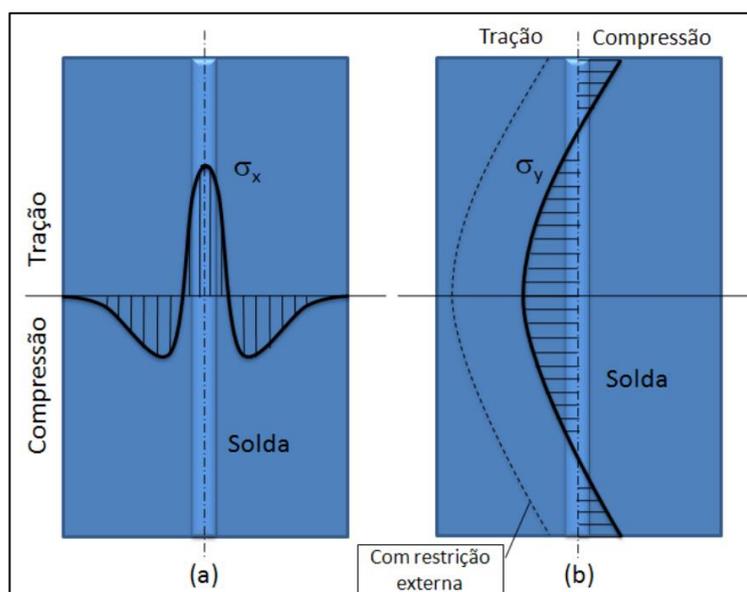


Figura 2.13 - Distribuição de tensões bidimensionais. (a) tensões longitudinais ou paralelas,  $\sigma_x$ . (b) tensões transversais,  $\sigma_y$ . ARAÚJO, (2012).

#### 2.4.6 Efeitos das Tensões Residuais em Juntas Soldadas

Messler Jr., (2004) afirma que os efeitos ou consequências das tensões residuais introduzidas em uma estrutura após um processo de soldagem são frequentemente menos óbvia, mas podem ser pelo menos tão prejudicial quanto as distorções. Esses efeitos resultam frequentemente da maneira em que ocorre a interação entre as tensões residuais e as distorções, isto é, quando se tem uma em nível elevado, a outra apresenta nível reduzido, contudo ambas são deletérias a junta dependendo dos seus valores.

Basicamente, as tensões aplicadas e as tensões residuais aumentam de forma vetorial, dependendo de suas magnitudes e da direção relativa de ambas. Como resultado, os esforços de tração aplicados aumentam as tensões residuais trativas, mas estas são reduzidas por tensões de compressão residuais. As tensões de compressão aplicadas são reduzidas por tensões de tração residuais, mas adicionadas a tensões de compressão residuais. O resultado pode ser que ocorra fratura por tração ou o encurvamento compressivo (dependendo de qual situação ocorra) em baixas tensões aplicadas, diferente do que se poderia pensar ou projetado. O efeito de carregamentos externos uniformes na distribuição de tensões residuais de uma solda de topo é mostrado na Figura 2.14.

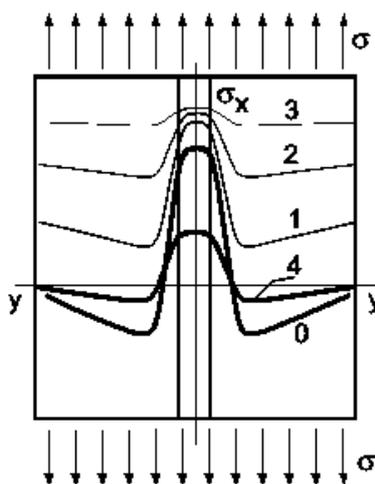


Figura 2.14 - Distribuição de tensões em um componente com uma solda de topo submetido a carregamentos crescentes (curvas 1, 2 e 3) e distribuição de tensões residuais após a liberação do carregamento (curva 4). Fonte: (AWS, 2001, MESSLER JR, 2004).

Sendo assim, quando uma estrutura soldada, contendo uma distribuição inicial de tensões residuais, curva 0 da Figura 2.14, for submetido a um carregamento de tração progressivo, as tensões residuais existentes na estrutura irão se somar diretamente às

tensões do carregamento, curvas 1, 2 e 3 da Figura 2.14, enquanto todas as deformações forem elásticas. No entanto, na medida em que o carregamento externo for aumentado aos poucos, as regiões da solda, nas quais as tensões residuais de tração são mais elevadas, devem atingir condições de escoamento plástico antes do resto do componente. Assim, tendo ocorrido essas deformações plásticas localizadas durante o carregamento, o nível de tensões residuais tende a ficar menor do que existia antes do carregamento, conforme mostra a curva 4 da Figura 2.14. Esta curva, certamente, é obtida após a retirada do carregamento sem que ocorra a fraturar o material (AWS, 2001; MESSLER Jr, 2004).

Com base nas análises, os efeitos das tensões residuais oriundas de solda de topo, Figura 2.14, podem ser resumidos conforme mostrados abaixo (AWS, 2001; MASUBUCHI, 2011).

- a) O efeito das tensões residuais oriundas da soldagem sobre o desempenho de uma estrutura soldada é significativo somente para os fenômenos que ocorrem em baixos níveis de tensões aplicadas, tais como fratura frágil, fadiga e corrosão sob tensão. Contudo, cabe ressaltar que em relação as propriedades mecânicas do material, como por exemplo, a resistência a fadiga, as tensões residuais podem ter efeitos, pois se essas tensões forem trativas e tiverem níveis maiores, poderão levar o material ao colapso.
- b) À medida que o nível de tensões aplicadas aumenta, este se soma as tensões residuais, diminuindo o efeito destas, isto ocorre porque o nível de tensão aplicada tende a se sobrepor ao nível de tensões residuais, gerando escoamento generalizado do material e reduzindo sua resistência mecânica.
- c) O efeito das tensões residuais trativas tende a diminuir após um carregamento repetido (ensaio uniaxial de tensões, por exemplo), isto significa que um carregamento mecânico contínuo pode ser utilizado para diminuir as tensões residuais trativas, na medida em que as tensões aplicadas e residuais se somam, deformam plasticamente o material aliviando suas tensões residuais trativas. Isto pode ser observado em um material não fraturado, ou seja, o carregamento é retirado antes do material romper.

## 2.5 TÉCNICAS DE MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS

Um grande número de técnicas tem sido aplicado para a medida e determinação das tensões residuais. Algumas são baseadas na medida da deformação aliviada, devido

à remoção localizada de material, chamadas técnicas destrutivas. Outras são baseadas na interação entre o campo de tensões residuais e as propriedades físicas do material (densidade, constantes elásticas, módulo de elasticidade, etc.), chamadas não destrutivas (LU, 1996; HAUK, 1997; KUDRYAVTSEV, 2008).

Ainda de acordo com Rossini (2012), as técnicas utilizadas para a medição de tensões residuais podem ser classificadas também como semi destrutivas ou mecânicas, como pode ser verificado no Fluxograma da Figura 2.15. Neste contexto, apresenta-se a seguir uma breve revisão dessas técnicas, dando-se ênfase para as técnicas de difração de raio X e birrefringência acústica utilizadas nesta tese.

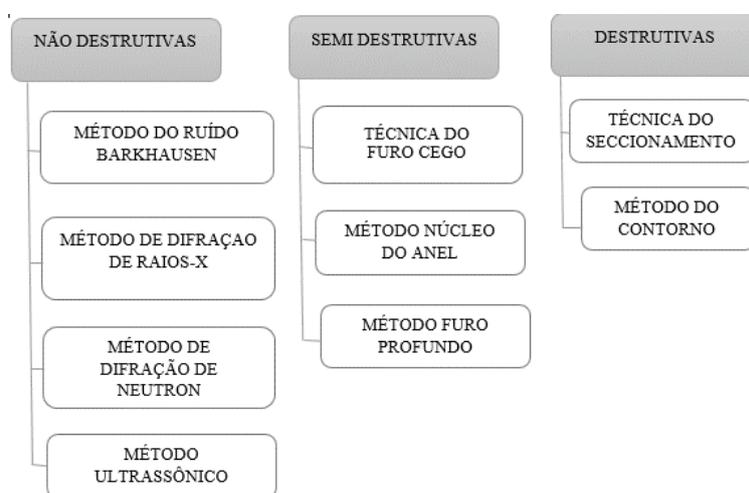


Figura 2.15 - Fluxograma das técnicas de medição de tensões residuais. Fonte: Adaptado de ROSSINI *et al.*, (2012).

## 2.5.1 Técnicas Destrutivas e Semi Destrutivas

### 2.5.1.1 Técnica de Seccionamento

A técnica de seccionamento é um método destrutivo que se baseia na medição da deformação devido à liberação de tensões residuais após a remoção do material da amostra. Tem sido amplamente utilizado para analisar as tensões residuais em seções estruturais de aço-carbono, alumínio e aço inoxidável. O método de seccionamento consiste em fazer um corte com instrumento adequado na amostra em estudo a fim de liberar as tensões residuais que estejam presentes na linha de corte. Para isso, o processo de corte utilizado não deve introduzir plasticidade ou calor na amostra, de modo que as

tensões residuais originais possam ser medidas sem a influência dos efeitos de plasticidade na superfície dos planos de corte (ROSSINI *et al.*, 2012). As deformações liberadas durante o processo de corte são geralmente medidas por extensômetros mecânicos ou elétricos e com a ajuda de equações existentes na literatura uma análise quantitativa das tensões residuais possa ser realizada. A Figura 2.16 mostra um exemplo do método de seccionamento, no qual uma sequência de corte foi realizada para avaliar as tensões residuais em uma viga em I (TEBEDGE *et al.*, 1973).

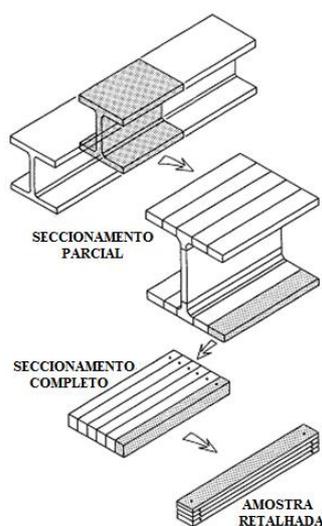


Figura 2.16 - Sequência da técnica de seccionamento. Fonte: Adaptado de TEBEDGE *et al.*, (1973).

Lu (1996) afirma também que técnica do seccionamento é bastante similar à técnica da remoção de camadas, isto é, a criação de superfícies livres permite deformação do componente e, conseqüentemente, a determinação das tensões residuais. A Figura 2.17 ilustra o seccionamento de uma amostra.

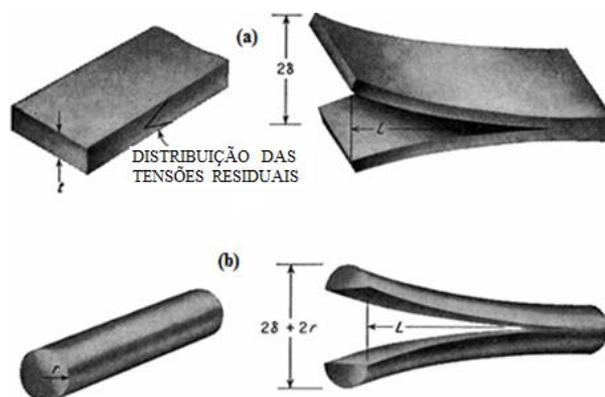


Figura 2.17 - Representação esquemática da técnica do seccionamento. Fonte: Adaptado de LU, (1996).

Nesta figura, as tensões residuais são obtidas pela medição da abertura da chapa. Para o caso da Figura 2.17a, a tensão longitudinal pode ser relacionada com a abertura,  $\delta$ , dada pela Equação 2.7.

$$\sigma_l = \frac{Et\delta}{2L(1-\nu^2)} \quad (2.7)$$

Em que  $E$  e  $\nu$  são os módulos de elasticidade e coeficiente de *Poisson*, respectivamente e  $t$  é a espessura do componente.

Para maiores detalhes da teoria e aplicação prática da técnica vários trabalhos estão disponíveis na literatura (LU, 1996; GALATOLO e LANCIOTTI, 1997; AWS, 2001; LANCIOTTI *et al.*, 2007).

#### 2.5.1.2 Técnica do Contorno

A técnica do contorno, que se baseia na mecânica de sólidos, determina as tensões residuais através de uma experiência que envolve o corte cuidadosamente de uma amostra em duas partes, medindo-se a deformação resultante devido à redistribuição de tensões residuais. Os dados de deformação medidos são usados para calcular as tensões residuais através de uma análise que envolve um modelo de elementos finitos. Como parte da análise, a deformação medida se impõe como um conjunto de condições de contorno de deslocamento no modelo. O modelo de elementos finito leva em conta a rigidez e a geometria como apenas um parâmetro na análise, fornecendo apenas um resultado. A resposta é um mapa bidimensional de tensões residuais normal ao plano de medição, conforme mostra a Figura 2.18 (SCHAJER, 2013).

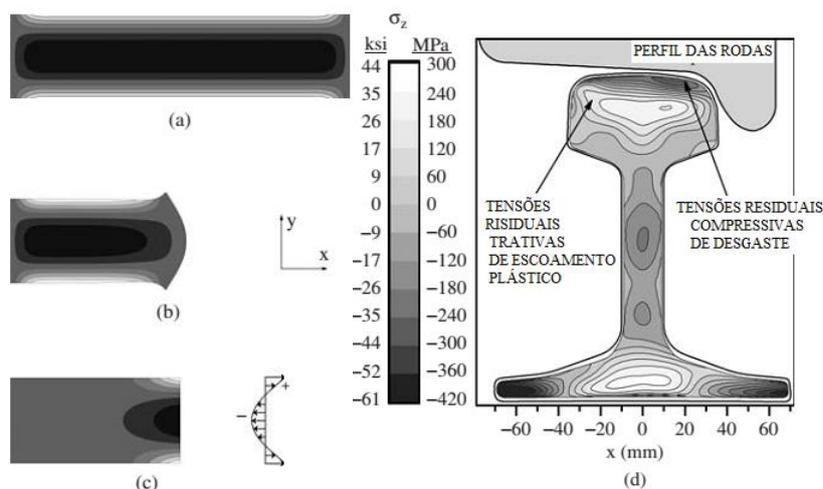


Figura 2.18 - Método do contorno (a) tensões originais, (b) livre de tensões após o corte, (c) tensões restauradora da superfície plana e (d) medidas do perfil de tensão de um trilho de trem. Fonte: Adaptado de SCHAJER, (2013).

A técnica de contorno é particularmente útil para campos complexo de tensão, onde as tensões residuais que são difíceis (ou lentas) para serem mapeadas usando técnicas de medição convencional consolidadas. As variações espaciais complexas de tensões residuais típico de soldagem são bem caracterizados utilizando-se a técnica de contorno. Esta técnica é a mais recente utilizada para medição de tensões residuais, tendo sido apresentada inicialmente em uma conferência em 2000 e, em seguida, em um jornal em 2001 (SCHAJER, 2013).

### 2.5.1.3 Técnica de Remoção de Camadas ou da Deflexão

A técnica de remoção de camadas é também uma técnica considerada destrutiva, pois seu princípio de ação consiste na remoção de material que contém tensões residuais, essa retirada de material causa desequilíbrio na peça de trabalho que poderá resultar na deformação da mesma. Se a peça de trabalho é uma peça plana, a remoção do material poderá causar a deflexão (curvatura) na placa ou na viga, conforme pode ser verificado na Figura 2.19. Além disso, se a remoção do material tensionado é realizada continuamente e a medição da curvatura (deflexão) da amostra é feita também ao mesmo tempo da remoção, as tensões residuais originalmente presentes podem ser deduzidas. Portanto, essa técnica fornece uma determinação rápida das tensões residuais em função da profundidade abaixo da superfície (KRUTH e BLEYS, 2000).

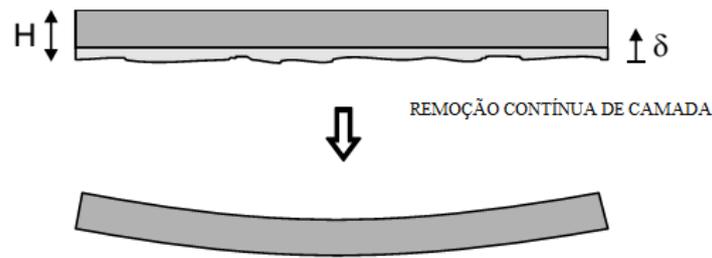


Figura 2.19 - Deflexão de uma placa devido ao relaxamento de tensão influenciado pela remoção de material. Fonte: (KRUTH e BLEYS, 2000).

Segundo Lu (1996), a variação da deflexão (curvatura) após a retirada de uma camada de material, a partir de uma espessura  $e'$ , pode ser relacionada com a tensão  $\sigma_e$ , que atuava naquela camada. A relação da espessura  $e'$  com a tensão  $\sigma_e$  pode ser dada pela Equação 2.8. A Figura 2.20 ilustra também essa técnica.

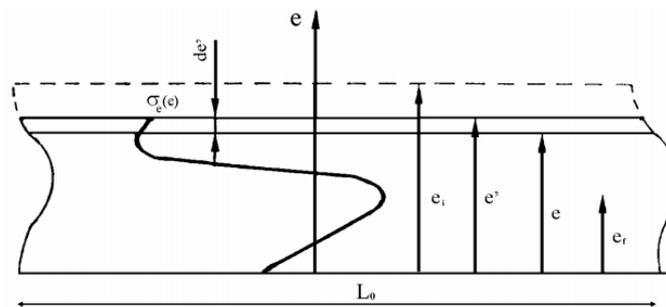


Figura 2.20 - Ilustração esquemática dos parâmetros envolvidos na técnica da remoção de camadas. Fonte: Adaptado de LU, (1996).

$$\sigma_e = \frac{E}{l-v} \left[ -\frac{4}{3} \frac{e^2}{l^2} \frac{df}{de} + 8 \frac{e}{l^2} (f_{e_i} - f_e) + \frac{8}{3l^2} \int_{e_i}^e e' df \right] \quad (2.8)$$

em que:

$E$  = módulo de elasticidade do material

$v$  = coeficiente de Poisson

$e'$  = espessura da amostra antes da remoção de uma determinada camada de espessura "de"

$e_i$  = espessura da amostra antes da remoção de qualquer camada

$e$  = espessura final

$l$  = comprimento final da amostra

$f$  = deflexão

$df$  = variação da deflexão pela retirada de uma camada de espessura "de"

$f_{ei}$ ,  $f_e$  = deflexões inicial e final, respectivamente.

#### 2.5.1.4 Técnicas do Furo Cego (*Hole-Drilling Method*) e do Núcleo do Anel (*Ring Core Method*)

A técnica do furo cego é a técnica de uso geral mais utilizada para a medição de tensões residuais em materiais. A mesma utiliza procedimentos padronizados e tem boa precisão e confiabilidade. O procedimento de teste envolve algum dano a amostra, mas esse é muitas vezes tolerável ou reparável. Por esta razão, a técnica é por vezes chamada de semi-destrutiva (SCHAJER, 2013). O princípio de funcionamento da técnica implica na introdução de um pequeno furo (de cerca de 1,8 mm de diâmetro até cerca de 2,0 mm de profundidade) no local onde a tensões residuaisé medida (ROSSINI, 2012).

Ainda segundo Schajer (2013), na remoção de material causada pela usinagem do furo há uma redistribuição das tensões residuais no material restante em torno do furo e deformações localizadas de forma a atingir o seu estado de equilíbrio. A Figura 2.21 ilustra esquematicamente as deformações e as tensões residuais de tração em torno do furo usinado.

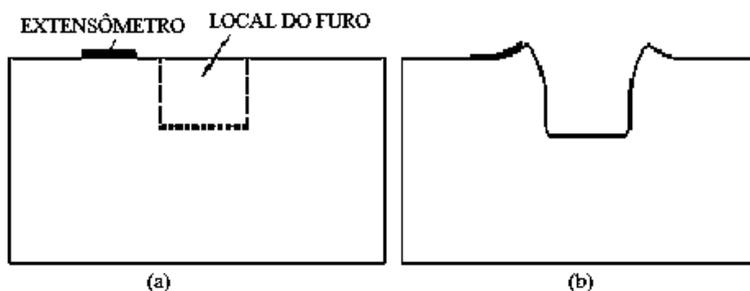


Figura 2.21 - Esquema de corte transversal em torno de um furo mostrando tensões trativas. (a) antes de furação e (b) após a usinagem do furo. Fonte: (SCHAJER, 2013).

A consequência da liberação da tensão provoca o retorno ao regime elástico do material, o qual se expande ligeiramente, podendo-se observar na borda do furo através de um pequeno aumento (deformação) da superfície local (Figura 2.21b). Sendo que para a medição da tensões residuais baseada na variação da deformação é utilizada uma roseta (Figura 2.22), a qual contem extensômetros que são colados próximos à região onde o furo é usinado e medem as variações de deformações provocadas pelas tensões aliviadas

devido à usinagem do furo. Tendo-se o valor das variações de deformações, pode-se calcular as tensões que as geraram, ou seja, as tensões residuais (SCHAJER, 1981).

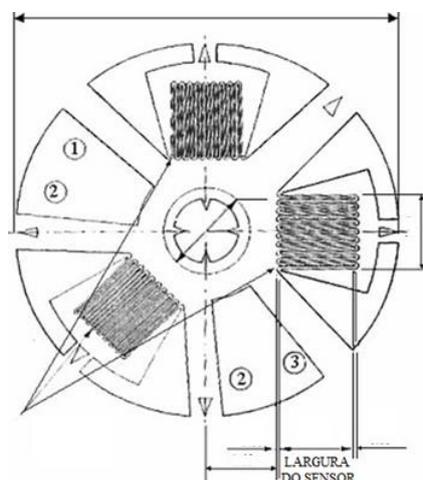


Figura 2.22 - Roseta extensométrica (dimensões em mm). Fonte: Adaptado de SCHAJER, (1981).

Em relação a técnica do núcleo do anel, Schajer (2013) afirma que essa técnica é uma variante da técnica do furo cego, ou seja, enquanto a técnica do furo cego analisa as tensões residuais a partir da deformação superficial da área ao redor de um furo (Figura 2.23a), a técnica do núcleo do anel envolve a medição da deformação de uma região central (denominada de ilha) causada pela usinagem de uma ranhura anelar em torno da roseta, conforme pode ser observado na Figura 2.23b. Ainda de acordo com Lu (1996), a exceção da técnica do furo cego em relação a do núcleo do anel, é que esta última tem uma área de atuação maior, ou seja, o diâmetro interno do anel é em torno de 15 a 150 mm e a profundidade do anel é geralmente entre 25 a 150 % desse diâmetro. Por outro lado, a técnica do furo cego é a mais utilizada devido à sua maior facilidade de utilização e por causar menos dano na amostra.

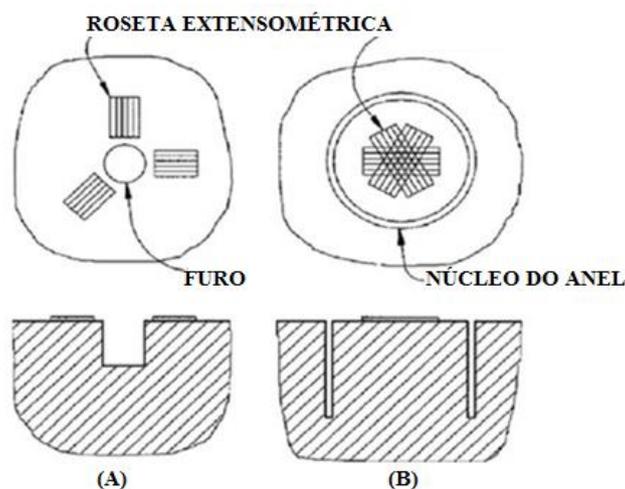


Figura 2.23 - (a) Técnica do furo cego (b) Técnica do núcleo do anel. Fonte: Adaptado de SCHAJER, (2013).

#### 2.5.1.5 Técnica do Furo Profundo (*Deep Hole Drilling Method*)

A técnica do furo profundo é uma variante das técnicas do furo cego e do núcleo do anel, com a diferença de realizar uma análise em materiais mais espessos (ROSSINI, 2012). Segundo Kandil (2001), a técnica foi originalmente desenvolvida na década de 1970 por Beany e Zhdanov e Gonchar. Ainda de acordo com Kandil (2001), o procedimento básico envolve a usinagem de um orifício de referência através da amostra e a remoção subsequente de uma coluna de material, centrado sobre o furo de referência, utilizando uma técnica *trepanning*. O diâmetro do furo de referência é medido com precisão ao longo do seu comprimento antes que a coluna de material seja retirada. Pois, quando a coluna de material for removida as tensões são relaxadas, as dimensões do diâmetro do furo da coluna de referência são alteradas. Nesse contexto, as dimensões da coluna e do furo de referência são novamente medidas e as tensões residuais são calculadas a partir das alterações dimensionais provocadas pela remoção do material a partir da maior deformação da amostra na área analisada. Na Figura 2.24 é ilustrado um esquema representativo dessa técnica de medição de tensões residuais.

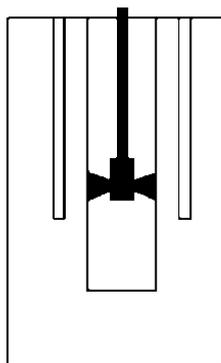


Figura 2.24 - Técnica do furo profundo. Fonte: Adaptado de SCHAGER, (2013).

## 2.5.2 Técnicas Não Destrutivas

### 2.5.2.1 Técnicas Magnéticas

Estas técnicas se baseiam na relação entre a magnetização e a deformação elástica existente nos materiais ferromagnéticos, pois experimentos demonstram que um pedaço de arame de aço, uma vez magnetizado, sofrerá alongação na direção de magnetização, ao passo que uma vez tracionado se magnetizará na direção da tração. Duas técnicas têm sido bastante exploradas na literatura, além de serem aplicáveis na indústria: a técnica do ruído de *Barkhausen* e a técnica da magneto-estricção. A primeira se baseia na mudança na microestrutura magnética causada pela presença de tensões, enquanto a segunda se baseia em medições da permeabilidade e da indução magnética do material (LU, 1996).

Nesta tese, apresenta-se somente a técnica magnética ruído de *Barkhausen*. Lu (1996) afirma que os materiais ferromagnéticos apresentam regiões microscópicas magneticamente ordenadas, chamadas de domínios, onde cada domínio é magnetizado baseado nas direções cristalográficas preferenciais à magnetização. Além disso, um domínio não coincide com um grão, já que, dentro de um grão há vários domínios, os quais são separados por paredes, nas quais a direção de magnetização, geralmente, muda de  $90^\circ$  ou  $180^\circ$ , conforme mostra a Figura 2.25.

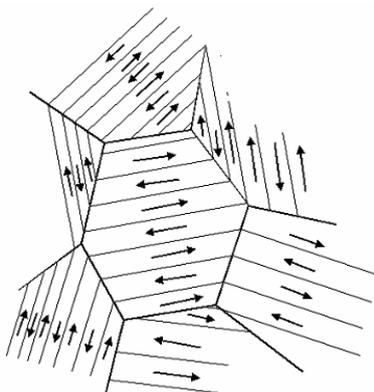


Figura 2.25 - Estrutura de domínios em um material policristalino. Fonte: LU, (1996).

Lu (1996) afirma também que, quando um campo magnético ou tensão mecânica é aplicado a um material ferromagnético, mudanças ocorrem na estrutura dos domínios causadas pelo movimento brusco das paredes. Estas mudanças causam variações na magnetização média do componente, assim como, em suas dimensões. Dessa forma, se uma bobina condutora for colocada próxima à amostra enquanto a parede de um domínio se movimenta, a mudança resultante na magnetização induzirá pulsos elétricos na bobina. Quando esses pulsos elétricos são produzidos pela movimentação de todos os domínios é gerado um sinal, chamado de “ruído *Barkhausen*”. A extensão da movimentação das paredes dos domínios, isto é, a intensidade do ruído *Barkhausen*, depende das tensões presentes e da microestrutura do material. A profundidade de medição para aplicações práticas dessa técnica em aço varia entre 0,01 e 1 mm.

Na Figura 2.26 é ilustrado um esquema de uma análise de tensão utilizando a técnica magnética. Nessa figura, observa-se que os eixos principais do campo magnético e das tensões não são paralelos, indicando a presença de tensões (WEITHERS; BHADESHIA, 2001).

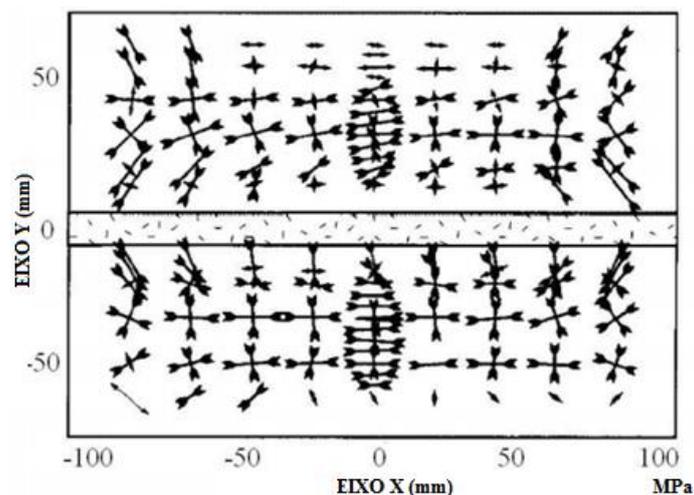


Figura 2.26 - Mapa de tensões residuais em uma chapa soldada utilizando método magnético.  
Fonte: Adaptado de WEITHERS; BHADESHIA, (2001a).

### 2.5.2.2 Técnica de Difração de Nêutrons

Da mesma forma que a técnica de raio X, como será visto a seguir no item 2.5.2.3, a difração de nêutrons mede o espaçamento cristalográfico entre os planos cristalinos. Este espaçamento é afetado por tensões residuais ou aplicadas (RUUD, 1982: 2002). Essa técnica é capaz de medir as deformações elásticas induzidas por tensões residuais em todo o volume dos componentes de aço relativamente espesso com uma resolução espacial tão pequena quanto  $1 \text{ mm}^3$  (WEITHERS e BHADESHIA, 2001a). Kandil *et al.*, (2001) afirmam que a maior vantagem da difração de neutrôn sobre a difração de raio X é a grande profundidade de penetração que os nêutrons podem obter, o que a torna capaz de medir uma profundidade maior, chegando a medir 25 mm no alumínio e 25 cm no aço. Segundo Claphama *et al.*, (2004), devido à alta resolução espacial, a difração de nêutrons pode fornecer mapas tridimensionais completos de deformação em componente de engenharia, ou seja, para cada ponto de medição, a deformação pode ser medida em três direções ortogonais, ao longo do eixo da amostra (deformação axial,  $\epsilon_A$ ), perpendicular ao eixo X (deformação transversal,  $\epsilon_t$ ) e, através da espessura (deformação normal,  $\epsilon_n$ ), isso graças aos movimentos de translação e rotação desses componentes, conforme mostrado na Figura 2.27.

Aplicações práticas da técnica e o embasamento teórico podem ser vistos em Lu, (1996); Webster, (2001); Dann *et al.*, (2003); Hutchings *et al.*, (2005), Withers, (2007).

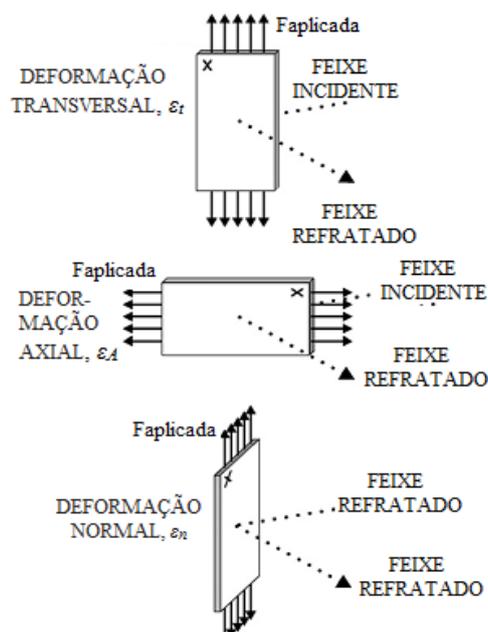


Figura 2.27 - As três orientações diferentes usados para determinar a tensão transversal ( $\epsilon_T$ ), tensão axial ( $\epsilon_A$ ), e tensão normal ( $\epsilon_N$ ). Mostra também a direção da carga ( $F_{aplicada}$ ) e também a direção do feixe de neutrons incidente e difratado. Fonte: Adaptado de CLAPHAMA *et al.*, (2004).

### 2.5.2.3 Técnica de Difração de Raio X (DRX)

A técnica de DRX foi proposta pela primeira vez por Lester e Aborn em 1925. Em 1930, Sachs e Weerts mostraram que a precisão obtida foi semelhante a outras técnicas a época. Contudo, a técnica foi melhorada em 1934 por Barret e Gensamer, onde os autores a utilizaram para medir a soma dos três tipos de tensões residuais (macroscópica, microscópica e sub-microscópica). Em 1935, Glocker mostrou que era possível avaliar cada um dos tipos de tensões residuais. Desde então, devido às melhorias tecnológicas e melhor compreensão da deformação da rede cristalina, em particular a influência da anisotropia e textura cristalográfica, um progresso notável foi realizado na técnica (LU, 1996).

Entretanto, a técnica é restrita, sendo sua principal restrição a profundidade de análise das amostras, pois o feixe de raio X consegue penetrar somente a distância de alguns planos atômicos, cerca de 1 a 50  $\mu\text{m}$  (LU, 1996). Para a SAE (2003), a penetração é em torno de 25  $\mu\text{m}$  e para Song *et al.*, (2016) varia de 5-20  $\mu\text{m}$ , ou seja, a DRX faz uma avaliação subsuperficial das tensões. Para superar essa restrição, Ruud (1982) afirma que para medições em uma maior profundidade, ou seja, maior do que 0,013 mm, técnicas destrutivas como a técnica de remoção de camadas deve ser utilizada.

Na avaliação por DRX, as tensões residuais são determinadas a partir da medição da deformação no cristal do agregado policristalino, comparado aos parâmetros de rede do cristal deste mesmo material sem sofrer deformação. Quando um feixe de raio X é dirigido para superfície de um corpo, uma parte desses raios é absorvida pelos átomos enquanto outra parte é difratada em todas as direções da área irradiada. Essa técnica mede basicamente a intensidade máxima de raios difratados para um determinado ângulo de varredura. A partir desse ângulo é possível obter o espaçamento interplanar dos planos de difração (SOUSA, 2012). A Figura 2.28 mostra a incidência de vários raios X sobre a amostra e a intensidade de cada raio difratado para um determinado ângulo  $2\theta$ .

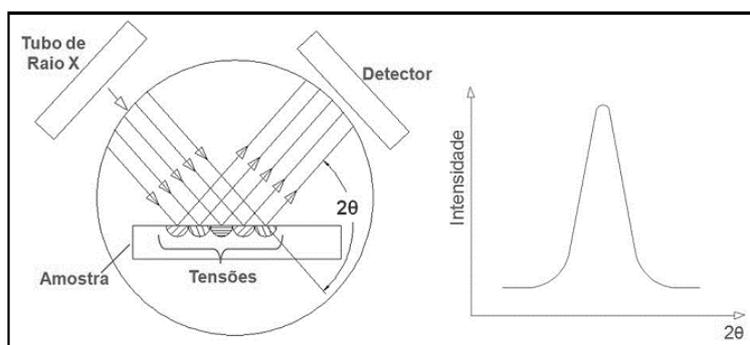


Figura 2.28 - Incidência dos raios X sobre a amostra e Intensidade do raio difratado para um determinado ângulo  $2\theta$ . Fonte: (SOUSA, 2012).

O princípio básico de utilização da DRX na medição de tensões residuais, conforme mostra a Figura 2.29, consiste na difração de um feixe monocromático de raio X, com um ângulo elevado de difração ( $2\theta$ ) a partir da superfície de uma amostra tensionada para duas orientações da amostra em relação ao feixe de raio X. O ângulo  $\psi$ , que define a orientação da superfície da amostra, é o ângulo entre a incidência normal a superfície e a bissetriz do feixe incidente e difratado, que também é o ângulo entre a normal para os planos de rede de difração e a superfície da amostra (PREVÉY, 1986).

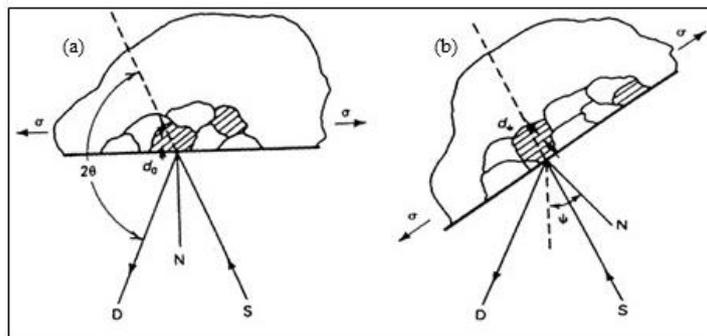


Figura 2.29 - Princípios da medição de tensões por difração de raio X. (a):  $\psi = 0$ . (b)  $\psi = \psi$  (amostra rotacionada através de algum ângulo  $\psi$  conhecido). D, detector de raio X; S, fonte de raio X; N, normal à superfície. Fonte:(PREVÉY, 1986).

A difração ocorre para o ângulo  $2\theta$  definido pela Lei de *Bragg* mostrada na Equação 2.9. Para o feixe de raio X monocromático (mesmo comprimento de onda) produzido por um tubo de raio X incidindo sobre um alvo metálico, o seu comprimento de onda é conhecido como uma parte em  $10^5$ , ou seja,  $1/100000$ . Portanto, qualquer mudança no espaçamento de rede cristalina,  $d$ , resulta em uma mudança correspondente no ângulo de difração  $2\theta$  (PREVÉY, 1986).

$$2d \cdot \text{sen}\theta = n \lambda \quad (2.9)$$

Nesta equação,  $\lambda$  é comprimento de onda do feixe de raio X incidente (Å ou nm);  $d$  é o espaçamento interplanar entre uma família de planos cristalográficos (Å ou nm);  $\theta$  é o ângulo entre feixe incidente e o plano difrator (grau) ou ângulo de difração e  $n$  é um inteiro conhecido por ordem de difração. Para uma melhor análise e visualização do fenômeno de difração de raio X e dos parâmetros envolvidos na Lei de *Bragg*, a Figura 2.30 apresenta essa proposição.

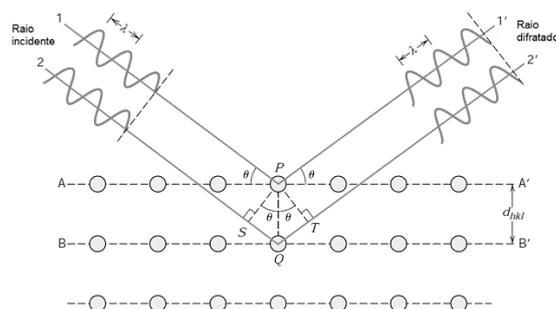


Figura 2.30 - Difração de raio X pelos átomos (A-A' e B-B'). Fonte: Adaptado de CALLISTER JR; RETHWISCH, (2016).

Quando é feita a varredura da superfície de um material utilizando a técnica de DRX, é obtido um espectro que mostra os picos de difração os quais são característicos para cada material, conforme mostra a Figura 2.31.

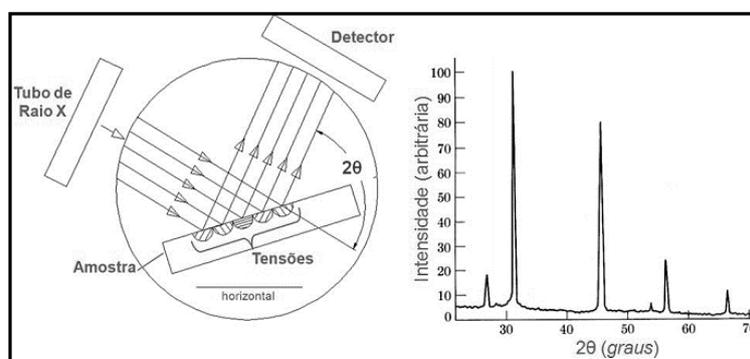


Figura 2.31 - Varredura da superfície da amostra. Fonte: (SOUSA, 2012).

Entretanto, se for realizada uma comparação entre os picos de um mesmo material, sendo um sem deformação e o outro com deformação plástica, este último poderá aparecer de diversas formas. Podendo ser formados em ângulos maiores, menores ou simplesmente mais largos. Para ângulos maiores, a distância interplanar é menor quando comparado com o padrão (material sem deformação plástica), logo as tensões residuais serão de compressão. No entanto, se os ângulos forem menores, a distância interplanar será maior, logo as tensões residuais serão de tração. Essas duas afirmativas podem ser comprovadas deduzindo-se a Lei de Bragg. A Figura 2.32 apresenta de forma esquemática o mesmo material sem deformação e deformado plasticamente para vários picos de difração.

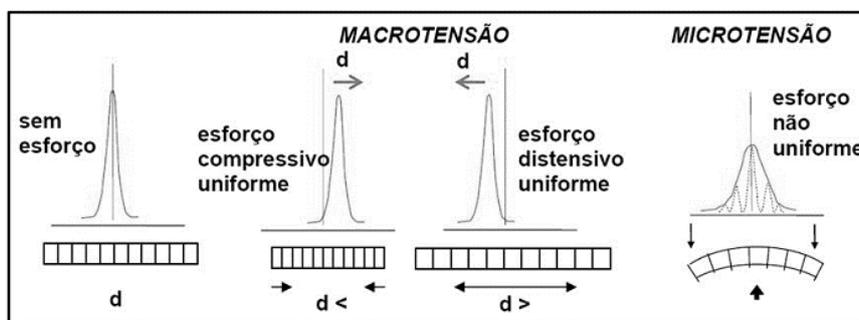


Figura 2.32 - Deslocamento dos picos de difração quando comparados com o padrão. Fonte: (SOUSA, 2012).

Desta figura se conclui que, com o ângulo de difração, pode-se estimar o valor da deformação do cristal e, em consequência, o valor das tensões residuais existente naquela região da amostra, ou seja, se a região está sobre tração ou compressão.

Para a medição de tensões residuais através de DRX, existem três técnicas básicas (PRIVÉY, 1986; TOTTEN *et al.*, 2002). Técnicas, de dupla exposição, simples exposição e de múltiplas exposições ou  $sen^2\psi$ . A quantidade de exposição se refere à quantidade de ângulos de exposição, tais como, ângulos entre a normal à superfície da peça e o plano formado pelo feixe de raio X incidente e o difratado. A técnica  $sen^2\psi$ , é uma das mais clássicas (MACHERAUCH & MULLER, 1961). Esta técnica e sua história de desenvolvimento são descritos em Cullity, 1956; Noyan e Cohen, 1987; Hauk, 1997.

Baseado na lei de Bragg, em que uma radiação de comprimento de onda  $\lambda$  é difratada em ângulos  $\theta$  quando o espaçamento interplanar é  $d$  e assumindo um estado plano de tensões, onde somente as tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são diferentes de zero e  $\sigma_3 = 0$  haverá uma deformação nesta direção de tensão principal, devido à razão de Poisson e também devido a ação de  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ . Para a mudança no espaçamento interplanar de planos para os índices de Miller ( $hkl$ ), a mudança ou deformação do espaçamento interplanar da rede cristalina é dada pela Equação 2.10 (CULLITY, 1956).

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \left[ \left( \frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} \sin^2\psi \right] - \left[ \left( \frac{\nu}{E} \right)_{hkl} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (2.10)$$

Em que  $\left( \frac{1+\nu}{E} \right)$  e  $\left( \frac{\nu}{E} \right)$  são valores de constantes elásticas para a direção cristalográfica normal ao plano de rede em que a deformação é medida como especificado pelos índices de Miller ( $hkl$ ),  $d_0$  é o espaçamento interplanar na ausência de tensão,  $\phi$  denota o ângulo entre um dos eixos das tensões principais e a projeção da direção da tensão medida na superfície da amostra;  $\psi$  representa o ângulo entre a direção da tensão medida e um vetor normal à superfície da amostra;  $\sigma_{\phi}$  é a tensão correspondente no plano para  $\psi = 90^\circ$  (WITHERS, 2007). Um esquema da configuração desses ângulos pode ser visto na Figura 2.33 (RAJ *et al.*, 2009).

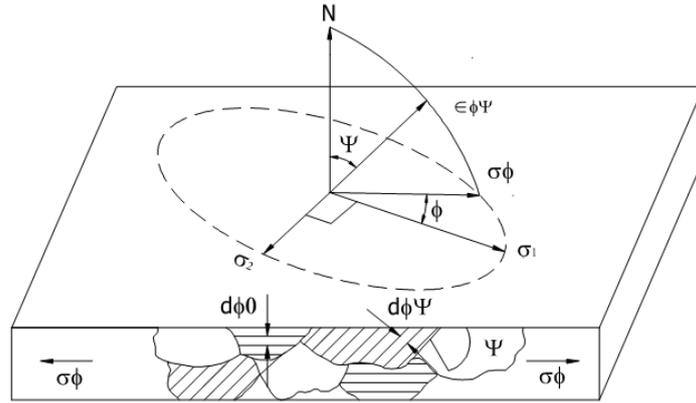


Figura 2.33 - Definição da direção da inclinação de  $\psi$  e da direção da medição de tensões,  $\phi$ , usando o modelo plano de tensões elásticas. Fonte: RAJ *et al.*, (2009).

Reorganizando a Equação 2.10, o espaçamento de rede pode ser dado pela Equação 2.11.

$$d_{\phi\psi} = \left[ \left( \frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \right] \sin^2\psi - \left[ \left( \frac{\nu}{E} \right)_{hkl} d_0 (\sigma_1 + \sigma_2) + d_0 \right] \quad (2.11)$$

A equação 2.11 descreve a relação fundamental entre o espaçamento de rede e as tensões biaxiais na superfície da amostra. O espaçamento da rede é uma função linear do  $\sin^2\psi$ . Seguindo-se que se  $d_{\phi\psi}$  versus  $\sin^2\psi$  é plotado, o resultado é uma linha reta inclinada, cujo declive é igual a  $\sigma_{\phi}$ , portanto, dando a tensão no plano para o ponto, conforme mostra a Equação 2.12.

$$\sigma_{\phi} = \left( \frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_0} \left( \frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \right) \quad (2.12)$$

Em que  $\left( \frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \right)$  é o declive da reta. Este declive negativo ou positivo corresponde a tensões compressivas e trativas, respectivamente. Um exemplo do gráfico  $\sin^2\psi$  versus  $d_{\phi\psi}$  é mostrado na Figura 2.34.

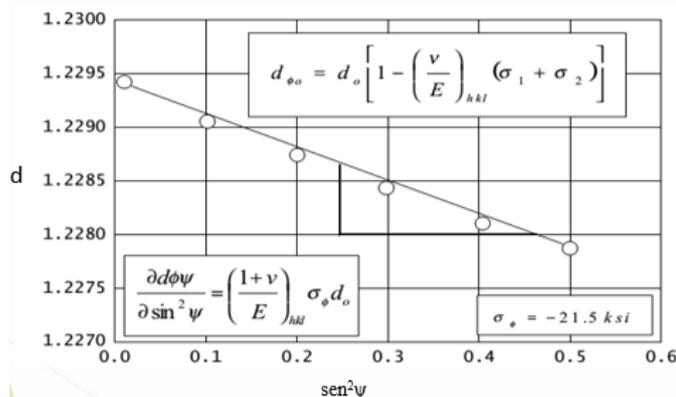


Figura 2.34 - Gráfico de  $d(311)$  versus  $\sin^2\psi$  para shot peening em liga de alumínio 5056, com tensões superficiais de -148 MPa. Fonte: (PREVÉY, 1986).

O método acima descrito é conhecido como a metodologia  $\sin^2\psi$  e é utilizado desde 1925, quando introduzido por Lester e Aborn. Essa metodologia apresenta uma grande vantagem de não requerer necessariamente o valor de  $d_o$ , que na prática é difícil de ser medido devido a muitos fatores que afetam seu valor, como por exemplo, variação da composição química do local de medição. O valor de  $d_o$  pode ser substituído por  $d\psi = 0$ , e ainda produzir resultados de tensão elástica com erro menor que 1% (WITHERS, 2007). Este método é capaz de medir as tensões com uma precisão de  $\pm 20$  MPa, com uma profundidade de penetração na ordem de microns sob a superfície da amostra (WITHERS e BHADSHIA, 2001; WITHERS, 2007).

#### 2.5.2.4 Técnicas Ultrassônicas

As técnicas utilizando ondas acústicas ultrassônicas (descritas com mais detalhes no capítulo 3 por também ser escopo do trabalho) apresentam potencial para determinar as propriedades do material tais como, orientação de laminação, tensões (residual e aplicada). Fundamentalmente, essas técnicas consistem na emissão da onda acústica no material, sendo medida a variação da velocidade da onda refletida ou transmitida na medida em que esse material se encontra tensionado, por exemplo. Os tipos dessas ondas incluem, principalmente, as superficiais longitudinais como, ondas Longitudinais Criticamente Refratadas ( $L_{cr}$ ) e de *Rayleigh* e ondas transversais ou cisalhantes (SCHAJER, 2013).

De forma a situar o leitor em relação às diferentes técnicas de medição de tensões residuais, mostra-se de forma resumida na Tabela 2.1 algumas dessas técnicas e suas principais características de análises.

Tabela 2.1 - Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais.

Técnica	Furo-cego	Deflexão	Seccionamento	Raio X	Difração de Nêutrons	Ultra-som	Magnética
Tipo de tensão residual analisado	Tipo I	Tipo I	Tipo I	Tipo I e Tipo II ou Tipo III	Tipo I e Tipo II	Tipo I + Tipo II + Tipo III	Tipo I + Tipo II + Tipo III
Informação obtida na medição	Deformação superficial ou deslocamento	Deformação ou deflexão	Deformação superficial ou deslocamento	Variação das distâncias interplanares	Variação das distâncias interplanares	Variação na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas	Amplitude do ruído de Barkhausen ou Permeabilidade magnética
Porção mínima de material analisado	0,5 mm <sup>2</sup>	1000 mm <sup>2</sup> se for medida a deflexão e 100mm <sup>2</sup> se for a deformação	100 mm <sup>2</sup>	0,5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	De 0,1 mm <sup>2</sup> para a técnica das frequências altas e 30 mm <sup>2</sup> para a técnica convencional	1 mm <sup>2</sup> para o método do ruído de Barkhausen e 100 mm <sup>2</sup> para o método de permeabilidade magnética
Profundidade mínima	20 μm	20 μm	1 a 2 μm	Até dezenas de microns	1 mm	15 μm até 300 μm	100 μm
Custo do equipamento (US\$)	10000 a 50.000	1000	15000	10000 a 200000	Algumas centenas de milhões	40000 a 200000	40000 a 200000
Portabilidade	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Tempo médio para obter a primeira medição e estabelecer um perfil de tensões, respectivamente	40 min. e 2 horas	30 min. e 8 horas	40 min. e entre 5 e 20 horas	20 min. e 8 horas	2 horas e uma semana	Alguns minutos e 20 minutos	Instantaneamente e 10 min.
Incerteza em situações normais	± 20MPa	± 30MPa	± 10MPa	± 20MPa	± 30MPa	10 a 20 Mpa	10 a 20 MPa
Profundidade de inspeção	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	Todas acima de 1 mm	1 a 50 μm	2 a 50 mm	0,015 a 3 mm	0,1 a 1 mm

Fonte: Adaptado de LU, (1996).

## CAPÍTULO 3

### TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo aborda os princípios físicos e uso geral de ondas acústicas utilizadas na determinação de tensões residuais. Apresenta também as teorias fundamentais sobre o efeito acustoelástico e relação entre velocidade da onda e tensões residuais. Por último, são apresentados alguns trabalhos de medição de tensões por ultrassom em soldagem.

#### 3.2 ONDAS ACÚSTICAS

As ondas acústicas são ondas mecânicas originadas pela deformação de uma região de um meio elástico e que, para se propagarem, precisam de um meio material (SANTOS, 2010). Fraga (2007) afirma que essas ondas podem ser classificadas de acordo com suas frequências de propagação. As ondas que se propagam a uma frequência abaixo de 20 Hz são classificadas como infrassom. Para frequências no intervalo de 20 Hz e 20 kHz, as ondas são classificadas como som. Para esta faixa de frequências, as ondas sonoras são audíveis pelo ouvido humano. Por último, têm-se as ondas que se propagam com frequência superior a 20 kHz, chamadas de ultrassom. A Figura 3.1, apresenta um esquema ilustrativo dessas faixas de frequências. A seguir, baseado em Andreucci (2014), são apresentados os principais tipos de ondas utilizadas na análise ultrassônica.

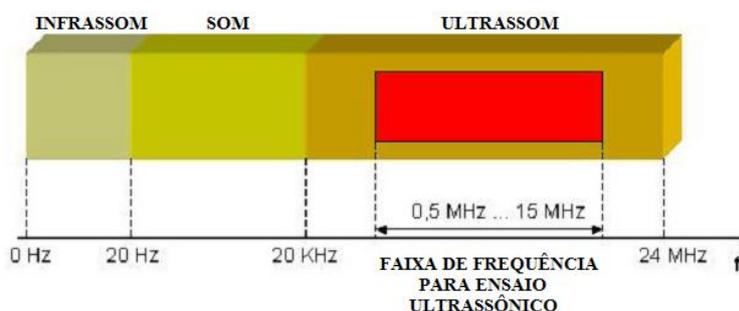


Figura 3.1 - Classificação das frequências sonoras. Fonte: (FRAGA, 2007).

### 3.2.1 Ondas Longitudinais ou de Compressão

A onda ultrassônica longitudinal, também chamada de onda de compressão, é aquela em que a movimentação das partículas do meio material é paralela à direção de propagação da onda ultrassônica. Elas percorrem os metais como uma série alternada de zonas de compressão e rarefação, nas quais as partículas transmitem a energia vibratória, movendo-se conforme o sentido de propagação da onda. A velocidade das ondas longitudinais no aço é de, aproximadamente, 5900 m/s (ASTM, 2015). A Figura 3.2 mostra uma representação esquemática desse tipo de onda.

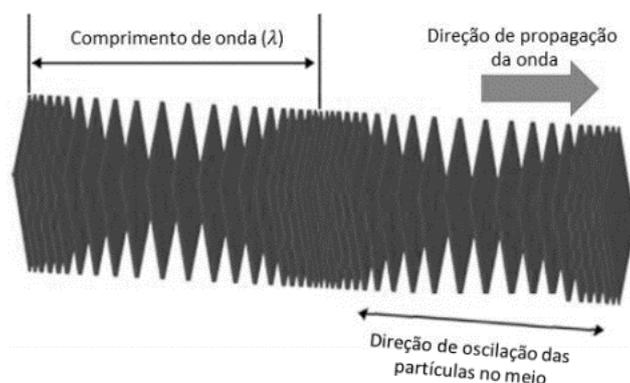


Figura 3.2 - Onda longitudinal ou de compressão. Fonte: (SANTOS, 2013).

### 3.2.2 Ondas Transversais ou de Cisalhamento

As ondas transversais, também conhecidas como cisalhante ou de corte, são também muito utilizadas na inspeção de materiais metálicos. Na onda transversal, ao contrário da onda longitudinal, as partículas do meio, na qual a onda se propaga, movem-se perpendicularmente à direção de propagação da onda, conforme mostra a Figura 3.3. A velocidade dessa onda no aço é de, aproximadamente, metade da onda longitudinal, ou seja, 3230 m/s (ASTM, 2015) ou 3240 m/s (HELLIER, 2003).

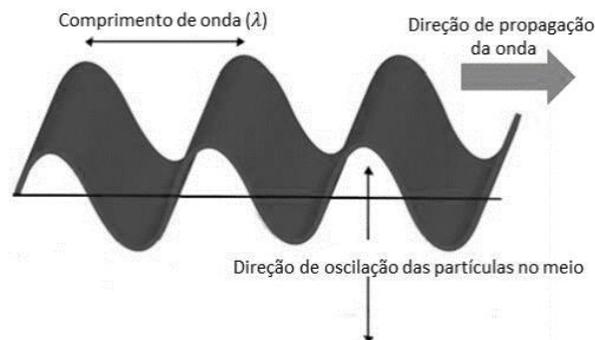


Figura 3.3 - Onda transversal ou de cisalhamento. Fonte: (SANTOS, 2013).

### 3.2.3 Ondas Superficiais

#### 3.2.3.1 Ondas de *Rayleigh*

As ondas superficiais de *Rayleigh* se propagam pela superfície de um material sólido com espessura definida, em que essa espessura deve ser maior que o comprimento da onda. O movimento das partículas de uma onda de *Rayleigh* segue uma trajetória elíptica, ou seja, tanto transversal quanto longitudinal, como é mostrado na Figura 3.4. As ondas superficiais são muito úteis nos ensaios por ultrassom, pois são muito sensíveis a defeitos superficiais (FRAGA, 2007).

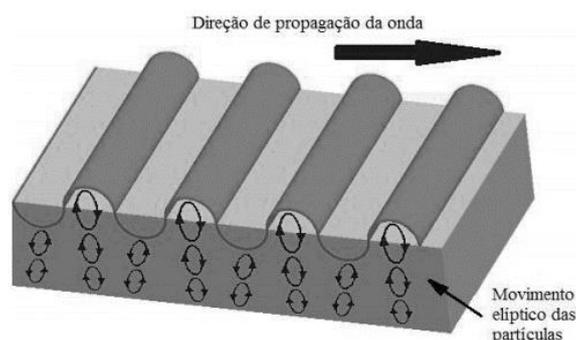


Figura 3.4 - Representação esquemática da onda de *Rayleigh*. Fonte: Adaptado de Rose, (1999).

#### 3.2.3.2 - Ondas de *Lamb*

As ondas superficiais de *Lamb* são perturbações que apresentam vibrações complexas e que se propagam ao longo de um material com espessura definida (comparável ao comprimento de onda). A propagação dessas ondas depende de algumas

características do material como densidade, propriedades elásticas, estrutura do material e espessura da chapa. Vários modos de vibração podem ocorrer nas ondas de *Lamb*, mas os dois mais comuns são o simétrico e o assimétrico mostrados nas Figuras 3.5(a) e (b), respectivamente. O movimento das partículas nas ondas de *Lamb* é semelhante ao movimento elíptico das ondas de *Rayleigh* (FRAGA, 2007; BUENOS, 2010).

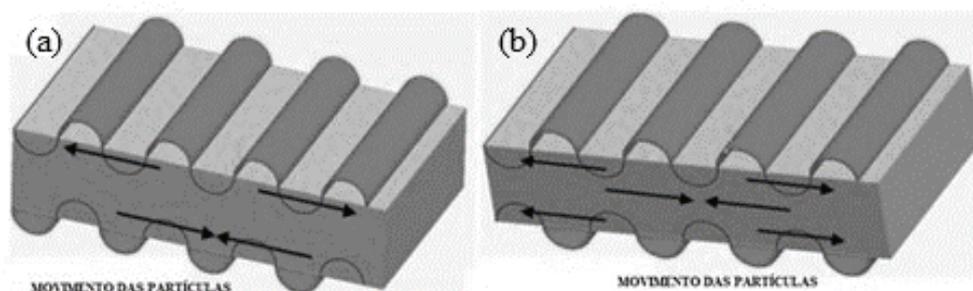


Figura 3.5 - Ondas de Lamb. (a) simétrica e (b) assimétrica. Fonte: (LEITE, 1984; BUENOS, 2010).

### 3.2.3.3 Onda Longitudinal Criticamente Refratada (Lcr)

Outro tipo de onda superficial que é utilizada para determinação de tensões, é a onda Longitudinal Criticamente Refratada (Lcr). Segundo Santos *et al.*, (2011a), tal onda se propaga paralela à superfície do material que se deseja analisar, conforme apresentado na Figura 3.6. O método de geração desse tipo de onda consiste em incidir uma onda longitudinal próximo ao primeiro ângulo crítico, baseada na Lei de Snell. A incidência dessa onda em tal ângulo exige o uso de sapatas de acrílico ou similar.

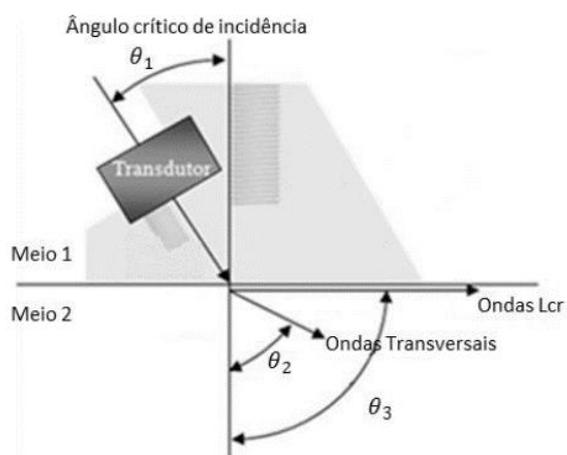


Figura 3.6 - Geração de onda Lcr. Fonte: (SANTOS *et al.*, 2011a).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE ONDAS ACÚSTICAS

#### 3.3.1 Velocidade, Comprimento e Frequência

Considerando uma onda acústica se propagando num determinado material com velocidade do som  $v$  (m/s), frequência  $f$  (ciclos/s=Hz=1/s) e comprimento de onda  $\lambda$  (m), pode-se relacionar estes três parâmetros de acordo com a Equação 3.1. A relação dada por essa equação permite calcular o comprimento de onda, pois a velocidade de propagação das ondas acústicas depende do tipo de material e do modo de vibração das partículas, porém independe da frequência. Enquanto esta última depende somente da fonte emissora.

$$v = \lambda \cdot f \quad (3.1)$$

Como se verifica, a velocidade é um parâmetro fundamental da onda acústica e como na determinação de tensões por ultrassom a variação da velocidade dessa onda é analisada, então, mostra-se na Equação 3.2 a relação entre velocidade da onda e a tensão.

$$v = v_0 + k\sigma \quad (3.2)$$

Nesta equação,  $v$  é a velocidade da onda (em m/s) num meio tensionado, enquanto  $v_0$  é a velocidade da onda num meio sem tensão,  $\sigma$  é a tensão em MPa e  $k$  é um parâmetro do material conhecido como constante acustoelástica (MPa)<sup>-1</sup> (LU, 1996). No trabalho de Bittencourt (2000) são mostrados os embasamentos teóricos para determinar a velocidade de propagação das ondas longitudinais, transversais e de *Rayleigh*, principais ondas utilizadas na análise de tensões. De forma resumida, são mostradas neste trabalho somente as equações matemáticas utilizadas para calcular a velocidade desses três tipos de ondas. Nesse contexto, a velocidade da onda ultrassônica longitudinal ( $c_L$ ) em um sólido é dada pela Equação 3.3. Sendo  $C_L$  a velocidade da onda longitudinal (m/s),  $E$  é o módulo de *Young* (kg/mm<sup>2</sup>),  $\nu$  é o coeficiente de *Poisson* (adimensional) e  $\rho$  a densidade do material (kg/m<sup>3</sup>).

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.3)$$

As velocidades para ondas cisalhantes ( $C_c$ ) e superficiais de *Rayleigh* ( $C_s$ ) são dadas pelas Equações 3.4 e 3.5, respectivamente. Em que  $G$  é o módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento ( $\text{kg/mm}^2$ ).

$$C_c = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.4)$$

$$C_s = \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3.5)$$

Em função dos valores dos coeficientes de *Poisson* dos materiais, pode-se admitir que a relação entre as velocidades da onda cisalhante ( $C_c$ ) e longitudinal ( $C_L$ ) é dada pela Equação 3.6 e da onda superficial de *Rayleigh* ( $C_s$ ) com a onda cisalhante é dada pela Equação 3.7.

$$C_c \cong 0,50C_L \quad (3.6)$$

$$C_s \cong 0,92C_c \quad (3.7)$$

Como se pode verificar, baseado nas equações acima, as propriedades dos materiais que influenciam a velocidade de propagação das ondas são sua massa específica, seu módulo de elasticidade e seu módulo de cisalhamento.

### 3.4 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

Um dos conceitos importante no estudo de ondas acústicas é a impedância acústica, a qual está relacionada com a resistência do meio à passagem da energia sonora. Sendo que o meio é responsável por dois fenômenos acústicos: a reflexão (tendência da

onda voltar para o meio de origem quando incide sobre a superfície de separação entre dois meios com propriedades distintas) e refração (que ocorre quando a onda passa de um meio para outro, em condições diferentes de velocidade e comprimento de onda, porém frequência constante). Se os meios apresentarem uma grande diferença de impedância acústica, maior será a intensidade de reflexão do feixe sonoro e menor a de refração, ou seja, menos energia sonora será transmitida ao meio absorvente, conseqüentemente, maior será a atenuação do sinal (SANTOS, 2013).

Ainda de acordo com Santos (2013), para uma onda ser transmitida ao segundo meio com o mínimo de atenuação, ou seja, refração máxima, os dois meios deverão possuir propriedades e características idênticas, ou seja, impedâncias iguais ( $Z_1 = Z_2$ ). Nesse caso, ter-se-ia uma máxima amplitude de onda transmitida e a amplitude de onda refletida igual a zero. Contudo, os materiais possuem impedâncias diferentes em sua maioria, o que dificulta a transmissão da onda e para melhorar essa transmissibilidade, deve-se usar substâncias, denominadas acoplantes.

A impedância acústica de um material é dada pela Equação 3.8

$$Z = \rho \cdot V \quad (3.8)$$

em que  $Z$  é a impedância acústica ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ );  $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg/m}^3$ );  $V$  é a velocidade da onda ( $\text{m/s}$ ).

Para uma incidência normal na interface dos dois materiais, a quantidade de energia refletida e energia transmitida é dada pelas Equações 3.9 e 3.10, respectivamente.

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.9)$$

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.10)$$

em que  $R$  é o coeficiente de reflexão;  $T$  é o coeficiente de transmissão;  $P_r$  é a pressão sônica do feixe refletido;  $P_i$  é a pressão sônica do feixe incidente;  $P_t$  é a pressão sônica do feixe transmitido;  $Z_1$  é a impedância acústica do meio 1 e  $Z_2$  é a impedância acústica do meio 2.

### 3.5 GERAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS

Segundo Magina (2009), existem 2 (dois) sistemas para geração de onda ultrassônica: os transdutores eletromagnéticos (EMAT - Transdutor Acústico Eletromagnético) e os piezelétricos (PZT). Os mais utilizados são os que contêm cristais piezelétricos. Estes cristais conseguem converter a energia elétrica em oscilação mecânica dentro do material.

Em relação aos transdutores piezelétricos, existem 4 (quatro) tipos: normal ou reto, angular, duplo cristal e *phased-array*. De acordo com Andreucci (2014), o transdutor normal ou reto é constituído de cabeçote monocristal (cristal piezelétrico) geradores de ondas longitudinais normal a superfície de acoplamento. O transdutor emite um impulso ultrassônico que atravessa o material a inspecionar e reflete nas interfaces, originando o que se chama ecos. Estes ecos retornam ao transdutor e geram, no mesmo, o sinal elétrico correspondente.

Em relação aos transdutores oblíquos, os mesmos diferem dos transdutores retos pelo fato do cristal formar um determinado ângulo com a superfície do material. O ângulo é obtido, inserindo-se uma cunha de plástico entre o cristal piezelétrico e a superfície. O ângulo nominal, geralmente, 35, 45, 60, 70 e 80 graus, sob o qual o feixe ultrassônico penetra no material. Esses ângulos valem somente para inspeção de peças em aço; se o material for outro, deve-se calcular o ângulo real de penetração utilizando a Lei de Snell.

Quanto aos transdutores de duplo-cristal, os mesmos são utilizados quando se trata de inspecionar ou medir materiais de reduzida espessura, ou quando se deseja detectar discontinuidades logo abaixo da superfície do material. O transdutor de duplo-cristal, apresenta dois cristais incorporados na mesma carcaça, separados por um material acústico isolante e levemente inclinados em relação à superfície de contato. Cada um dos cristais funciona somente como emissor ou somente como receptor. A Figura 3.7 apresenta de forma esquemática os transdutores, normal, reto e duplo cristal.

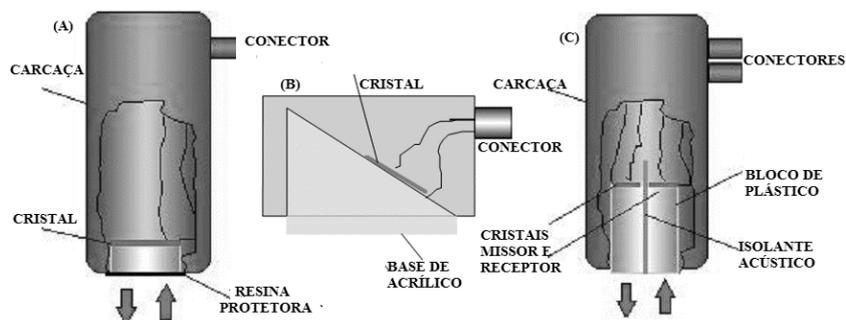


Figura 3.7 - (a) Transdutor normal ou reto. (b) Transdutor angular e (c) Transdutor de duplo cristal.

Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

Em relação ao transdutor *Phased-Array*, este é composto por dezenas de pequenos cristais (de 10 a 256 elementos) cada um ligado a circuitos independentes capazes de controlar o tempo de excitação independentemente um dos outros cristais. O resultado é a modificação do comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais ou pelo transdutor. Na Figura 3.8a, o conjunto de cristais está operando em fase, isto é, o aparelho de ultrassom executa a excitação dos cristais todos ao mesmo tempo, e o resultado é uma onda perpendicular ao plano da superfície. Já na Figura 3.8b, mostra que o aparelho de ultrassom executa a excitação dos cristais de forma defasada, isto é, o tempo em que cada cristal é excitado é retardado no tempo, e o resultado é uma frente de onda angular à superfície. Com os transdutores *phased-array* é possível em uma única varredura inspecionar o material com vários ângulos de refração diferentes de uma só vez, já que a mudança do ângulo é feita eletronicamente. Isso significa uma maior velocidade de inspeção, principalmente em soldas, onde são recomendados dois ângulos diferentes de análises, no mínimo (ANDREUCCI, 2014).

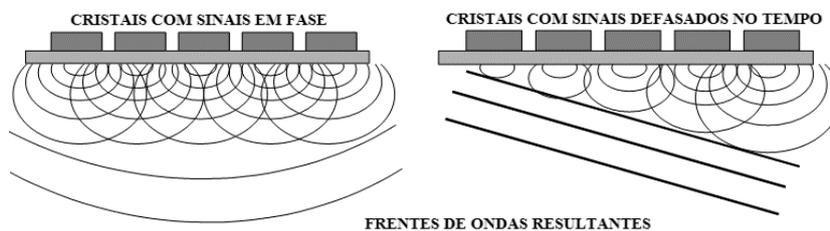


Figura 3.8 - (a) Conjunto de cristais operando em fase e (b) Excitação dos cristais de forma defasada.

Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

Por último, tem-se os transdutores EMAT, desenvolvidos para a transmissão da onda sem a necessidade de acoplante, com o objetivo de detectar discontinuidades, medir

espessura e é utilizado também para medir tensão mecânica através de um campo magnético gerado entre o transdutor e a peça analisada. A utilização desse transdutor não requer limpeza superficial prévia, nem elemento acoplante, por isto, tem se apresentado como uma inspeção alternativa aos ultrassons convencionais (Cawley e Lowe, 2004 apud Santos, 2013). A Figura 3.9 ilustra de forma esquemática a comparação entre os transdutores EMAT e piezelétrico.

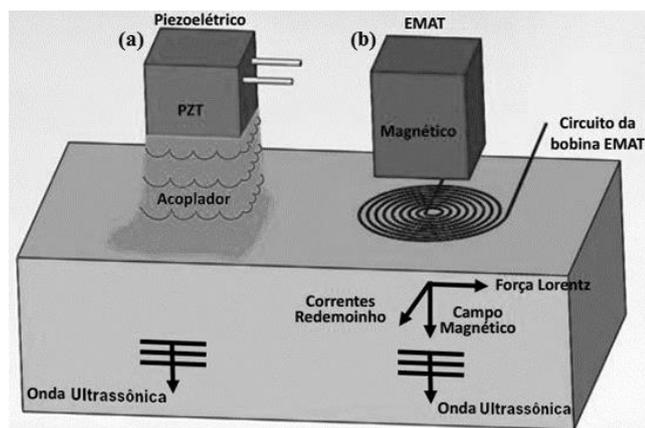


Figura 3.9 - (a) Transdutor piezelétrico e (b) Transdutor EMAT. Fonte: Adaptado de BROOKS, (2014).

### 3.6 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM

A inspeção de materiais por ultrassom para detecção de defeitos e até mesmo para analisar as tensões pode ser efetuada basicamente, através de três técnicas: Pulso-Eco, Transparência e Imersão. A técnica pulso-eco se caracteriza por utilizar um único transdutor, responsável pela emissão e recepção do feixe ultrassônico. O transdutor emite as ondas ultrassônicas em intervalos regulares. Estas ondas são introduzidas no material e se propagam até encontrar uma superfície refletora. Quando isto ocorre, as ondas são refletidas e retornam ao transdutor, que converte a energia mecânica em pulsos elétricos que são processados, permitindo fazer a leitura do sinal. Na Figura 3.10a, pode-se observar o princípio do método pulso eco (ANDREUCCI, 2014).

Em relação a técnica de transparência, utiliza-se dois transdutores independentes e separados, mostrados na Figura 3.10b, um transdutor é o transmissor e o outro o receptor. Neste caso é necessário acoplar os transdutores nos dois lados da peça, de forma que estes estejam perfeitamente alinhados. Neste tipo de inspeção não se pode determinar a posição da descontinuidade, sua extensão, ou localização na peça, é somente um ensaio

do tipo passa-não-passa, ou seja, apenas determina se existe ou não um defeito na peça ensaiada (ANDREUCCI, 2014).

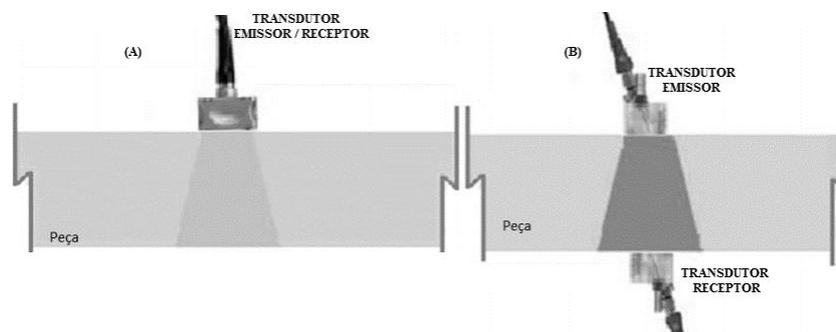


Figura 3.10 - (a) Técnica pulso-eco. (b) Técnica da transparência. Fonte: (SANTOS, 2013)

Finalmente, tem-se a técnica de imersão, na qual é empregado um transdutor de imersão à prova d'água preso a um dispositivo. O transdutor pode se movimentar, tanto na distância até a peça quanto na inclinação do feixe de entrada na superfície da peça. Na técnica de imersão a peça é colocada dentro de um tanque com água, propiciando um acoplamento sempre homogêneo (ANDREUCCI, 2014). A Figura 3.11 apresenta um esquema ilustrativo da técnica de imersão.

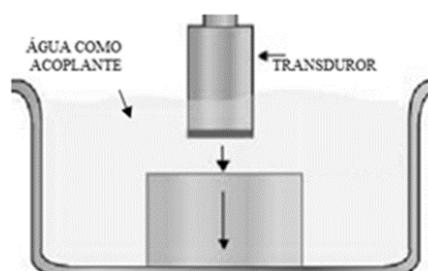


Figura 3.11 - NDT: técnica de imersão. Fonte: Adaptado de <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/Couplant.htm>, (2015).

### 3.7 TÉCNICA ULTRASSÔNICA PARA AVALIAÇÃO DE TENSÕES

De acordo com Crecraft (1967), as tensões residuais ou aplicadas são de grande interesse para os engenheiros e, geralmente, elas surgem após o processo de fabricação, sendo portanto, necessário um procedimento para analisar essas tensões sem danificar a peça. Uma das alternativas encontrada foi técnica não-destrutivas por DRX, porém, esta é limitada pela espessura de análise, ou seja, analisa somente a superfície da amostra. Nesse contexto, segundo o autor, foi sugerido a análise de tensões por ondas ultrassônicas,

em que a velocidade destas ao passar no interior de um sólido elástico tensionado não é constante como seria em um sólido isotrópico livre de tensões. Essa variação da velocidade da onda depende do estado de tensão do material, da sua direção de propagação em relação aos planos cristalinos e da direção da movimentação das partículas (direção de polarização).

O fenômeno da variação da velocidade da onda ultrassônica ao passar através de um material elástico sob tensão é chamado de efeito acustoelástico (CRECRAFT, 1967; HSU, 1973). Bittencourt (2000) comenta que o termo acustoelasticidade surgiu da semelhança com o já conhecido efeito fotoelástico da luz. Essa analogia ocorre quando uma onda ultrassônica cisalhante incide perpendicularmente à superfície de um sólido isotrópico submetido a um estado plano de tensões. Sob tensão o sólido se torna acusticamente anisotrópico e a onda ultrassônica cisalhante incidente é refratada em duas direções, com diferentes ângulos de polarização, conforme mostra a Figura 3.12.

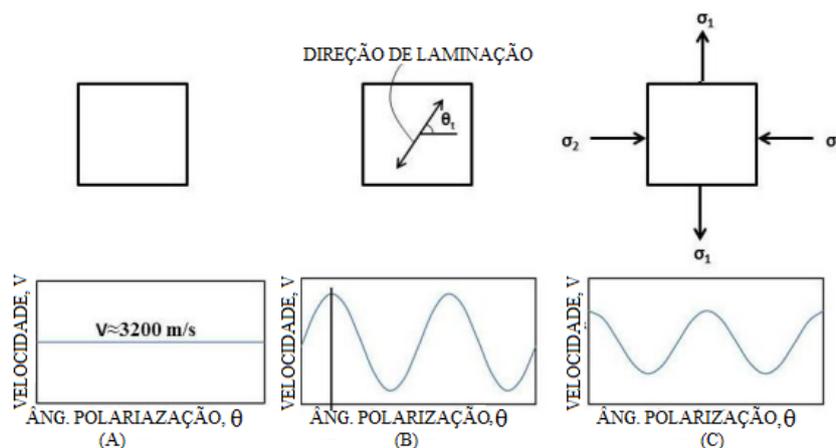


Figura 3.12 - Velocidade da onda ultrassônica cisalhante como função do Ângulo de polarização. (a) Um material isotrópico sem tensão, (b) Um material sem tensão e com textura e (c) Um material com tensão.

Fonte: Adaptado de BROOKS, (2014).

### 3.7.1 Teoria Acustoelástica e Birrefringência Acústica

Os princípios físicos do efeito acustoelásticos são melhores descritos através da relação atômica dos materiais a nível microscópico. A resposta elástica macroscópica dos sólidos é determinada pela média das forças interatômicas. Quando um material não está tensionado, os átomos do material permanecem em posição de equilíbrio correspondendo a energia atômica mínima e força interatômica zero, como é mostrado nas Figuras 3.13a e 3.13b, respectivamente. Quando um material está tensionado, os átomos são deslocados

da sua posição de equilíbrio, aumentando a energia atômica e causando o desenvolvimento de forças interatômicas. As forças interatômicas afetam diretamente a velocidade de propagação da onda ultrassônica. A média destas forças interatômicas fornece uma resposta elástica macroscópica de um material sólido como mostrado na Figura 3.13c (LU, 1996).

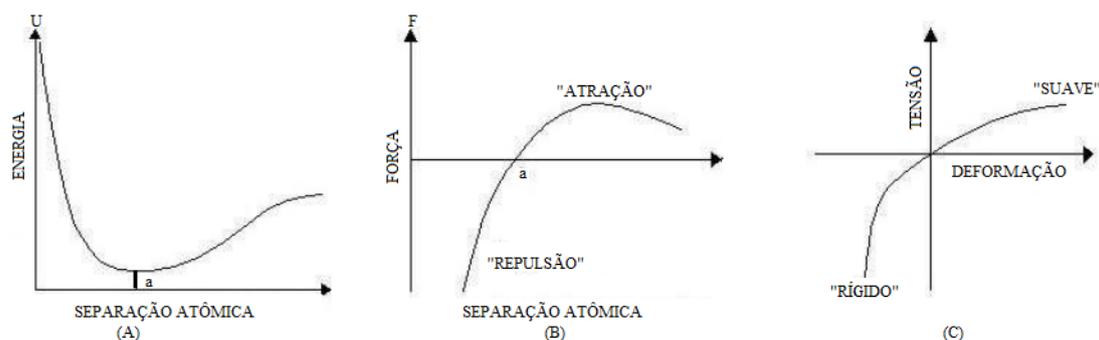


Figure 3.13 - O efeito da tensão induzida sobre a separação atômica. (a) Energia atômica, (b) Força interatômica e (c) Resposta macroscópica causada pelas forças interatômicas. Fonte: Adaptado de LU, (1996).

Antes da descrição da relação entre a variação de velocidade da onda ultrassônica e tensões presentes em um material é importante ressaltar sobre a teoria linear da elasticidade (pequenas deformações). Para Hughes e Kelly, (1953); Bittencourt, (2000) e Adrino, (2003), a teoria linear da elasticidade é limitada para deformações infinitesimais de sólidos perfeitamente elásticos, isto é, sólidos em que as deformações são funções somente da temperatura e das tensões. Para muitos problemas e materiais essa teoria é adequada. Entretanto, sob várias condições muitos sólidos não são descritos adequadamente por tal teoria. A falha da não aplicabilidade dessa teoria pode ser atribuída a duas causas principais. Em primeiro lugar, o sólido pode ser anelástico ou plástico. Em segundo lugar, as deformações podem ser tão grandes que a teoria infinitesimal não é precisa.

Para superar essa barreira, ou seja, utilizar a teoria da acustoelasticidade para medir tensões foi necessário desenvolver a teoria não linear da elasticidade (deformações finitas). Nesse contexto, Hughes e Kelly (1953) afirmam que em 1925 Brillouin formulou a teoria elástica em uma notação tensorial e derivou algumas das equações fundamentais para deformações finitas. Sendo que, posteriormente, o autor apresentou uma formulação completa da teoria básica. Em 1937, Murnaghan desenvolveu a teoria em uma notação tensorial geral e em 1951 reescreveu seu trabalho em notação matricial, incluindo termos

de terceira ordem na definição da energia de deformação elástica e introduziu as constantes elásticas de terceira ordem ( $l$ ,  $m$  e  $n$  que foram então chamadas constantes de Murnaghan). Além disso, outros autores contribuíram para o desenvolvimento da teoria de deformações finitas. Em 1940, Biot desenvolveu a teoria para sólidos pré-tensionados e considerou o efeito das tensões sobre a propagação das ondas. Em 1948, Cauchy derivou algumas equações fundamentais.

Para demonstrar a relação entre tensão e velocidade da onda, de acordo com Bray e Stanley (1997), Hughes e Kelly, (1953) consideraram um corpo de determinado material em formato cúbico e sob ação de um carregamento uniaxial de tração na direção longitudinal do corpo incidiram ondas que se propagaram nas três direções perpendiculares do mesmo, conforme é ilustrado na Figura 3.14. Nesta figura, o primeiro índice relacionado à velocidade representa a direção de propagação da onda, enquanto que o segundo índice está relacionado com a direção de movimento das partículas. Na Figura 3.14a, a onda se propaga na mesma direção da tensão aplicada ao corpo. Sendo que a nomenclatura  $V_{11}$  representa a velocidade das partículas na mesma direção de propagação da onda (ondas longitudinais). Enquanto, as nomenclaturas  $V_{12}$  e  $V_{13}$  representam a velocidade da onda em direções perpendiculares ao movimento das partículas (ondas transversais). Nas Figuras 3.14b e 3.14c as ondas se propagam em direções ortogonais em relação às tensões atuantes.

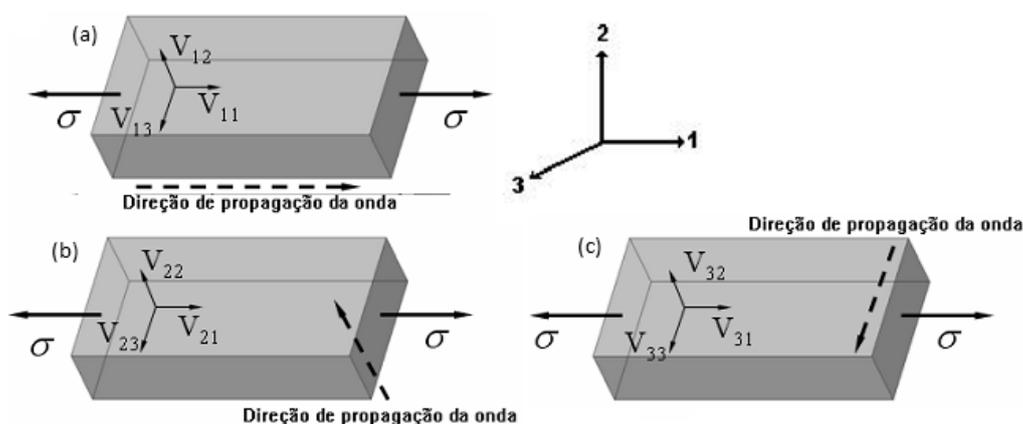


Figura 3.14 - Representação da propagação de ondas acústicas em materiais tracionados. Fonte: Adaptado de BRAY e STANLEY, (1997).

Baseados na direção de propagação da onda e no movimento das partículas (polarização da onda), as Equações 3.11, 3.12 e 3.13 mostram a relação entre velocidade

da onda ultrassônica e a deformação que surge devido à tensão no material onde essa onda se propaga.

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad (3.11)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (3.12)$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + \mu)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (3.13)$$

Nestas equações,  $\rho_0$  é a densidade inicial;  $V_{11}$  é a velocidade da onda longitudinal que se propaga na direção 1 com o deslocamento das partículas também na direção 1;  $V_{12}$  e  $V_{13}$  são as velocidades das ondas ultrassônicas cisalhantes que se propagam na direção 1 com o deslocamento das partículas nas direções 2 e 3, respectivamente;  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes elásticas de segunda ordem ou constantes de *Lamé*;  $l$ ,  $m$  e  $n$  são as constantes elásticas de terceira ordem denominadas constantes de *Murnaghan*;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são as componentes de deformações triaxial homogêneas nas direções principais 1, 2 e 3 e  $\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ .

Existem diversos trabalhos na literatura (Hughes e Kelly, 1953; Iwashimizu e Kuobomura, 1973; Thompson, Lu e Clark, 1996) que apresentam uma descrição detalhada, mostrando todas as elaborações matemáticas realizadas a partir da teoria de *Murnaghan*, com as considerações necessárias para que as equações que regem a técnica ultrassônica para medição de tensão fossem estabelecidas, tais literaturas devem ser consultadas para um entendimento mais detalhado e adequado da técnica.

Para o caso do estado uniaxial de tensões, existem cinco modos de propagação de ondas cujas velocidades podem ser determinadas a partir das Equações 3.11 a 3.13. Então, considerando-se a tensão atuando na direção 1 (Figura 3.14), as componentes principais de deformação são dadas pelas Equações 3.14 e 3.15, respectivamente. Em que  $\varepsilon$  é a deformação na direção 1 e  $\nu$  é o coeficiente de *Poisson*

$$\alpha_1 = \varepsilon \quad (3.14)$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = -v\varepsilon \quad (3.15)$$

Substituindo-se os valores da Equação 3.14 na Equação 3.11, esta é reduzida à Equação 3.16, e se substituindo os valores das Equações 3.14 e 3.15 nas Equações 3.12 e 3.13, estas se reduzem à Equação 3.17.

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + [4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + v\mu(1 + 2l/\lambda)]\varepsilon \quad (3.16)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + [4\mu + v(n/2) + m(1 - 2v)]\varepsilon \quad (3.17)$$

As velocidades das ondas viajando perpendicularmente à direção da tensão uniaxial determinadas a partir das equações 3.11 a 3.13, também podem ser obtidas pelas Equações 3.18, 3.19 e 3.20.

$$\rho_0 V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2v) - 4v(m + \lambda + 2\mu)]\varepsilon \quad (3.18)$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \rho_0 V_{31}^2 = \mu + [(\lambda + 2\mu + m)(1 - 2v) + \frac{1}{2}nv]\varepsilon \quad (3.19)$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \rho_0 V_{32}^2 = \mu + [(\lambda + m)(1 - 2v) - 6v\mu - \frac{1}{2}n]\varepsilon \quad (3.20)$$

Nestas equações,  $V_{22}$  é a velocidade da onda longitudinal se propagando na direção 2 e as partículas do sólido vibrando na direção 2.  $V_{21}$  e  $V_{23}$  são a velocidade das ondas cisalhantes que se propagam na direção 2 e as partículas do sólido vibram nas direções 1 e 3, respectivamente.

Com base nas Equações 3.18 a 3.20, e se considerando as relações elásticas entre tensão e deformação, é possível estabelecer as relações fundamentais entre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas longitudinal e cisalhante com as tensões existentes no material em análise. Sendo assim, as Equações 3.21 e 3.22 ilustram a propagação da onda paralela à direção da tensão aplicada e as Equações 3.23 a 3.25 mostram a propagação da onda perpendicular à direção da tensão aplicada.

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2\mu + (\sigma/3K)[2l + \lambda + (\lambda + \mu)(4m + 4\lambda + 10\mu)/\mu] \quad (3.21)$$

$$\rho V_c^2 = \mu + (\sigma/3K)[m + (\lambda n/4\mu) + 4\lambda + 4\mu] \quad (3.22)$$

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2\mu + (\sigma/3K)[2l - (2\lambda/\mu)(m + \lambda + 2\mu)] \quad (3.23)$$

$$V_{c1}^2 = \mu + (\sigma/3K)[m + (\lambda n/4\mu) + \lambda + 2\mu] \quad (3.24)$$

$$\rho V_{c2}^2 = \mu + (\sigma/3K)[m - (\lambda + \mu) + n/2\mu - 2\lambda] \quad (3.25)$$

Nestas equações,  $\sigma$  é a tensão uniaxial (positiva para tensão compressiva e negativa quando trativa); os subscritos  $L$  e  $c$  correspondem as ondas longitudinal e cisalhante, respectivamente;  $c_1$  corresponde à onda cisalhante com polarização paralela à direção da tensão;  $c_2$  corresponde à onda cisalhante com a polarização perpendicular à direção de tensão;  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes elásticas de Lamé de segunda ordem, de um meio isotrópico;  $l$ ,  $m$  e  $n$  são as constantes elásticas de terceira ordem apresentadas por *Murnaghan*;  $\rho$  é a densidade do meio livre de tensões e  $K$  é o módulo volumétrico dado pela Equação 3.26.

$$K = \lambda + 2\mu/3 \quad (3.26)$$

O primeiro fator do lado direito das equações 3.21 a 3.25 descreve a velocidade da onda ultrassônica propagando em um corpo livre de tensão. Nas equações 3.21 e 3.23 esse fator é  $(\lambda + 2\mu)$  e nas equações 3.22, 3.24 e 3.25 vale  $\mu$ .

Como se verifica, a determinação das tensões em materiais pela aplicação direta dessas equações acima não é uma tarefa fácil, devido a duas razões principais. Primeiro, as medidas de velocidade da onda ultrassônica no estado sem tensão têm que ser conhecidas com exatidão, o que é difícil, já que as variações microestruturais do material possuem influência sobre a velocidade da onda da mesma ordem de grandeza da tensão. Em segundo lugar, as medidas requerem o conhecimento do caminho percorrido pela onda, assim como, as medidas do tempo de percurso, com resolução ao menos uma ordem

de grandeza maior do que o efeito da tensão observado, que na prática, geralmente, não é possível (BITTENCOURT, 2000).

Portanto, tendo como base a teoria desenvolvida por Murnaghan em 1937 e, posteriormente, equacionada por Hughes e Kelly em 1953, as relações básicas entre a velocidade da onda ultrassônica e a deformação que surge devido à tensão no material no qual essa onda se propaga são dadas pela Equações 3.27 e 3.28. Estas equações representam de forma genérica a variação da velocidade da onda ultrassônica longitudinal e cisalhante, respectivamente, em relação à tensão.

$$\frac{V_{ii}-V_l^0}{V_l^0} = k_1\sigma_i + k_2(\sigma_j + \sigma_k) \quad (3.27)$$

$$\frac{V_{ij}-V_c^0}{V_c^0} = k_3\sigma_i + k_4\sigma_j + k_5\sigma_k \quad (3.28)$$

Nestas duas equações,  $V_l^0$  e  $V_c^0$  são as velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes, respectivamente, propagando-se no material sem tensão,  $V_{ij}$  é a velocidade de uma onda se propagando na direção  $i$  e polarizada na direção  $j$ ;  $\sigma_i$ ,  $\sigma_j$  e  $\sigma_k$  são as tensões principais nas respectivas direções e  $k_1$  a  $k_5$  são chamadas constantes acustoelástica normalizadas. Cada constante acustoelástica corresponde a uma relação entre a direção de propagação da onda e a direção de polarização das partículas em relação à tensão, e são obtidas a partir da variação relativa da velocidade das ondas em um material tensionado uniaxialmente, assumindo variações muito pequenas, em que as constantes acustoelásticas são geradas a partir das Equações 3.21 a 3.25.

Conforme descrito anteriormente, a utilização direta das relações entre velocidade da onda ultrassônica e a tensão no material apresenta alguns problemas, como por exemplo, a densidade, módulo de elasticidade, além das constantes de 2ª e de 3ª ordens que precisariam ser determinadas. Contudo, uma maneira de eliminar alguns desses problemas é através do uso da técnica de birrefringência acústica, a qual é definida matematicamente, como a diferença fracional da velocidade ou do tempo de transito da onda ultrassônica cisalhante, em relação a duas direções perpendiculares entre si.

Na técnica da birrefringência acústica, a onda cisalhante se propaga perpendicularmente à superfície do material, isto é, ao longo da espessura deste, podendo

a direção de polarização ser alinhada ou perpendicular à direção de aplicação da carga ou direção de laminação do material. A aplicação da onda ultrassônica cisalhante para a medida da tensão volumétrica é usada frequentemente porque permite eliminar a limitação que ocorre, na medida de velocidade, em função da espessura do material. Além do que, em relação à onda longitudinal, a onda cisalhante é mais sensível para essa aplicação, o que a torna mais recomendada para a análise de tensões em chapas no estado biaxial de tensão (ALLEN e SAYER, 1984).

Ainda segundo Allen e Sayer (1984), em um material isotrópico e sem efeito da textura e da tensão, o tempo que a onda leva para percorrer esta espessura é o mesmo para as duas direções de polarização. Contudo, se este material estiver tensionado isto não ocorre, sendo assim, a equação genérica da velocidade da onda cisalhante, mostrada anteriormente (Equação 3.28), combinada para as duas direções de polarização passa a ser formulada, conforme a Equação 3.29. Nesta equação,  $B$  é a birrefringência acústica do material,  $k_4$  e  $k_5$  são as constantes acustoelásticas do material tensionado,  $v_c^0$  é a velocidade da onda cisalhante na ausência de tensões e  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  é a diferença de duas tensões principais, o que é de interesse para avaliação dos critérios de escoamento (Tresca e Von Mises)

$$B = \left( \frac{V_{31} - V_{32}}{v_c^0} \right) = (k_4 - k_5)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3.29)$$

Como a técnica de medida de tensão por birrefringência acústica relaciona a diferença relativa entre as velocidades ou o tempo de duas ondas ultrassônicas com direções de polarização ortogonais entre si, indicando o grau de anisotropia do material, então a birrefringência pode ser determinada de acordo com a Equação 3.30 (SCHNEIDER, 1995; BITTENCOURT, 2000, ORTEGA, 2011).

$$B = \frac{V_l - V_t}{\frac{V_l + V_t}{2}} = \frac{-(t_l - t_t)}{\frac{t_l + t_t}{2}} \quad (3.30)$$

Nesta equação,  $V_l$  é a velocidade da onda ultrassônica cisalhante com a direção de polarização alinhada com a de laminação,  $V_t$  é a velocidade da onda ultrassônica cisalhante com a direção de polarização transversal a de laminação,  $t_l$  é o tempo de

percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização alinhada com a de laminação do material e  $t_t$  o tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização perpendicular à de laminação.

Para correlacionar adequadamente a direção de polarização da onda cisalhante com as tensões existentes em um material no seu estado plano de tensões, o conceito de material ortotrópico, ou seja, material que tem propriedades de simetria elástica com relação a três planos cristalinos, é importante. Pois, baseado nos conceitos de ortotropia e direção de simetria do material, a técnica de birrefringência acústica é utilizada para análise de tensões. As chapas metálicas laminadas são exemplos de materiais levemente ortotrópicos, ou seja, as mesmas apresentam uma textura onde muitos grãos são arranjados com certos eixos cristalográficos paralelos à direção de laminação. Além disso, esta direção e a ortogonal a ela no plano da chapa são duas direções de simetria ortotrópica.

Conforme descrito anteriormente, a teoria sobre a birrefringência acústica foi desenvolvida, inicialmente, em um material isotrópico, isto é, livre de tensões e sem uma orientação preferencial dos grãos. Entretanto, em geral, materiais completamente isotrópicos não existem, o que pode influenciar na medida de tensão por ultrassom, pois uma pequena variação na orientação dos grãos pode produzir anisotropia acústica da ordem da produzida pela tensão. Além disso, outro fato que pode ocasionar uma variação da medida da tensão por ultrassom é o não alinhamento dos eixos das tensões principais com eixo de simetria do material. Neste caso, ocorre o desvio da direção de polarização em relação a direção de simetria do material, em vista disso, Iwashimizu e Kuobomura (1973) propuseram as Equações 3.31 e 3.32 para a técnica da birrefringência determinar tensões em seu estado plano.

$$B^2 = [B_0 + A(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})]^2 + [2A\sigma_{xy}]^2 \quad (3.31)$$

$$\tan 2\emptyset = \frac{2A\sigma_{xy}}{B_0 + A(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})} \quad (3.32)$$

Nestas equações,  $\emptyset$  é o ângulo entre a direção de simetria do material e a direção de carregamento,  $B$  é a birrefringência,  $B_0$  é a birrefringência inicial (induzida pela textura e sem carga),  $A$  é um parâmetro do material (constante acústica de tensão) relacionada à

constante acustoelástica, e é assumido como  $k=(K_4-K_5)$ , conforme mostra a Equação 3.28.  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{xy}$  são as tensões no plano definidas pelas direções de simetria do material, ou seja, são referentes ao sistema de coordenada paralelo, transversal e cisalhante a direção de laminação do material, respectivamente. A Figura 3.15 ilustra essas direções de simetria, carregamento e de polarização, além de ajuda a compreender as Equações 3.31 e 3.32.

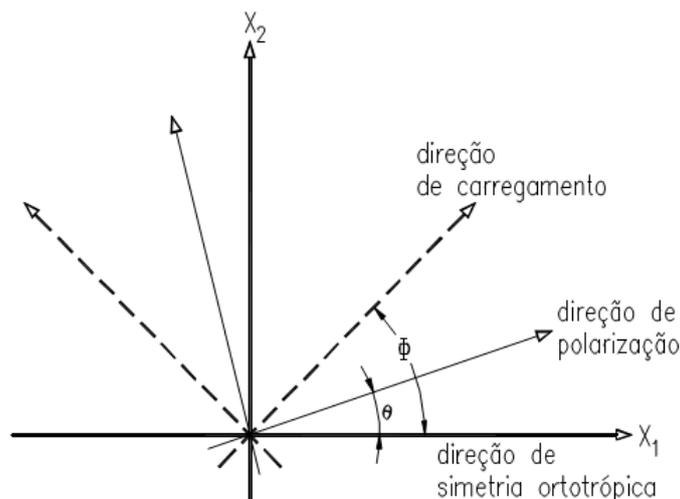


Figura 3.15 - Ilustração das direções de tensões (direção do carregamento), de polarização e de simetria ortotrópica e seus respectivos ângulos usadas pela teoria da birrefringência. Fonte: Adaptado de IWASHIMIZU e KUOBOMURA, (1973).

Como se observa pelas Equações 3.31 e 3.32, as mesmas necessitam da tensão cisalhante, entretanto, como a birrefringência atua no estado plano de tensões, a tensão cisalhante é condicionada a zero ( $\sigma_{xy}=0$ ), então  $\phi=0$ , o que significa que as direções das tensões principais coincidem com as direções de simetria ortotrópica do material. Dessa forma, as Equações 3.31 e 3.32 são reduzidas à equação 3.33, a qual é utilizada para determinar o nível de tensão em um material, após um processo de soldagem, por exemplo. Cada termo referente a Equação 3.33 já foi descrito anteriormente neste item.

$$B = B_0 + k(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad (3.33)$$

É importante comentar que a determinação de tensões através da equação acima pode ser usada em materiais isotrópicos e anisotrópicos. Em relação aos materiais anisotrópicos, ou seja, materiais policristalinos que apresentam grupos de grãos que

tomam uma determinada orientação preferencial, característico de materiais fabricados pelo processo de laminação gera a anisotropia do metal, o mesmo ocorrendo quando o material é submetido a uma tensão, de modo que a velocidade da onda ultrassônica passa a variar com a direção de polarização da onda em relação à direção da textura do material ou à direção principal de tensão. Neste princípio se baseia a técnica da birrefringência acústica usado nas avaliações de tensões estudada neste trabalho. Portanto, é necessário conhecer a direção de polarização do transdutor ultrassônico e estabelecer a direção de laminação do material analisado.

### 3.8 APLICAÇÕES DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA NA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS

Atualmente, estão disponíveis na literatura diversos trabalhos que empregam a técnica ultrassônica para medir tensões residuais em estruturas soldadas utilizando os mais variados tipos de ondas ultrassônicas. Neste item, abordam-se alguns desses trabalhos, conforme mostrado a seguir.

Nesse contexto, Tanala *et al.*, (1995) utilizaram a técnica ultrassônica para a análise de tensões residuais em dois tipos de juntas soldadas, tubos de aço inoxidável e chapa de Al-Mg e compararam os resultados com a técnica de difração de raio X. Na análise do tubo de aço inoxidável, os autores utilizaram transdutores que geravam ondas superficiais de *Rayleigh* e ondas longitudinais subsuperficiais. Além disso, os transdutores apresentavam uma superfície curva na região do acoplamento com a superfície do tubo para se obter melhores resultados. As medidas das tensões longitudinais ( $\sigma_L$ ), transversalmente ao cordão de solda, mas longitudinal ao eixo do tubo foram feitas com transdutor de ondas superficiais de *Rayleigh*. Enquanto as medidas de tensões transversais ( $\sigma_T$ ), transversalmente ao eixo do tubo foram realizadas com transdutor de ondas subsuperficiais longitudinais. Para o tubo de aço inoxidável, os resultados de tensão foram semelhantes para as duas técnicas, tanto para a componente de tensão longitudinal ( $\sigma_L$ ), quanto para a transversal ( $\sigma_T$ ), como pode ser verificado na Figura 3.16. Os resultados semelhantes entre as duas técnicas, segundo os autores é devido à boa preparação das peças antes da soldagem, da usinagem e tratamento térmico, embora, as duas técnicas se diferenciem tanto em profundidade, quanto em tamanho de área analisada. Pois segundo os autores a análise com a difração de raio X abrange

algumas dezenas de microns de profundidade e, aproximadamente, uma área de 1 mm<sup>2</sup>. Por outro lado, a medição com ultrassom analisou uma profundidade de 2 mm e uma área de 3 cm<sup>2</sup>, aproximadamente.

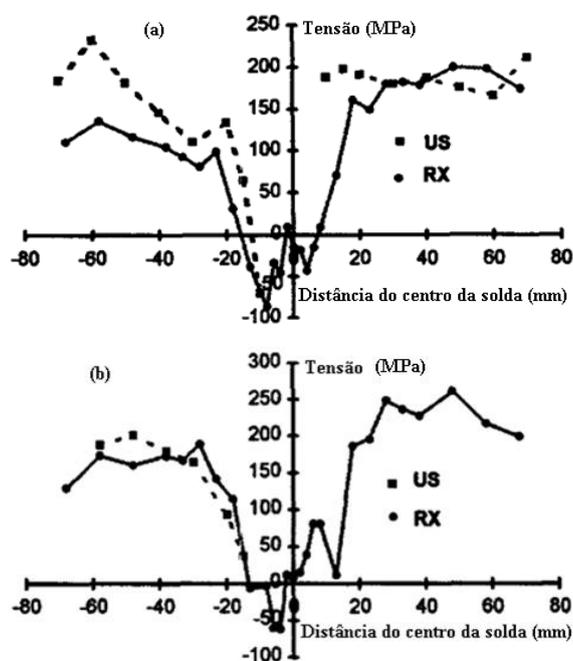


Figura 3.16 - Comparação de distribuição de tensão em tubo de aço inoxidável soldado utilizando as técnicas de Ultrassom e Difração de raio-X. (a) Distribuição de ( $\sigma_L$ ) e (b) Distribuição de ( $\sigma_T$ ). Fonte: Adaptado de TANALA *et al.*, (1995).

Em relação à análise de tensão na chapa de Al-Mg, os autores observaram que os gráficos gerados (Figura 3.17) apresentaram desconformidade, em particular, no centro do cordão de solda e a uma distância de 120 mm do mesmo. No centro do cordão não foram realizadas medições de tensões residuais porque ocorrem mudanças microestruturais, as quais afetam intensamente a velocidade da onda e, conseqüentemente, o valor da tensão. Além disso, os autores também verificaram que para a componente de tensão longitudinal ( $\sigma_L$ ), transversalmente ao cordão de solda, houve um resultado semelhante entre as duas técnicas. Por outro lado, para a componente transversal ( $\sigma_T$ ), longitudinalmente ao cordão de solda, o resultado foi diferente. Esse resultado poderia ser explicado pela distribuição não homogênea da espessura da chapa.

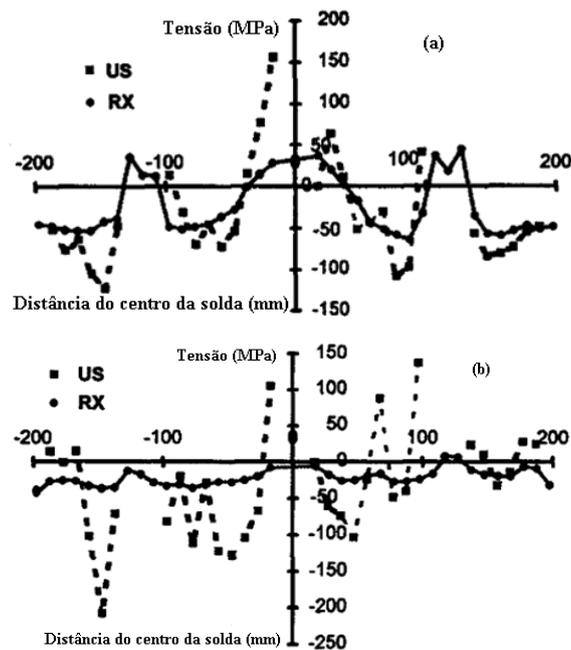


Figura 3.17 - Comparação de distribuição de tensões residuais medidas com técnicas diferentes (Ultrassom e Difração de raio-X) em uma chapa de Al-Mg. (a) Distribuição de ( $\sigma_L$ ) e (b) Distribuição de ( $\sigma_T$ ). Fonte: Adaptado de TANALA *et al.*, (1995).

Outro trabalho utilizando a técnica ultrassônica para medir tensões residuais em juntas soldadas foi realizado por Walaszek *et al.*, (2000). Nesse trabalho os autores mostram através da técnica os resultados de tensões residuais medidos em juntas soldadas do aço S355 e os compararam com os métodos do Furo e difração de raio X, duas técnicas já consolidadas para esse tipo de análise. Além disso, os autores também estudaram a influência da microestrutura do material nas medidas ultrassônicas. Para obterem as tensões residuais, os autores determinaram a constante acustoelástica do metal de base e estimaram em 90% e 80%, tal constante para a ZTA e cordão de solda, respectivamente. Essa estimativa da constante acustoelástica na ZTA e cordão não fica muito clara no trabalho. Nessas duas últimas regiões (ZTA e cordão de solda), de acordo com os autores há mudanças na microestrutura do material, provocadas tanto pelo processo de soldagem (temperatura), quanto pelo material de solda depositado, o que provoca mudança na constante acustoelástica do material, conseqüentemente, na velocidade da onda ultrassônica, tornando os resultados diferentes do material de base. Levando isso em consideração, primeiramente, os autores compararam os valores de tensões residuais medidos na ZTA e no cordão de solda espaçados de 2 em 2 mm e no metal de base de 5 em 5 mm comparando o ultrassom com a técnica do furo, este último usinado a uma profundidade de 2 mm da espessura da chapa. A Figura 3.18 mostra os resultados para os métodos do furo e do ultrassom. Nessa figura, os autores mostram que as tensões na junta

soldada obtidas pelo ultrassom são maiores do que as obtidas pelo método do furo e, mais, maiores do que a tensão de escoamento do material (400 MPa).

Ainda segundo os autores, esse resultado, possivelmente, foi devido a influência da constante acustoelástica, a qual não é a mesma do metal de base. No entanto, após o relaxamento da tensão através de tratamento térmico, os valores das tensões residuais diminuíram consideravelmente, conforme é visto na Figura 3.19.

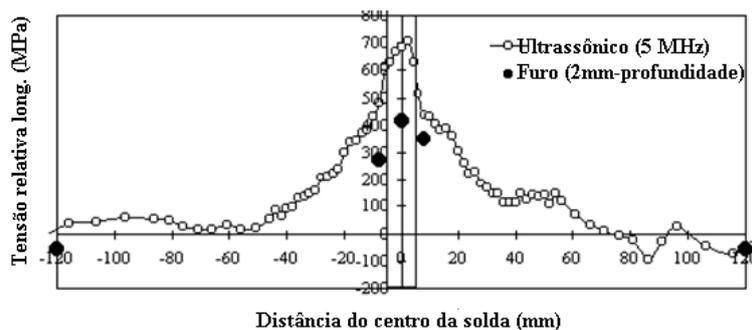


Figura 3.18 - Perfil de tensões residuais longitudinal obtido pelos métodos de ultrassom (5MHz) e furo. Fonte: Adaptado de WALASZEK *et al.*, (2000).

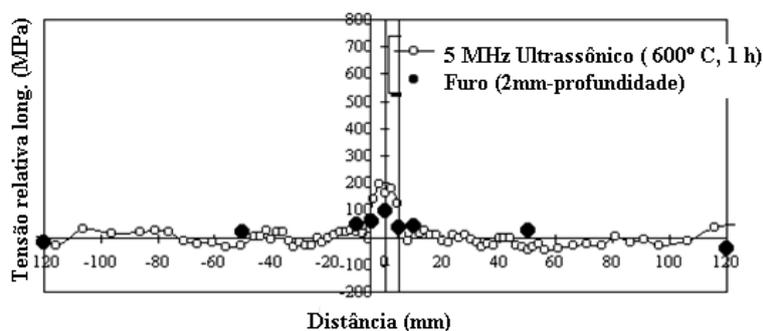


Figura 3.19 - Comparação dos perfis de tensão obtidos pelos métodos ultrassom e furo após tratamento completo para alívio de tensão - material - aço S355 - 8 mm de espessura. Fonte: Adaptado de WALASZEK *et al.*, (2000).

Em relação a comparação da técnica ultrassônica com a difração de raio X, as tensões residuais no cordão de solda obtidas foram maiores para a primeira técnica (Figura 3.20). Após o alívio das tensões residuais, as mesmas também reduziram (Figura 3.21), resultados semelhantes como os obtidos na análise por ultrassom e método do furo. Entretanto, mesmo após o alívio de tensões, verificou-se uma diferença de 100 MPa entre os valores obtidos com ultrassom e difração de raio X, que segundo os autores pode ser explicado pela variação microestrutural do material na ZTA e no cordão de solda.

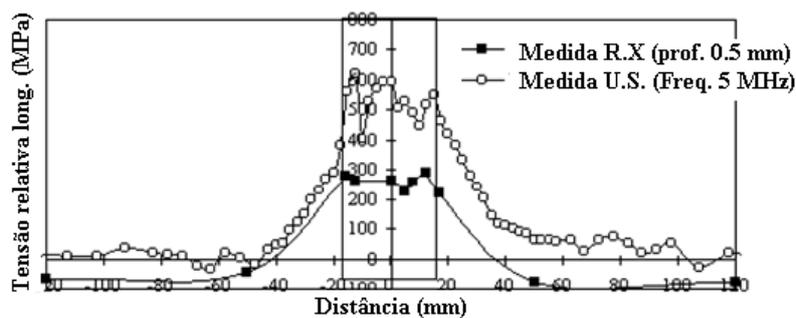


Figura 3.20 - Comparação dos perfis de tensões residuais obtidos pelos métodos de ultrassom e difração de raio-X - Material aço S355 - 30 mm de espessura. Fonte: Adaptado de WALASZEK *et al.*, (2000).

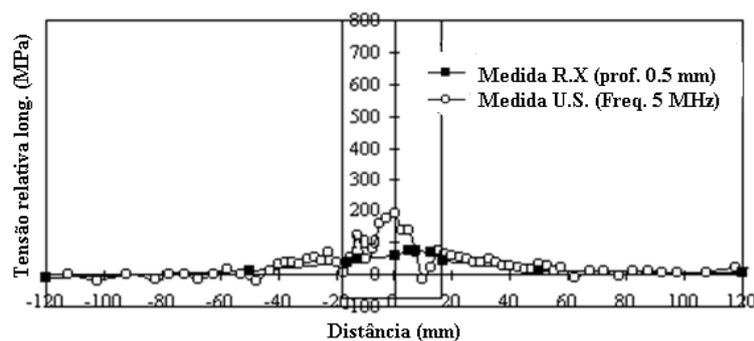


Figura 3.21 - Resultados após o tratamento térmico para alívio de tensões residuais. Fonte: Adaptado de WALASZEK *et al.*, (2000).

Por último, em relação ao efeito da microestrutura na precisão da técnica ultrassônica em comparação com a difração de raio X sem tratamento térmico para alívio de tensões, os autores, levaram em consideração correções, como por exemplo, redução de 50 MPa (10%) da tensão na ZTA e redução de 150 MPa no metal de solda devido ao efeito da microestrutura, e obtiveram para os dois métodos boa relação no perfil de tensões residuais. Além da tensão máxima que sempre foi superior ao limite de escoamento do material (400 MPa) para o método ultrassônico, foi reduzida consideravelmente, como pode ser verificado na Figura 3.22.

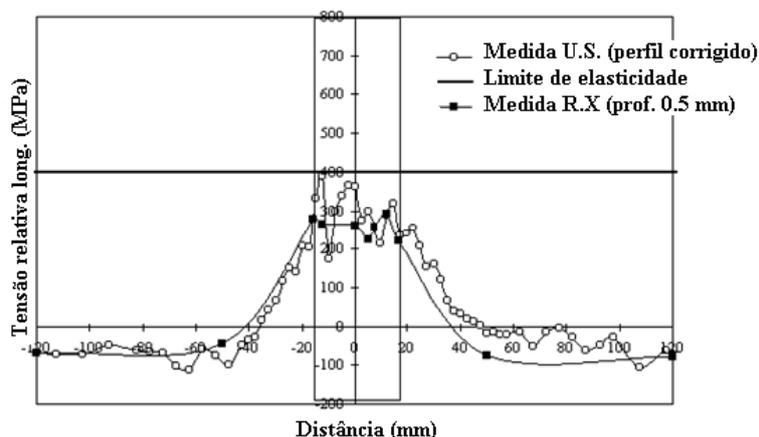


Figura 3.22 - Resultados após correções da microestrutura. Fonte: Adaptado de WALASZEK *et al.*, (2000).

No Brasil, um dos primeiros trabalhos realizados para medir as tensões residuais em juntas soldadas utilizando o ultrassom foi desenvolvido por Bittencourt (2000) em sua tese de doutorado. Com o intuito de vencer a dificuldade da precisão de medição do tempo (da ordem de nanosegundos, ns) de propagação da onda ultrassônica, o autor desenvolveu uma metodologia para medição do tempo de percurso das ondas ultrassônicas empregando o processamento do sinal ultrassônico. O processamento de sinal foi realizado por um algoritmo utilizando a correlação cruzada e a técnica multitaxas para aumentar a resolução das medidas, esse programa computacional chamado CHRONOS foi patenteado pelo Instituto de Engenharia Nuclear - IEN - UFRJ. O algoritmo de correlação cruzada, baseou-se na divisão do sinal adquirido em dois ecos, de maneira a gerar dois sinais, com partes idênticas. Um dos sinais gerados era formado apenas pelo primeiro eco do sinal adquirido e o outro pelo sinal completo. O resultado da correlação cruzada entre esses dois sinais é o atraso entre eles, ou seja, a defasagem entre os sinais, nesse caso, corresponde ao tempo de percurso que a onda ultrassônica levou na sua propagação através da espessura do material. Em relação ao aumento da taxa de amostragem (multitaxas) foi realizado a interpolação de pontos entre dois pontos consecutivos, gerando maior precisão nos resultados.

As Figuras 3.23(a) e 3.23(b) mostram esquematicamente os sinais inteiro e separados, respectivamente. Na Figura 3.23(c) é mostrado o sinal do primeiro eco correlacionado com o sinal inteiro, onde o seu ponto máximo é o valor do tempo entre o primeiro eco e o eco subsequente.

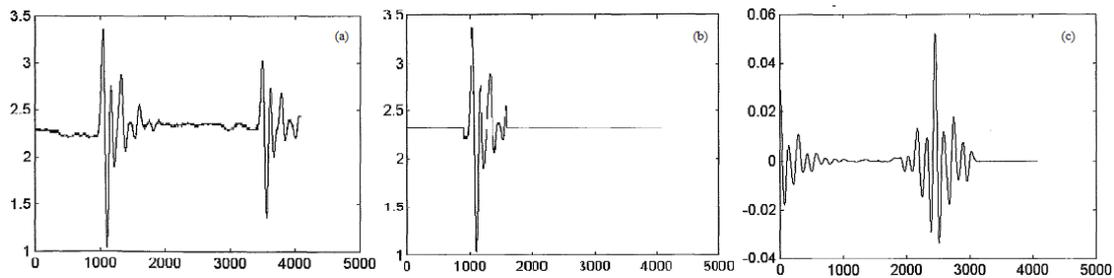


Figura 3.23 - (a) Dois primeiros ecos do sinal ultrassônico capturados após a onda ultrassônica ter percorrido a espessura da chapa de alumínio. (b) Primeiro eco do sinal anterior. (c) Resultado da correlação cruzada entre os sinais mostrados nas Figuras 3.23(a) e 3.23(b). Fonte: (BITTENCOURT, 2000).

Ainda segundo Bittencourt (2000), para verificar a eficiência do método foram feitas medições de tensões em um corpo de prova de alumínio sujeito a diferentes carregamentos de tração. As medidas do tempo foram realizadas na própria tela do osciloscópio em dois pontos máximos de dois ecos consecutivos tomados como referência, e se observou que ao se realizar diferentes leituras de tempo em um mesmo sinal, os resultados variaram em até 40ns (4,95 $\mu$ s e 4,99 $\mu$ s, para o carregamento de 2000 kgf). Segundo o autor, essa variação pode ter sido causada por uma variação do carregamento aplicado, sendo que também parte do erro se deve à dificuldade na determinação do ponto máximo do eco como referência e pela distorção em diferentes regiões do eco, devido à característica de que quando o tempo de percurso aumenta, aumenta também a defasagem entre as duas ondas e a deformação do eco muda de lugar. Por outro lado, utilizando-se o método de correlação cruzada, o processamento de sinais permitiu medidas de tempo com uma casa decimal a mais, gerando um aumento da resolução e uma diminuição do erro de medida de tempo, que nesse caso passaram a ser de 2 ns, em função do tempo de amostragem dos sinais adquiridos, enquanto anteriormente eram de 10 ns, embora o tempo de amostragem fosse o mesmo, implicando em uma medição de tempo mais preciso.

Ainda em relação ao trabalho de Bittencourt (2000), sua aplicação prática em junta soldada, consistiu em medir as tensões residuais e aplicadas originadas pela soldagem de topo em duas chapas de liga Al-Mg de 6 mm de espessura. As chapas foram usinadas com a direção de laminação paralela ao cordão de solda, o processo de soldagem empregado foi o TIG com vareta de adição de diâmetro de 1/8" AWS ER4043 constando de apenas um passe com amperagem de 140 A. Conforme pode ser verificado nas Figuras 3.24 e 3.25, o autor obteve os perfis de tensões ao longo da direção longitudinal e transversal ao cordão de solda. Os valores indicados correspondem às diferenças entre as

tensões principais, calculadas conforme a Equação 3.23. Em relação a análise de tensão longitudinal foi verificado que ocorreu uma variação de tensão ao longo do comprimento do corpo-de-prova, ou seja, presença de trações e compressivas (Figura 3.24). Em relação a análise transversal à solda (Figura 3.25), obteve-se os perfis de tensões conforme a literatura, isto é, tensões compressivas nas extremidades e tensões trativas próximas ao cordão de solda e a ZTA.

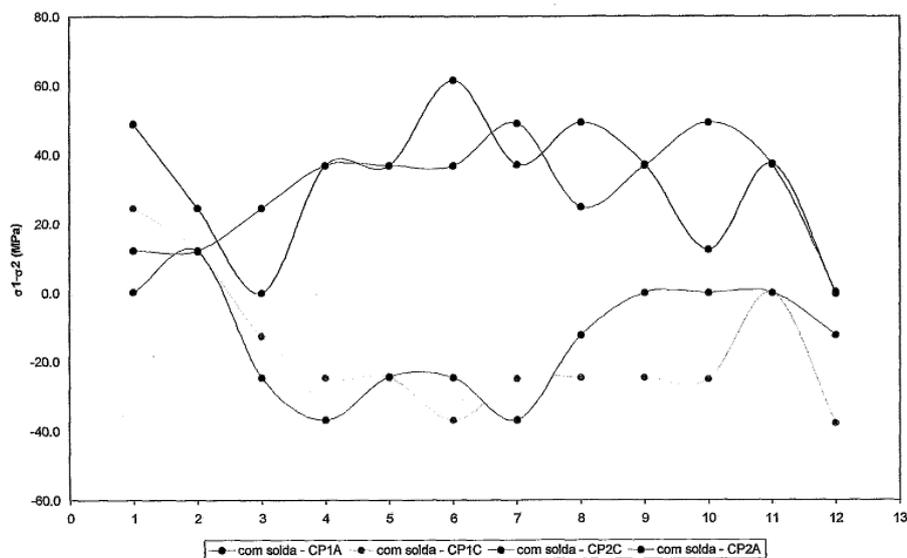


Figura: 3.24 - Distribuição de tensões ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) longitudinal ao cordão de solda em chapas de liga Al-Mg. Fonte: (BITTENCOURT, 2000).

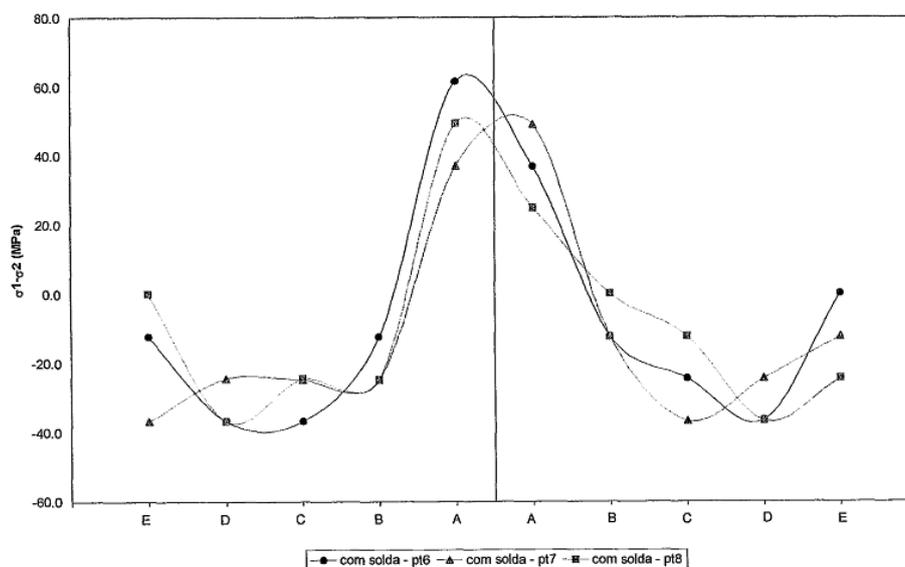


Figura 3.25 - Distribuição de tensões ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) perpendicularmente ao cordão de solda em chapas de liga Al-Mg. Fonte: (BITTENCOURT, 2000).

A partir do trabalho inicial sobre a técnica da birrefringência acústica realizada por Bittencourt, outros trabalhos começaram a surgir no Brasil. Nesse contexto, tem-se o trabalho de Marqueze (2002). No qual a autora empregou a técnica da birrefringência acústica para analisar textura dos materiais, assim como, determinar as tensões residuais geradas pela soldagem e comparou os resultados de tensão com a técnica do furo (extensometria). O material usado foi o aço ABNT 1012, chanfrado em V. Sendo o passe de raiz realizado pelo processo TIG e o preenchimento final pelo processo MIG. As análises de tensões foram realizadas no sentido longitudinal e transversal do cordão de solda. No sentido longitudinal, as medidas foram realizadas a 30 mm, 60 mm e 90 mm do cordão ao longo das linhas *A1*, *B1*, *C1* e *A2*, *B2*, *C2* (Figura 3.26). No sentido transversal, as medidas foram realizadas ao longo das linhas *C*, *D* e *E* (Figura 3.26). Sendo que no cordão de solda e na ZTA não foram realizadas medidas, pois segundo a autora a microestrutura do material é diferente do material de base, consequentemente, a constante acustoelástica, tornando-se, portanto inviável o cálculo correto das tensões residuais.

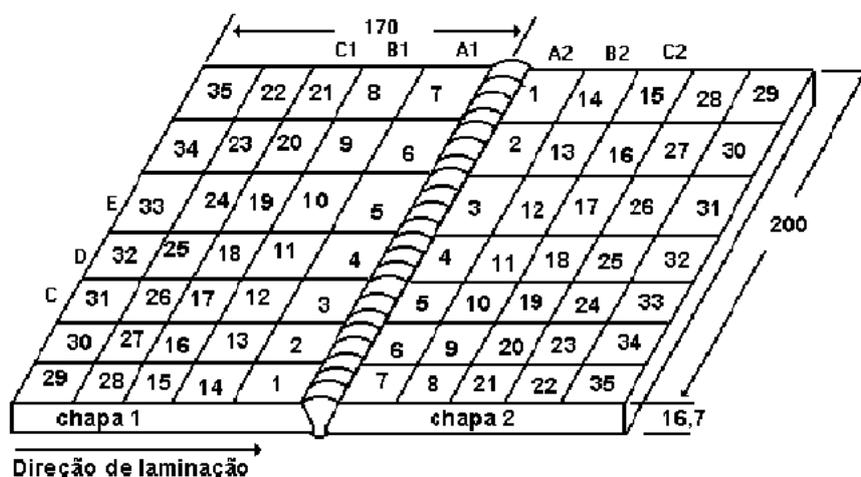


Figura 3.26 - Pontos de medições dos tempos percurso da onda ultrassônica para a obtenção das curvas de distribuição de tensão na chapa soldada. Fonte: (MARQUEZE, 2002).

De qualquer forma, ao se fazer as medições de tensões nas linhas *C*, *D* e *E*, a autora verificou que o perfil de tensão das linhas *D* e *E* (Figura 3.26) estavam de acordo com a literatura, ou seja, na região próxima ao cordão de solda, as tensões são trativas e afastado do mesmo, apresentam-se tensões compressivas. Entretanto, para a linha *C*, o perfil de tensão (Figura 3.27) apresentou tensões compressivas próximas ao cordão de solda, isso segundo a autora pode ser devido às várias fontes de tensões que ocorrem durante a soldagem.

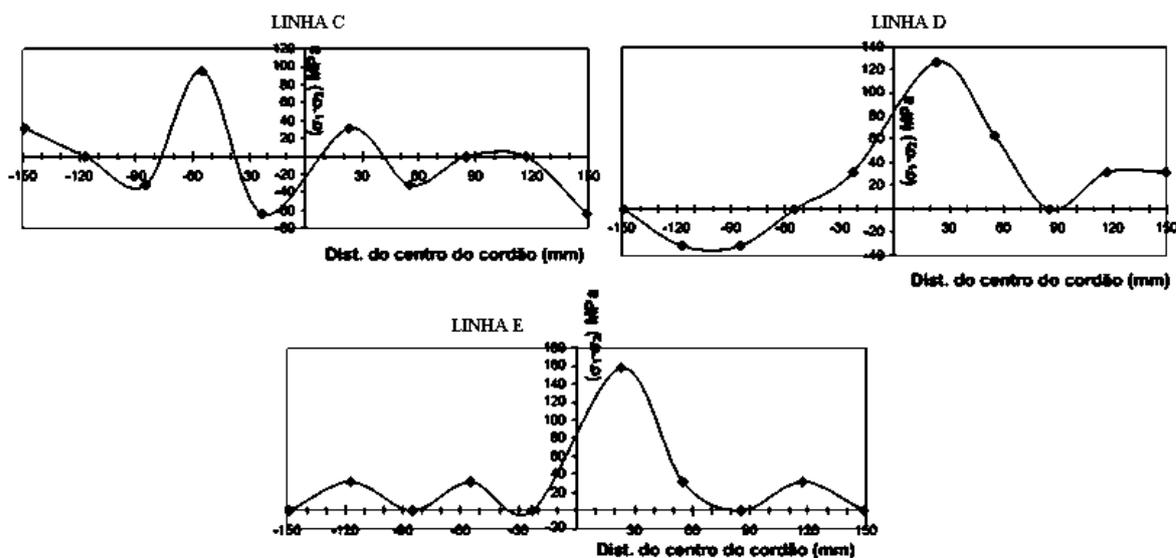


Figura 3.27 - Perfis de distribuição de tensões perpendicularmente ao cordão de solda pela técnica da birrefringência. Fonte: (MARQUEZE, 2002).

Em relação ao perfil de tensão longitudinalmente ao cordão de solda, a autora concluiu que para as linhas *A2*, *B2* e *C2*, as tensões são exclusivamente trativas, o que pode ser atribuído a um comportamento diferente com relação à birrefringência, a qual é diferente para as duas chapas, já que para as linhas *A1*, *B1* e *C1* as tensões são mistas (tratativas e compressivas), essa diferença pode ser devido também a uma distribuição de passes de solda desigual, conforme mostrado no trabalho.

Já com relação à análise de tensões transversalmente a solda com o método do furo cego comparado ao método do ultrassom (Figura 3.28), a autora verificou algumas semelhanças e disparidades nos resultados, ou seja, comparando-se a curva correspondente aos pontos da linha *D*, para as duas técnicas, observou-se que as tensões compressivas só foram verificadas na chapa 1, enquanto na chapa 2, observou apenas tensões tratativas e que o valor máximo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  foi bastante próximo (140 e 120 MPa, para furo cego e ultrassom, respectivamente) e o ponto de máximo  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  ocorreu na chapa 2. Em relação às disparidades, a principal é devido ao tipo de método, haja vista que, um analisa toda a espessura (volume) do material e o outro apenas alguns microns de profundidade. Com relação à análise da textura do material, os resultados foram semelhantes para as duas técnicas utilizadas (metalografia e birrefringência acústica) concluindo, portanto, que há possibilidade de usar a técnica da birrefringência acústica para determinar a textura e o estado de tensões de chapas de aço soldados.

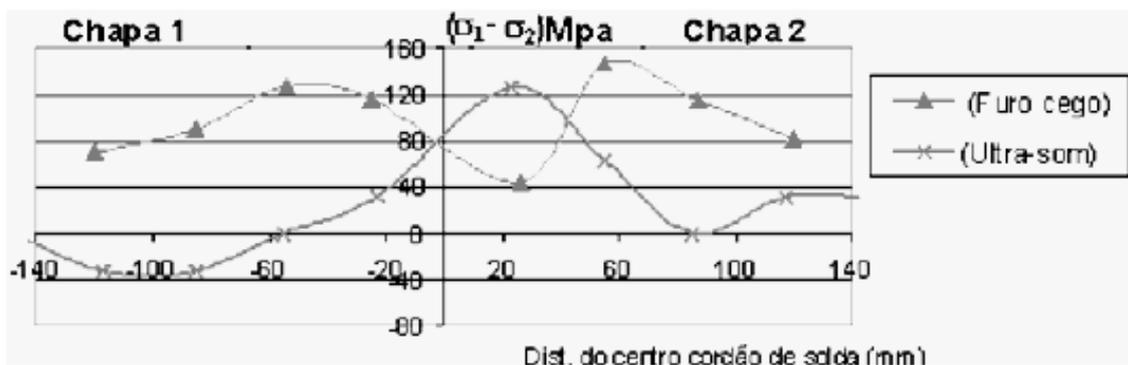


Figura 3.28 - Distribuição transversal de tensões pela técnica do furo cego e ultrassom. Fonte: (MARQUEZE, 2002).

Ortega *et al.*, (2003) utilizaram a birrefringência acústica para avaliar o tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) em juntas soldadas. Os autores usaram uma câmara hiperbárica e uma junta soldada tomada como referência. As características da junta soldada possuem as mesmas características do processo de fabricação da câmara, ou seja, espessura, processo de soldagem, metal de base e metal de adição. As medidas foram feitas antes e após o tratamento térmico. Em relação à câmara hiperbárica, os pontos 3, 4 e 5 (Figura 3.29a) foram analisados. Antes do tratamento térmico, os autores observaram que o valor da birrefringência (Figura 3.29b) no ponto 3 é elevado negativamente, indicando um estado de tensão trativa devido estar próximo ao cordão de solda. Após o tratamento térmico, a birrefringência no mesmo ponto 3 é 7(sete) vezes menor e positivo, indicando uma redução significativa no estado de tensão. Por outro lado, nos pontos mais afastados do cordão, a birrefringência é baixa e constante, estando o material com ou sem tratamento térmico.

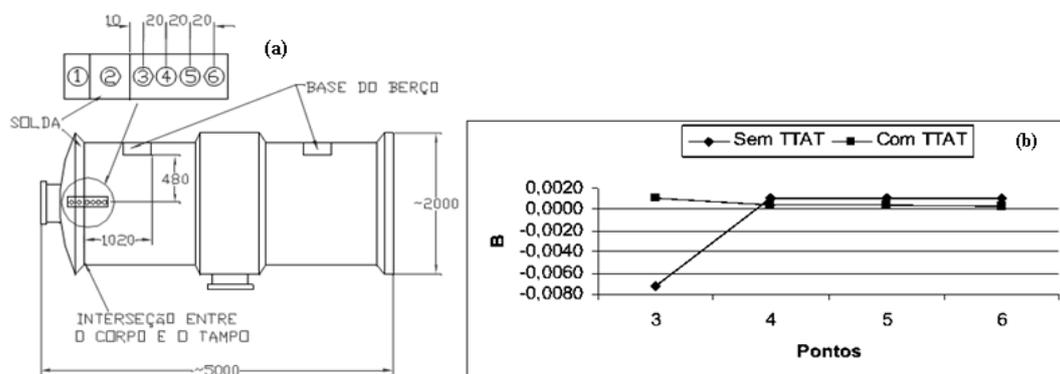


Figura 3.29 - (a) Esquema da câmara hiperbárica e (b) Birrefringência acústica nos locais próximos do cordão de solda na câmara hiperbárica antes e após tratamento de alívio de tensões. Fonte: (ORTEGA *et al.*, 2003).

Em relação à junta soldada tomada como referência, os autores concluíram que nos pontos 4, 5 e 6, (Figura 3.30a), os resultados tiveram um comportamento similar ao encontrado na câmara hiperbárica. Porém, observaram que a Peça de Referência (PR) sem TTAT não serve para simular quantitativamente a tensão gerada pela solda na câmara, uma vez que, a birrefringência nos pontos próximos à solda (pontos 3 e 4) é muito menor que a birrefringência do ponto próximo à solda da câmara hiperbárica (ponto 3). Em relação ao ponto 7 (solda), verificaram que a birrefringência é negativa, o que está associado parcialmente à existência de tensões trativas no cordão. Mas, após o tratamento, embora haja queda no valor absoluto de  $B$  (valor menos negativo), associado a uma diminuição das tensões trativas, o valor de  $B$  ainda é alto, significando que há uma importante anisotropia estrutural, inerente ao cordão de solda. Os resultados dos valores da birrefringência acústica para a peça de referência podem ser verificados na Figura 3.30b.

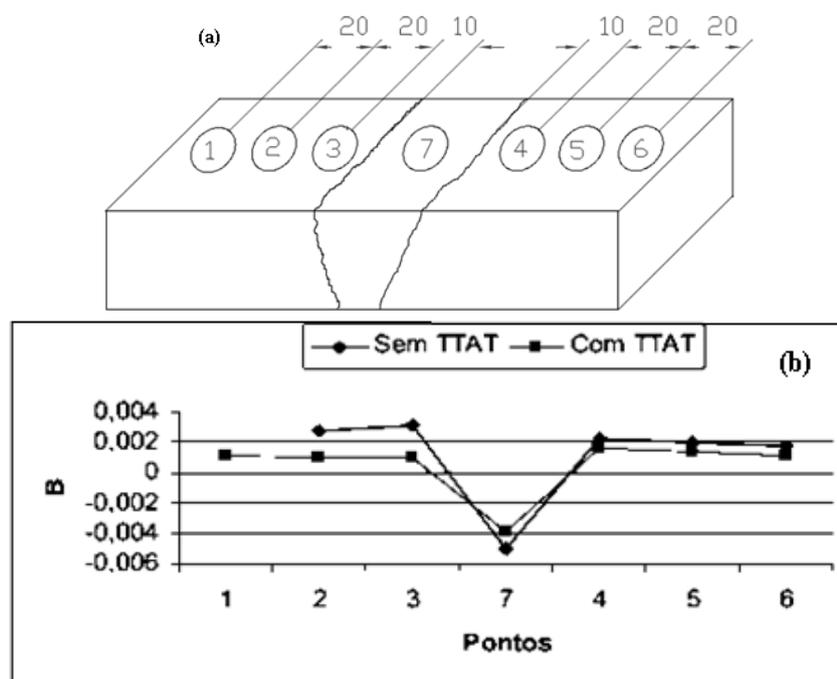


Figura 3.30 - (a) Desenho esquemático da peça de referência (PR) e (b) Birrefringência acústica ( $B$ ) na peça de referência com e sem tratamento de alívio de tensões. Fonte: (ORTEGA *et al.*, 2003).

Magina (2009) analisou tensões residuais em aço API 5L X70 fabricado pelo processo *ERW* (*Weld Resistance Electric* - solda por resistência elétrica) usando a técnica da birrefringência acústica. Nesse trabalho a autora obteve resultados de tensões em vários pontos de duas chapas antes de fabricação dos tubos e em vários pontos de tubos

retirados do início e do fim de duas bobinas de fabricação, conforme mostram as Figuras 3.31a e 3.31b.

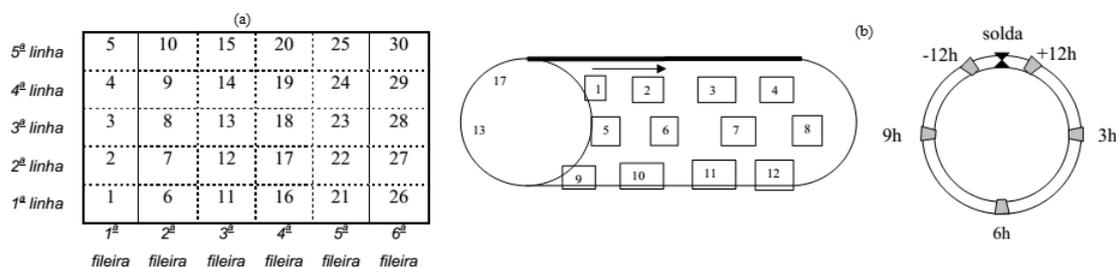


Figura 3.31 - (a) Pontos analisados na chapa e (b) Pontos analisados nos tubos. Fonte: (MAGINA, 2009).

Em relação às chapas, os ensaios consistiram na medição de 10 pares (longitudinal e transversal ao sentido de laminação) de tempo de percurso de onda ultrassônica, em 40 pontos distintos selecionadas na chapa, extremidades e meio, Figura 3.31a. Os pontos foram dispostos de forma a abranger toda a chapa, porém equidistantes entre si cerca de 5 cm e afastados 2 cm das bordas. Os resultados obtidos mostraram que para a chapa 1 os valores de birrefringência das fileiras 1 e 6 apresentam um comportamento diferente dos demais, que segundo o autor pode ser o ponto de corte da bobina. Por outro lado, entre as extremidades as variações da birrefringência foram homogêneas, tendo no início valores de  $-1,80E-02$  a  $3,02E-2$ , enquanto que no fim da mesma, os valores são de  $-2,65E-2$  a  $3,50E-2$ . Já no início da chapa 2, os valores variaram de  $-1,69E-2$  a  $2,98E-2$  e no fim de  $-2,55E-2$  a  $-3,40E-2$ . A dispersão foi alta, provavelmente, devido ao processo de desbobinamento e ao local de retirada da amostra.

Com relação aos tubos foram medidos 10 pares de tempo de percurso de onda ultrassônica em 20 pontos distintos, dispostos conforme à posição da solda no tubo: +12h, +3h, +6h, +9h, -12h em 4 linhas circunferenciais ao longo do comprimento, distantes de 10 cm uma da outra, para evitar interferência da onda emitida de um ponto a outro e abranger a maior parte do tubo, sendo que os primeiros pontos afastados 2 cm da borda usinada. A disposição é conforme mostrada na Figura 3.31b. Foram obtidos 10 valores de birrefringência em cada ponto de cada região. Como resultado a autora verificou que, da mesma forma que na chapa, a primeira e a última fileira (+12 h e -12h) apresentam comportamento diferente das demais, ou seja, apresentaram os valores de birrefringências maiores, isso se explica pela proximidade com a área de solda. A consequência desses valores maiores de  $B$  indicam valores de tensões residuais maiores causados pelo processo

de soldagem, como é mostrado no trabalho. Outros trabalhos (Dutra, 2009; Fonseca, 2012; Moraes, 2015, por exemplo) utilizando a técnica da birrefringência acústica para a determinação de tensões residuais em chapas e tubos soldados utilizados em oleodutos e gasodutos estão disponíveis na literatura.

### 3.9 COMENTÁRIOS SOBRE AS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Com base na breve revisão bibliográfica sobre as técnicas de medições de tensões residuais apresentadas nos capítulos 2 e 3, verificou-se que existem várias técnicas utilizadas, tanto na indústria, quanto no meio acadêmico. Entretanto, é factível que não existe uma técnica universal que se aplique a toda e qualquer situação, na realidade, depende do tipo da técnica disponível e da distribuição de tensões na estrutura a ser analisada. No caso das tensões residuais geradas após a soldagem, uma técnica dita ideal seria aquela que determinasse as tensões ao longo da espessura do material, já que a soldagem gera tensões ao longo de sua espessura e de natureza diferenciada, ou seja, trativas e compressivas. Nesse contexto, um dos motivos para a escolha da técnica de ultrassom, através da birrefringência acústica, foi que esta técnica determina as tensões em toda espessura da junta soldada. Contrapondo com a técnica de difração de raio X, que realiza uma análise superficial das tensões.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo trata inicialmente dos materiais e metodologias usadas na caracterização química, mecânica e metalográfica do material em estudo. Em seguida são apresentados os equipamentos que compõem o sistema de medição do sinal ultrassônico, bem como a metodologia de captura e processamento do sinal ultrassônico, os tipos de métodos de captura, as metodologias de medição da birrefringência acústica do material como recebido (BA0) e da constante acustoelástica do mesmo material (CAE).

Posteriormente, trata-se dos materiais, dos equipamentos e a metodologia empregados para a realização da soldagem GMAW e GMAW-CW. Por conseguinte, são apresentadas as metodologias de análises dos resultados após a soldagem, como a caracterização das juntas, a determinação da birrefringência acústica no metal de base (BA's). Por último, mostram-se as metodologias utilizadas para determinar as tensões residuais por birrefringência acústica e difração de raio X.

#### 4.2 MATERIAL DE ESTUDO

Para a análise do nível de tensões residuais em chapas soldadas através da avaliação acustoelástica (birrefringência acústica) e difração de raio X foi utilizado uma chapa retangular do aço estrutural ASTM A-131 (cedido pelo Estaleiro Rio Maguari, Belém - Pa), com dimensões de 1200 x 800 x 9,50 mm, com uma variação dimensional de 0,6 mm. O material é específico para a construção naval ou *off-shore*, classificado conforme o percentual de carbono, como aço de baixo teor de carbono (conhecido em inglês como *low carbon steel*) e baixa liga. A chapa de aço como recebida é ilustrada esquematicamente na Figura 4.1. Desta chapa foram usinadas mecanicamente amostras com dimensões 400 x 200 x 9,5 mm para realizar a soldagem, conforme ilustradas também na Figura 4.1.

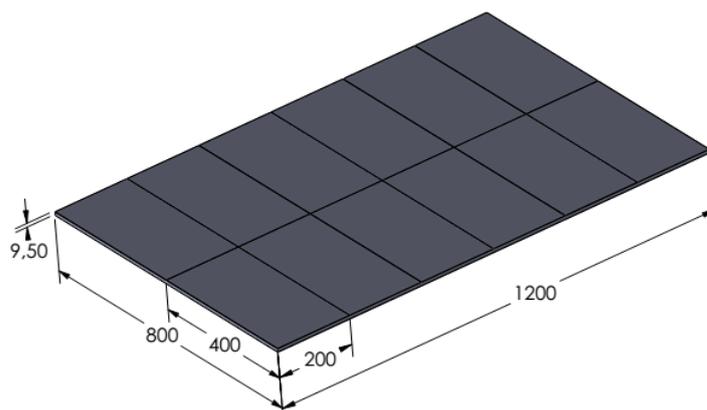


Figura 4.1 - Imagem ilustrativa da chapa como recebida com seus respectivos cortes e dimensões em mm.

#### 4.2.1 Análise Química

Para a análise da composição química do metal de base utilizado no processo de soldagem, foi retirada uma amostra da chapa e analisado por um espectrômetro de emissão óptica da *Oxford Instruments* de modelo *Foundry-Master Xpert*. A preparação da superfície da amostra para este ensaio consistiu do lixamento da superfície com lixa de granulometria 60 *mesh*. Os resultados da análise química serão comparados com os dados da norma ASTM A131/A131M - 14 (*Standard Specification for Structural Steel for Ships*).

#### 4.2.2 Análises de Propriedades Mecânicas

Em relação as análises de propriedades mecânicas do metal de base, o limite de escoamento, que é o ponto máximo onde o material mantém as propriedades elásticas, o limite de resistência, que é o ponto máximo onde o material se deforma antes de formar o empescoamento e o alongamento foram determinados por meio de ensaio de tração.

Para a realização dos ensaios de tração do metal de base, foram usinados corpos de prova obedecendo à norma ASTM E8/E8M-15a. O comprimento dos corpos de prova foi paralelo à direção de laminação da chapa como recebida. Além disso, é importante ressaltar que foram usinados 3 (três) corpos de prova com o objetivo de obter dados médios como respostas das propriedades mecânicas do material. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 1 mm/min. na máquina de ensaios universal servopulser shimadzu de modelo EHF-EM100KN-20L, a qual possui capacidade máxima de carregamento de 100

kN. A Figura 4.2 ilustra de forma esquemática os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração, além das suas dimensões em mm.

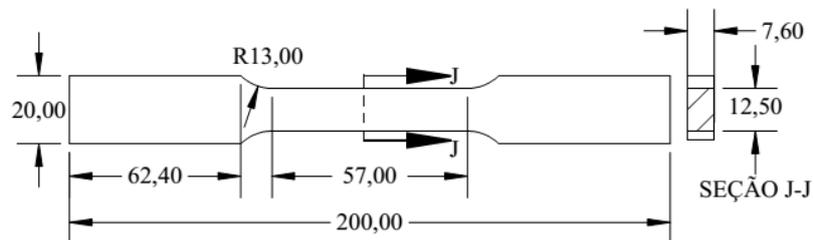


Figura 4.2 - Esquema ilustrativo dos corpos de prova usados nos ensaios de tração e suas dimensões em mm.

#### 4.2.3 Análise Microestrutural

Para realizar a análise microestrutural do material como recebido foram retiradas duas amostras do mesmo. A primeira com face de análise na direção de maior comprimento (Face-Y, eixo-y, 1200 mm) e a segunda com face de análise na direção de menor comprimento da chapa (Face-X, eixo-x, 800 mm), conforme é mostrado na Figura 4.3. As amostras foram embutidas com baquelite, em seguida passaram pelo processo de lixamento, no qual foram utilizadas lixas com granulometrias que variaram de 100 a 2000 *mesh*. A cada troca de lixa, girava-se cerca de 90° a peça, para que não ficasse marcado com a orientação da lixa anterior. Em seguida foi realizado o polimento em disco de feltro com abrasivo de alumina em politriz semi-automática para eliminação de qualquer defeito superficial e assim, poder obter a melhor reflexão de luz durante a análise metalográfica. Após estas operações, realizou-se a análise micrográfica, na qual as amostras foram submetidas ao ataque com reagente nital 2%, o procedimento foi por imersão durante 6 segundos e, utilizando-se o microscópio óptico da marca Zeiss de modelo Axio Scope.A1 foram revelados as microestruturas do material, como por exemplo, as fases e contornos de grão.

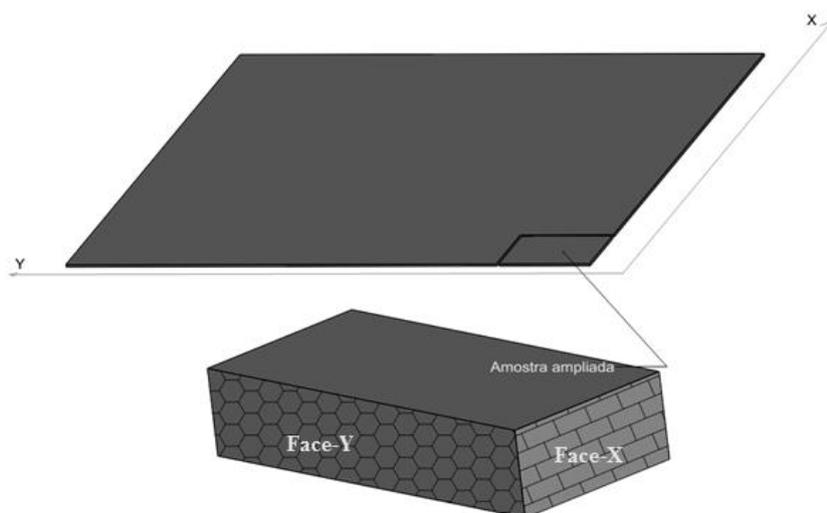


Figura 4.3 - Imagem ilustrativa das faces analisadas para determinar a microestrutura do MB.

### 4.3 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DO MATERIAL ANTES E APÓS A SOLDAGEM GMAW E GMAW-CW

#### 4.3.1 Sistema Ultrassônico

Para a determinação das tensões residuais através da birrefringência acústica foi necessário a utilização de um sistema de captura de sinais ultrassônicos que medisse a velocidade ou tempo de percurso da onda cisalhante normal à espessura do material. Nesse sentido foi desenvolvido um sistema que mediu o tempo de percurso da onda ultrassônica através do aço. O sistema ultrassônico era composto por um aparelho de ultrassom (gerador de pulso) que, através da técnica de inspeção pulso eco, fez-se a análise. Utilizou-se também um osciloscópio com uma frequência de amostragem de 350 MHz e taxa de amostragem de 2,5 GS/s; um transdutor ultrassônico piezelétrico de onda transversal e incidência normal de 12,7 mm de diâmetro e frequência nominal de 5 MHz; um filtro eletrônico redutor de tensão de duas saídas (uma de baixa tensão para o osciloscópio e outra de alta tensão para o transdutor ultrassônico). E, por último, o *software* desenvolvido pelo Instituto de Engenharia Nuclear – IEN do Rio de Janeiro, escrito na plataforma *LabView*, que utiliza a correlação cruzada e interpolação nos sinais ultrassônicos para obtenção do tempo de percurso da onda com maior precisão, instalado em um notebook para visualização do sinal. Para se ter confiabilidade nos resultados de tensões residuais, esse sistema de captura passou por um processo de calibração conforme

é mostrado no Apêndice A. Além disso, o sistema possui uma resolução em tempo de 0,05 ns e uma precisão de  $\pm 0,20$  m/s em função da velocidade média da onda, conforme mostrado na Tabela A1 do Apêndice A.

Na Figura 4.4 é mostrado a conexão entre os equipamentos do sistema de captura do sinal ultrassônico.

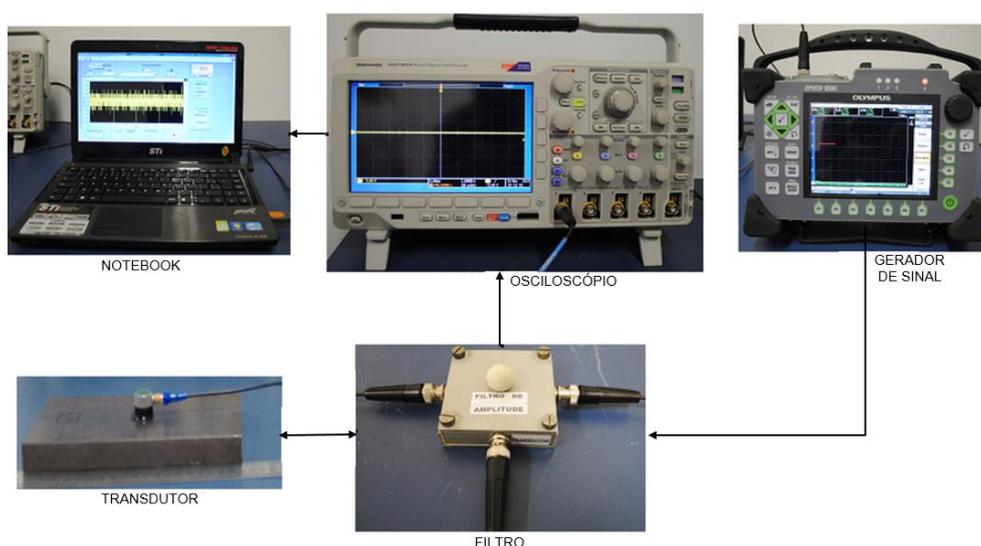


Figura 4.4 - Sistema ultrassônico utilizado na captura do tempo de percurso da onda ultrassônica.

#### 4.3.2 Metodologia de Captura do Sinal Ultrassônico

A metodologia utilizada para a captura do sinal ultrassônico para a medida do tempo de propagação da onda consistiu primeiro em demarcar a posição a ser inspecionada do material em análise; segundo, acoplou-se o transdutor na posição previamente selecionada usando um acoplante comercial, após a obtenção do perfeito acoplamento, o transdutor foi posicionado de maneira que a direção de polarização da onda, baseada na direção do cabo do mesmo, fosse paralela ao sentido de laminação da amostra, conforme mostra a Figura 4.5 (Posição-1 do transdutor). Após a captura do tempo de percurso da onda neste sentido de polarização, o transdutor foi girado em 90° para que fosse capturado o sinal com a onda polarizada transversalmente à direção de laminação, posição-2 da Figura 4.5. De acordo com Bittencourt (2000), o tempo de percurso da onda ultrassônica pode ser obtido por diversas técnicas. Neste trabalho, o tempo foi obtido pela medida das distâncias entre 2 ecos consecutivos do sinal ultrassônico. O sinal adquirido foi processado matematicamente, utilizando-se um

algoritmo de correlação cruzada e interpolação presentes no *software* CHRONOS, de forma a obter o tempo de percurso da onda com maior precisão.

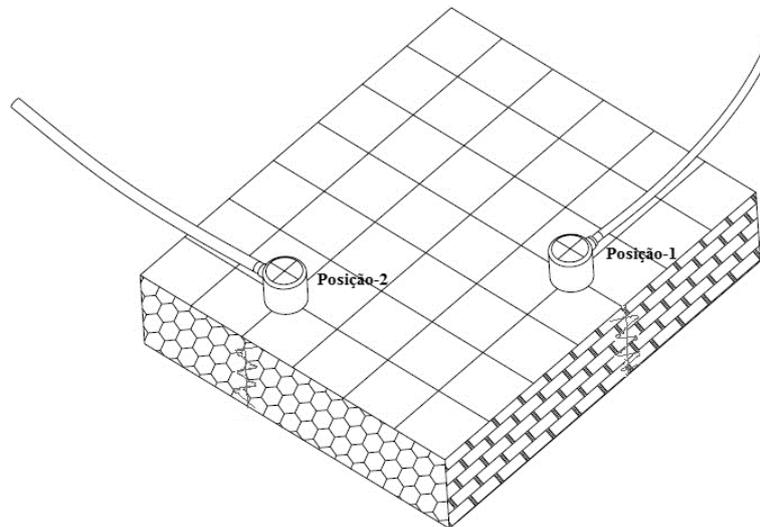


Figura 4.5 - Direção de polarização (movimento das partículas); Posição 1 - paralela à direção de laminação (longitudinal) e Posição 2 - transversal à direção de laminação.

### 4.3.3 Métodos de Captura do Sinal Ultrassônico

Segundo Fonseca (2012), no Laboratório de Ultrassom do Instituto de Engenharia Nuclear (LABUS/IEN) são usados dois métodos para capturar o sinal ultrassônico gerado por uma onda cisalhante utilizada na análise de tensões: os métodos Par-a-Par e Contínuo, os quais são descritos a seguir.

#### 4.3.3.1 Método Par-a-Par

No método Par-a-Par, o sinal ultrassônico gerado pelo transdutor posicionado com a direção de polarização da onda na direção de laminação, denominada neste trabalho de direção longitudinal ou direção de laminação é capturado pelo osciloscópio e visualizado em sua tela, em seguida é transferido para o notebook e processado pelo programa CHRONOS. Em seguida, outro sinal é capturado na direção transversal, ou seja, com o transdutor girado e posicionado a  $90^\circ$  da posição anterior de inspeção, perfeitamente acoplado e sem sair do ponto em avaliação, formando assim um par de sinais. Isso é repetido o número de vezes que for necessário até se alcançar o número de pares de sinais

determinado para o estudo. No armazenamento dos sinais ultrassônicos, o primeiro sinal que forma cada par é salvo com uma numeração de identificação ímpar e o segundo sinal é salvo com uma numeração par, de maneira sequencial (1, 2, 3, 4, ...). Para cada par de sinais ultrassônicos processados matematicamente pelo programa CHRONOS/IEN são obtidos os tempos de percurso da onda nas duas direções e, conseqüentemente, é realizado o cálculo para se determinar o valor da birrefringência acústica correspondente.

#### 4.3.3.2 Método Contínuo

Diferentemente do método anterior, o método Contínuo é iniciado mantendo o transdutor ultrassônico acoplado na peça em inspeção na direção longitudinal, de modo contínuo, ou seja, sem girar o transdutor, até capturar a quantidade de sinais ultrassônicos previamente estabelecido. A seguir, o transdutor é girado e posicionado a  $90^\circ$  no mesmo ponto anteriormente inspecionado, e é feita a captura dos sinais ultrassônicos agora na direção transversal, até atingir a mesma quantidade de sinais anteriormente capturado.

Para a determinação do método de captura do sinal foram realizados dois testes, cada um empregando um dos métodos descritos acima. Baseado nos resultados obtidos a partir desses testes foi definido qual método de captura a ser utilizado. Para a realização dos testes foi escolhido o ponto central da chapa a ser usada nesta tese, conforme é mostrado na Figura 4.6.

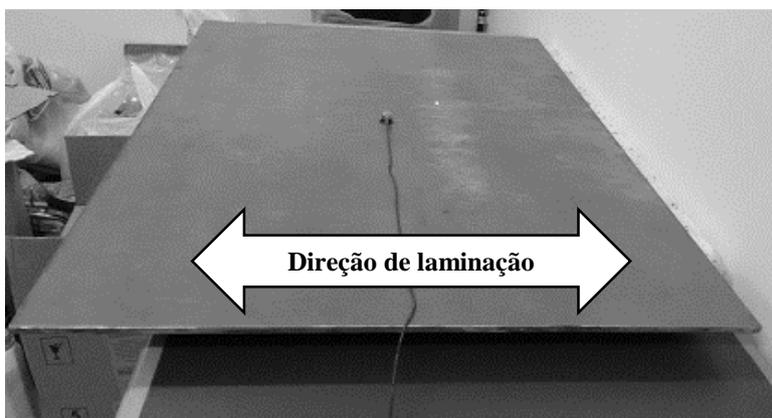


Figura 4.6 - Transdutor no ponto central da chapa como recebida para a determinação do método de captura.

#### 4.3.3.3 Teste Usando o Método de Captura Par-a-Par

No teste empregando o método de captura de sinal Par-a-Par, foram capturados 30 (trinta) pares de sinais ultrassônicos da seguinte maneira: captura de um sinal ultrassônico com o transdutor mantido na direção longitudinal (direção de laminação), em seguida, outro sinal com o transdutor girado a  $90^\circ$ , ou seja, com a direção de polarização da onda transversal a direção de laminação, formando assim um par de sinal. É importante frisar que a direção de laminação do material, inicialmente, foi determinada por birrefringência acústica na medida em que a onda cisalhante apresentou maior velocidade (menor tempo) quando a sua direção de polarização coincidiu com a orientação cristalográfica preferencial do aço utilizado neste trabalho (direção de laminação, no caso de chapas laminadas), conforme afirma Bittencourt, (2000). Nesse contexto, a direção de laminação do material como recebido é mostrada na Figura 4.6, que posteriormente, foi corroborado pela análise metalográfica.

Os sinais capturados com o método Par-a-Par foram armazenados no notebook, na pasta correspondente ao teste com a sequência de 1 a 60. Após o processamento dos sessenta sinais, foram obtidos 30 (trinta) pares de tempos, correspondentes a onda ultrassônica com sua direção de polarização nas direções longitudinal e transversal. A partir de cada par de tempo, foi calculado o valor da birrefringência acústica, com o uso da Equação 3.29. Ao final, obteve-se 30 (trinta) valores de birrefringências, a média desses valores e, por último, o desvio padrão dos valores de birrefringências.

#### 4.3.3.4 Teste Usando a Método de Captura Contínuo

No teste usando o método de captura Contínuo, foram capturados 30 (trinta) sinais ultrassônicos de forma contínua e sequencial mantendo o transdutor acoplado e posicionado com a onda polarizada na direção longitudinal e, em seguida, outros trinta sinais na direção transversal (transdutor girado a  $90^\circ$  e no mesmo ponto). Os sinais foram armazenados no notebook, nas suas subpastas correspondentes (longitudinal e transversal) a pasta principal do teste, com a sequência de 1 a 30 em cada uma das direções. Após o processamento dos sinais, foram determinados trinta tempos de percurso da onda em cada direção. Em cada conjunto dos trinta valores de tempo foi calculado também a média e o desvio padrão, obtendo-se ao final dois valores de tempos médios

em cada direção, correspondentes ao método de captura. A birrefringência acústica calculada por este método através da Equação 3.29 é única, diferentemente do método de captura Par-a-Par, que em cada par de tempo, tinha-se um valor de birrefringência.

Para ambas metodologias de captura, quando se iniciava as medições, realizava-se ajustes nos botões de controle de posicionamento e escala do osciloscópio de modo que o sinal visualizado apresentasse dois ecos dispostos no eixo do tempo (abscissa), posicionados cada um no centro de cada metade da tela, e a amplitude destes não ultrapassasse a tela na vertical (escala de tensão no eixo das ordenadas), conforme é mostrado na Figura 4.7. Durante a realização de todas as medições esse controle foi executado, além da observação permanente do ensaio, verificando-se dessa forma se ocorria alguma irregularidade no sinal, como ruído e atenuação do sinal, por exemplo, para que ajustes fossem realizados quando necessários e/ou substituição de cabos, acoplante ou até equipamentos.

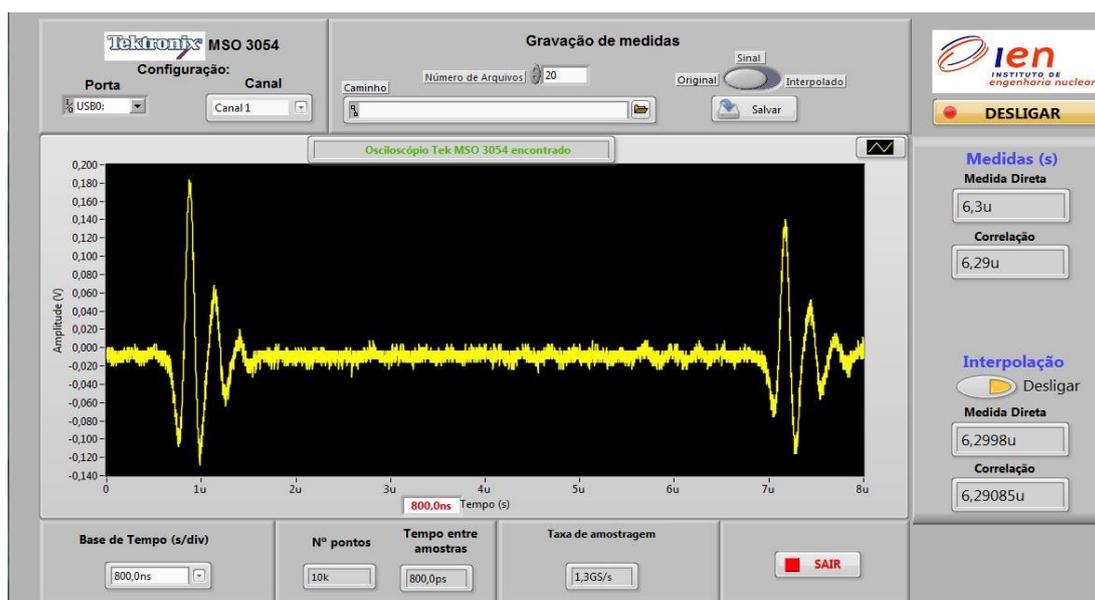


Figura 4.7 - Tela do osciloscópio mostrando o sinal ultrassônico.

#### 4.3.3.5 Determinação do Método de Captura do Sinal Ultrassônico

Com base nos resultados obtidos nos dois testes de captura do sinal ultrassônico, foi realizada uma análise estatística entre as duas metodologias, levando-se em conta os desvios padrões obtidos com os tempos de percurso da onda ultrassônica nas duas direções de polarização, longitudinal e transversal. Nessa análise estatística foi usado o

teste de hipóteses, onde a decisão final tomada para o estudo foi a de adotar a metodologia “Contínua” para a captura dos sinais ultrassônicos. A análise estatística para a escolha do método de captura do sinal se encontra no Apêndice C. Por outro lado, a análise dos tempos medidos pelos dois métodos de captura se encontram no capítulo 5, item 5.4.

#### 4.3.4 Levantamento da Birrefringência Acústica do Material como Recebido (BA0)

Conforme descrito anteriormente no item 4.2, a chapa do aço naval ASTM A131 foi usinada para obter amostras em tamanhos menores, (400 x 200 x 9,5 mm), obtendo-se um total de nove, onde em cada amostra foram marcados 36 (trinta e seis) pontos, os quais são vistos na Figura 4.8. Esses pontos foram marcados com o cuidado de deixar livre as bordas para evitar uma possível reflexão do sinal durante a captura do mesmo. Cada ponto demarcado corresponde a interseção entre as linhas A, B, C e D e os pontos de 1 a 9, como também mostrado na Figura 4.8.

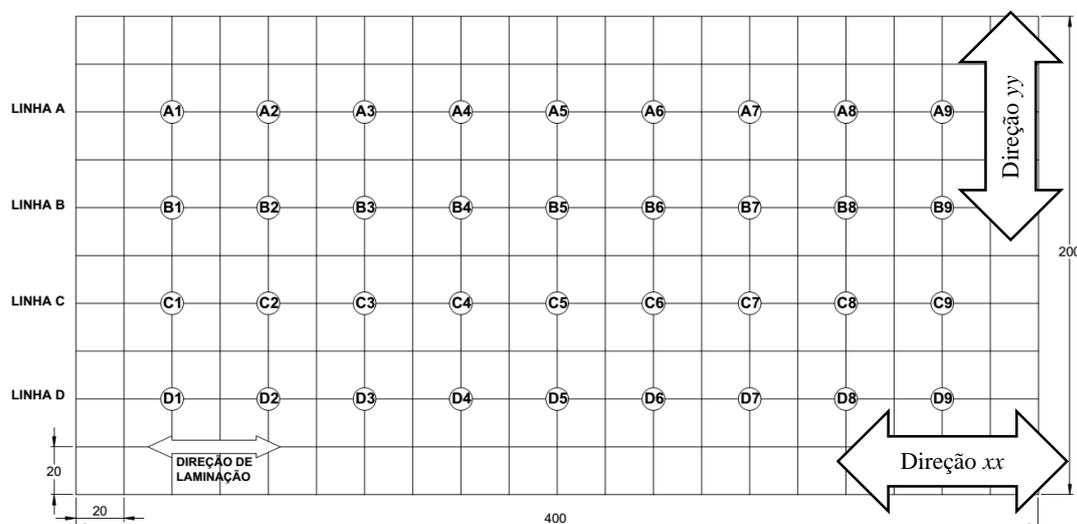


Figura 4.8 - Imagem ilustrativa de uma amostra apresentando os pontos de medição e a direção de laminação do material. Dimensões em mm.

O ensaio ultrassônico para o levantamento da birrefringência acústica do material como recebido em cada um dos trinta e seis pontos seguiu o procedimento de captura adotado, isto é, o método contínuo. Em cada amostra foram capturados 1440 sinais ultrassônicos, ou seja, em cada ponto foram capturados 40 (quarenta) sinais, 20 (vinte) na direção de laminação (longitudinal) e 20 (vinte) na direção transversal a de laminação. Esses sinais foram processados e seus respectivos tempos de percurso da onda

ultrassônica obtidos, denominados  $TL$  (tempo na direção longitudinal) e  $Tt$  (tempo na direção transversal).

Focando a determinação da birrefringência acústica do material, em cada um dos pontos foi feita a média aritmética entre os vinte tempos de percurso obtidos em cada direção. De posse da média dos tempos de percurso em cada direção analisada, foi calculada a birrefringência de cada ponto com o uso da Equação 3.29, gerando trinta e seis valores de birrefringência para cada amostra. Como foram medidos nove amostras, então os trinta e seis valores finais de birrefringências, denominados de  $BA0$ , referentes ao material como recebido foram obtidos a partir da média entre os valores pontuais de tempo determinados nas direções paralela e transversal a de laminação, de cada amostra. Por exemplo, para se determinar o tempo final de um ponto  $AI$  na direção de laminação,  $TL$ , tirou-se a média aritmética entre os tempos  $AI$  da amostra 1,  $AI$  da amostra 2, até  $AI$  da amostra 9 naquela direção. Esse procedimento foi realizado para todos os pontos medidos. A partir dos tempos médios nas duas direções,  $TL$  e  $Tt$ , foram calculados os trinta e seis valores de  $BA0$  médios, que representam a distribuição da anisotropia ao longo do material. No Apêndice  $D$ , mostram-se os valores de tempos médios obtidos nas direções longitudinal e transversal, bem como os valores de  $BA0$  de cada amostra, antes da soldagem.

É importante também ressaltar que foi realizado um estudo estatístico baseado na análise de variância nos trinta e seis valores de  $BA0$  utilizando a ferramenta estatística “Anova”, conforme apresentado no Apêndice  $D$ . Esta análise teve como objetivo qualificar o grau de variação da anisotropia no material, ou seja, verificar se o material apresentava uma distribuição homogênea ou heterogênea da anisotropia. A verificação da distribuição da anisotropia ( $BA0$ ) foi importante porque se a mesma fosse homogênea, a sua média ( $BA0Médio$ ) poderia ser utilizada para determinar as tensões residuais em qualquer ponto do metal de base (MB), com exceção da ZTA (Zona Termicamente Afetada) e ZF (Zona Fundida). Caso contrário, seria difícil devido a variação dos valores de  $BA0$ , o que muito provavelmente, implicaria em alteração dos valores de tensões residuais, pontualmente, ou seja, aumentaria o erro dos valores de tensões residuais obtidos.

#### 4.3.5 Levantamento da Constante Acustoelástica do Material como Recebido (CAE)

Para o levantamento da *CAE* do material como recebido foram usinados 3 (três) corpos de prova. A Figura 4.9 ilustra esquematicamente os mesmos e suas dimensões em mm. Os corpos de prova apresentaram uma área útil da seção transversal de  $259,54 \text{ mm}^2$ . É importante frisar que esses corpos de prova apresentam a geometria em questão porque não existe na literatura uma norma específica para a usinagem dos mesmos. Os corpos de prova foram usinados em seu comprimento na direção de laminação da chapa, conseqüentemente, tracionados uniaxialmente também nessa direção.

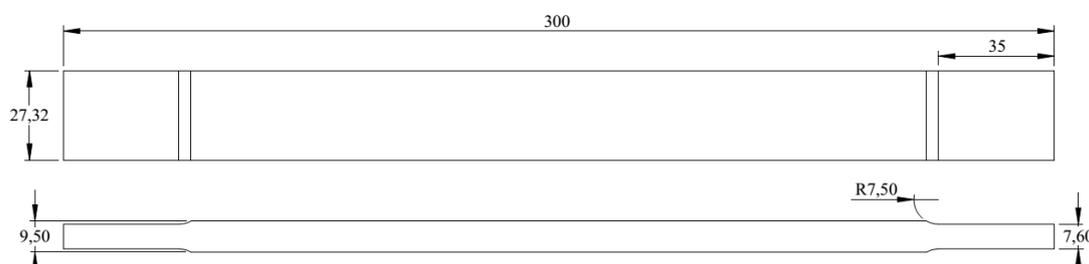


Figura 4.9 - Esquema ilustrativo dos corpos de prova e suas dimensões (mm) utilizados para obtenção da constante acustoelástica do metal de base.

A metodologia para se determinar a *CAE* consistiu, primeiro, em determinar os tensões de escoamento e de ruptura do metal de base através de um ensaio de tração, conforme visto no item 4.2.2. A partir do valor da tensão de escoamento, utilizou-se 94,55% deste, que gerou uma carga máxima baseado na área útil dos corpos de prova mostrados na Figura 4.9. A carga máxima foi fracionada e para cada um dos valores fracionados foram capturados os sinais de percurso da onda ultrassônica, ora com sua polarização na direção paralela, ora transversal ao carregamento, na medida em que o ensaio de carregamento uniaxial era realizado.

Assim, nos ensaios de carregamento uniaxial dos corpos de prova utilizados para se determinar a *CAE*, foram capturados em um ponto pré-estabelecido (ponto central mostrado na Figura 4.10), (20) vinte sinais ultrassônicos em cada direção, longitudinal e transversal, ao carregamento e em várias cargas. Os sinais capturados para cada carga pré-determinada foram convertidos em tempos médios de percurso da onda nas duas direções. A partir desses tempos,  $TL$  e  $Tt$ , foi calculado o valor da birrefringência para cada carga. Com o valor de birrefringência e com a tensão oriundas de cada carga, foi

gerado o gráfico Tensão x Birrefringência, cujo coeficiente angular da reta forneceu o valor da *CAE* do material como recebido.

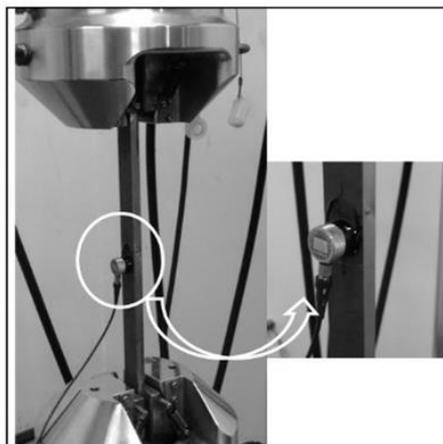


Figura 4.10 - Corpo de prova tracionado uniaxialmente para determinação da constante acustoelástica do metal de base.

#### 4.4 CONSUMÍVEIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS UTILIZADOS NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

##### 4.4.1 Consumível

##### 4.4.1.1 Arame Eletrodo/Arame Frio

O arame eletrodo energizado e não energizado (Arame frio) utilizado foi o arame da classe ER70S-6 nos diâmetros de 1,2 para o processo GMAW e 1,0 mm para o processo GMAW-CW, respectivamente. Segundo Assunção (2013), esse tipo de consumível apresenta características de elevada produção, facilidade de manutenção da estabilidade do arco e, em especial, a sua adequação experimental ao processo de soldagem com alimentação de arame frio. Além disso, trata-se de arames largamente utilizado em diversas aplicações na indústria metal-mecânica, na soldagem de aços baixo carbono e de baixo custo de aquisição.

#### 4.4.1.2 Gás de Proteção

O gás de proteção utilizado para a execução da soldagem em simples deposição do aço ASTM A131 Grau A foi a mistura 75% Ar + 25% CO<sub>2</sub> na vazão de 15 l/min. Essa mistura gasosa também foi utilizada por Assunção, (2013).

#### 4.4.2 Equipamentos

Os equipamentos que compuseram a bancada de soldagem para realizar os experimentos foram uma fonte de soldagem com o cabeçote de alimentação de arame energizado e um cabeçote auxiliar de alimentação para o arame frio; um sistema de posicionamento da tocha; uma tocha de soldagem; uma mesa de soldagem; um sistema de gás de proteção; um sistema de monitoramento e aquisição dos dados instantâneos de corrente, tensão, tempo de soldagem e vazão de gás. Os quais são descritos a seguir.

##### 4.4.2.1 Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem empregada foi a multiprocessos. Os dados técnicos referentes à fonte são os seguintes:

- Tipo: Fonte eletrônica transistorizada
- Modelo: DIGIPlus A7
- Fabricante: IMC/LABSOLDA – UFSC
- Corrente Nominal: 600 A
- Tensão de alimentação: 200, 380 ou 440 V, trifásico
- Tensão em vazio: 64 V
- Potência máxima consumida: 12 kW
- Fator de potência: 0,94

##### 4.4.2.2 Sistema de Alimentação de Arame Energizado e Arame Frio

O sistema de alimentação de arame energizado/eletrodo foi composto por um cabeçote de alimentação e cabos guia, modelo STA20-2, fabricante

IMC/LABSOLDA/UFSC. Este cabeçote foi acoplado a fonte de soldagem, que possuía roletes tracionadores, que permitia alimentar o arame-eletrodo até o arco voltaico. Esse sistema de alimentação apresentava velocidade de avanço de 1,0 a 20,0 m/min, parametrizada na fonte de soldagem.

Em relação ao sistema auxiliar de alimentação de arame frio, o mesmo era composto por um cabeçote auxiliar de alimentação de arame e cabos guia, com a finalidade de auxiliar a alimentação de arame frio até o arco voltaico. O cabeçote de alimentação foi o de modelo STA20-2 da fabricante IMC, que possuía alimentação elétrica (VCA - 50/60 Hz) e suportava arame de 0,60 a 1,60 mm de diâmetros.

#### 4.4.2.3 Tocha de Soldagem

A tocha de soldagem utilizada foi a de modelo MB 501 D da Binzel com capacidade de corrente de 500 A e refrigerada a água. Essa tocha, inicialmente foi utilizada para a soldagem GMAW, posteriormente, foi adaptada para o processo GMAW-CW. A Figura 4.11 mostra o bico da tocha do processo GMAW, o bico para arame frio, o sentido de soldagem, além das restrições impostas às amostras.

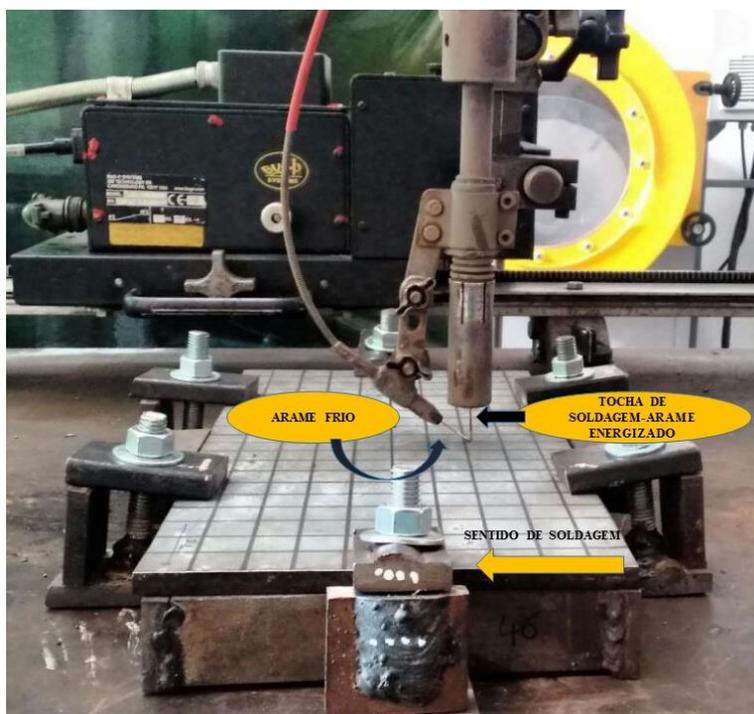


Figura 4.11 - Tocha de soldagem adaptada para soldagem com o arame frio.

#### 4.4.2.4 Sistema de Posicionamento e Deslocamento Semi-Automático da Tocha de Soldagem

As soldas foram realizadas utilizando um sistema de posicionamento e deslocamento semi-automático da tocha de soldagem, cujo fabricante e modelo são SPS (Sistema e processamento de soldagem) e Tartílope VI (Bug-o), respectivamente, com faixa de velocidade de deslocamento de 5 a 160 cm/min (velocidade de soldagem) e resolução 0,2 cm/min. O sistema de posicionamento e deslocamento da tocha é mostrado na Figura 4.12.

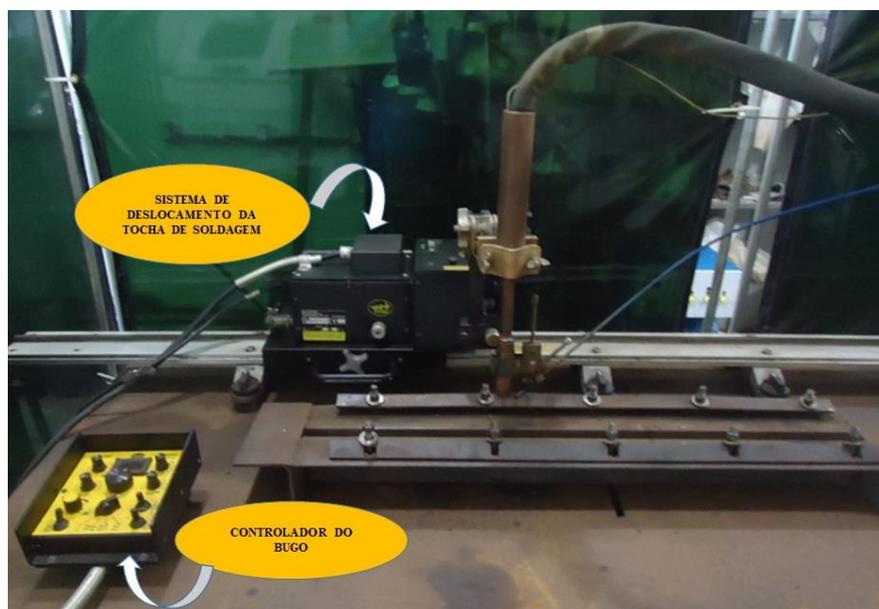


Figura 4.12 - Sistema de posicionamento e deslocamento da tocha.

#### 4.4.2.5 Sistema de Captura de Sinais de Soldagem

Com o objetivo de se ter uma confiabilidade nos resultados de tensão, corrente, fluxo de gás e tempo de soldagem foi utilizado um sistema de captura de sinais, o qual era composto por um microcomputador contendo uma placa de captura de sinais fabricada pela IMC/LABSOLDA - UFSC como modelo INTERDATA e frequência de captura de 10 kHz por canal e software SAP-V4, programa utilizado para aquisição de parâmetros instantâneos e contínuos durante o período em que se realizou a soldagem.

#### 4.4.3 Metodologia de Soldagem das Amostras

##### 4.4.3.1 Obtenção dos Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros de soldagem adotados neste trabalho foram baseados no trabalho de Assunção (2013). Nesse sentido, o tamanho da DBCP (distância do bico de contato a peça) foi de 22 mm, tensão de 38 V, velocidades de soldagem de 40 cm/min, vazão de gás de 15 l/min e velocidade de alimentação de 15 m/min para o processo GMAW. Para o processo GMAW-CW, a velocidade de alimentação do arame energizado se manteve em 15 m/min, enquanto a velocidade do arame frio foi variada em percentuais de 20% e 40 % da velocidade do arame energizado, que equivalem a 3 m/min e 6 m/min, respectivamente. Na Figura 4.13, apresenta-se o fluxograma dos parâmetros utilizados nos processos de soldagem, além da quantidade de amostras utilizada em cada procedimento de soldagem.

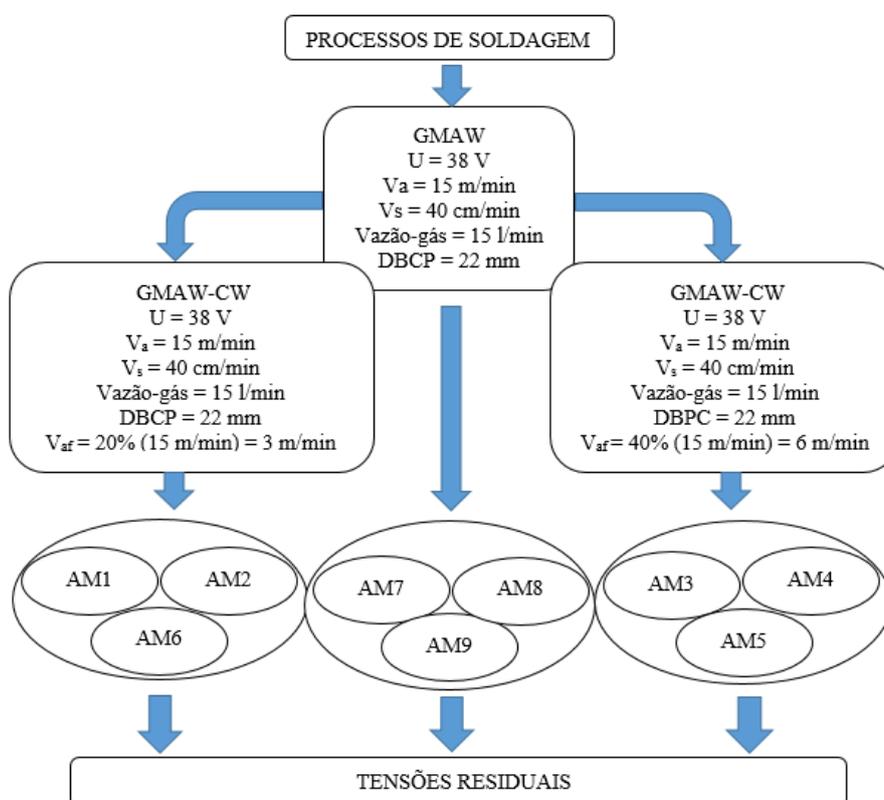


Figura 4.13 - Fluxograma dos processos de soldagem.

**Legenda:**  $V_a$ : Velocidade do arame energizado;  $V_s$ : Velocidade de soldagem;  
 $V_{af}$ : Velocidade do arame frio; AM: Amostra.

#### 4.4.3.2 Descrição dos Procedimentos de soldagem

A operação de soldagem foi realizada na posição plana em simples deposição, com a tocha fixa com ângulo de  $0^{\circ}$  e deslocamento horizontal para o processo GMAW. Para a soldagem GMAW-CW, a mesma ocorreu também na mesma direção do processo anterior, ou seja, na direção do injetor do arame frio, o que proporcionou a entrada deste arame sempre à frente do arco elétrico e da poça de fusão, conforme mostra a Figura 4.14. O deslocamento da tocha foi realizado de forma automática e em corrente contínua com polaridade positiva (CC+). O ângulo entre a tocha e o injetor auxiliar de arame frio no processo GMAW-CW foi  $55^{\circ}$ , ângulo de trabalho e o ângulo de ataque foi de  $90^{\circ}$ , estes medidos em relação à mesa de soldagem. A Figura 4.14 também mostra todos os ângulos descritos neste item.

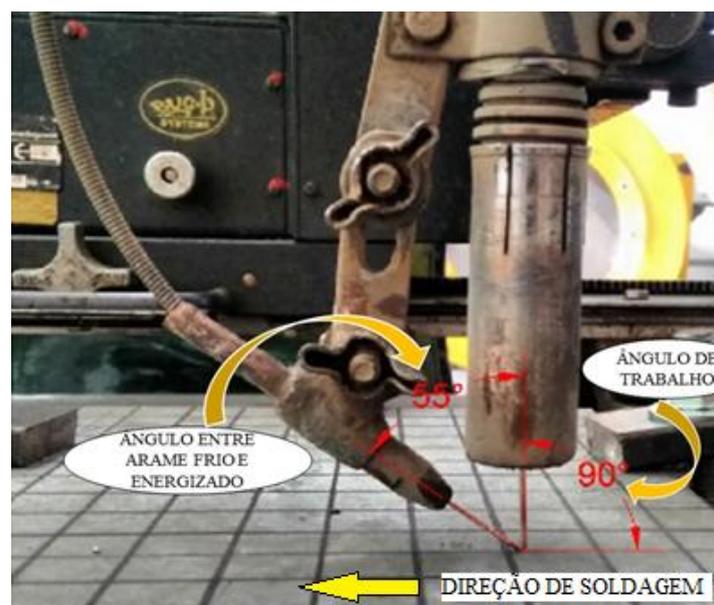


Figura 4.14 - Ângulo de soldagem do arame frio e ângulo de trabalho.

As amostras foram soldadas com restrições, conforme mostram as Figuras 4.11 e 4.15. Estas restrições foram mantidas durante a medição de tensões residuais. Para Oliveira *et al.*, (2010), a restrição das amostras garante uma maior aproximação da condição real de soldagem em campo, onde a junta faz parte de uma estrutura maior e pesada, que promove um alto grau de restrição à solda.

Então, após a soldagem foram medidos os valores de birrefringência acústica (BA's), nos pontos pré-estabelecidos no metal de base antes da soldagem, que serão

utilizados para a determinação das tensões residuais por BA. Também foram medidos os níveis de tensões residuais por DRX no metal de base, na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF). Além disso, foram realizadas análises química, macroestrutural e microestrutural das juntas soldadas.

## 4.5 ANÁLISES DAS JUNTAS SOLDADAS

### 4.5.1 Análise Química das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)

As análises químicas das juntas foram realizadas somente no cordão, sendo que os procedimentos utilizados para realizar essas análises foram semelhantes aos usados no metal de base como recebido, conforme descritos no item 4.2.1. Sendo que após a soldagem e, conseqüentemente, às medições por BA e DRX, de uma amostra de cada procedimento de soldagem, foi retirada uma amostra da região central da junta. Cada amostra passou pelo processo de desbaste de uma pequena parte superior do cordão, para posteriormente serem realizadas as análises químicas e cujos os resultados foram comparados com os dados do arame fornecido pelo fabricante, antes da soldagem.

### 4.5.2 Análise Macroestrutural das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)

Para realizar a análise macroestrutural das juntas soldadas, ou seja, verificar as regiões do metal de base, zona termicamente afeta e zona fundida, também foi retirada uma amostra da região central da junta de um corpo de prova de cada processo. Nas análises macroscópicas, cada amostra foi embutida e lixada, utilizando-se lixas com granulometria entre 180 e 800 *mesh*) e atacada quimicamente com nital 6% durante 10 segundos para revelação da geometria da junta.

#### 4.5.3 Análise Microestrutural das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)

Para a determinação e análises das microestruturas presentes nas juntas soldadas, amostras de cada processo também passaram pelo processo de embutimento e lixamento, no qual foram utilizadas lixas com granulometrias que variaram na faixa de 180 a 2000 *mesh*. Em seguida foi realizado o polimento em disco de feltro com abrasivo de alumina em politriz para eliminação de qualquer defeito superficial. Após estas operações, realizou-se a análise micrográfica em microscopia ótica (M.O), em que as amostras foram submetidas ao ataque com reagente nital 2%, o procedimento foi por imersão durante 6 segundos e, utilizando-se o microscópio óptico da Zeiss de modelo Axio Scope.A1 foi possível verificar os contornos de grão e as fases presentes nas regiões da zona termicamente afetada e zona fundida. A análise micrográfica do metal de base se manteve semelhante aos resultados antes da soldagem, ou seja, apresentando ilhas de perlita e ferrita, por este motivo, a mesma não foi analisada neste item.

#### 4.5.4 Metodologias Utilizadas na Medição da Birrefringência Acústica no Metal de Base Após a Soldagem

Para a determinação das tensões residuais no MB por birrefringência acústica após a soldagem, a medição do sinal ultrassônico e seu processamento foram realizados de forma semelhante aos utilizados na determinação de BA0, descritos no item 4.3.4.

Em cada ponto medido foram capturados quarenta sinais ultrassônicos, vinte em cada direção, longitudinal e transversal. Depois de processados esses sinais, obteve-se o tempo médio em cada direção,  $TL$  e  $Tt$ , e com o uso da Equação 3.30, o valor de birrefringência do metal de base, denominados de BA's, das três amostras referentes a cada procedimento de soldagem. O Apêndice F apresenta os dados de tempo do metal de base após a soldagem, além dos valores de BA's. A Figura 4.15 apresenta as linhas e os pontos medidos por BA, com exceção da ZTA e ZF, devido a variações microestruturais das duas regiões e também devido a geometria da ZF que não acoplou o transdutor adequadamente, implicando em resultados não confiáveis. Os pontos medidos por BA são representados pelos círculos maiores.

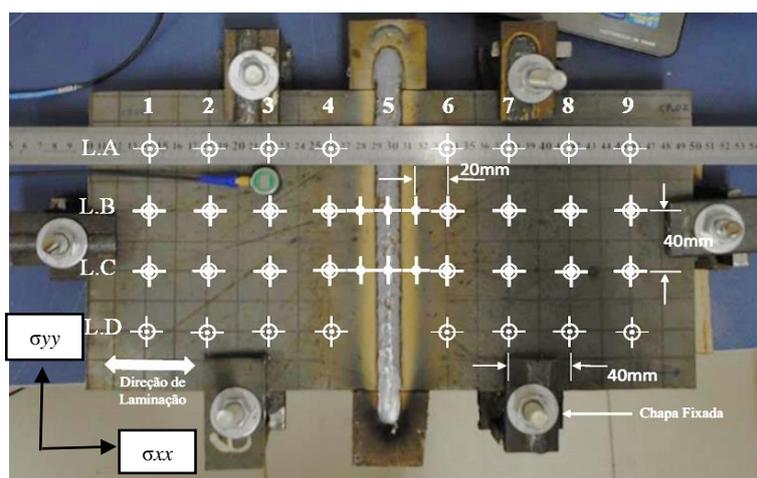


Figura 4.15 - Amostra indicando os pontos de medição de tensões residuais por BA e DRX após a soldagem.

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO METAL DE BASE PELA TÉCNICA DE BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA

A partir dos resultados de birrefringências do metal de base antes e após a soldagem,  $BA_0$  e  $BA's$ , respectivamente, e do valor de  $CAE$  também do metal de base, calculou-se a diferença de tensões residuais ( $\sigma_L - \sigma_T$ ) ou ( $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ ) em cada ponto. É relevante frisar que os resultados de tensões residuais referentes a cada procedimento de soldagem obtidos por birrefringência são as médias aritméticas das tensões entre as três réplicas utilizadas em cada processo. Os níveis de tensões residuais calculados por birrefringência foram obtidos com o uso da equação 3.33.

#### 4.7 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA UTILIZADOS NA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Na medição de tensões residuais por DRX foi utilizado o goniômetro XSTRESS 3000 da Stresstech através do método  $sen^2\psi$  modificado, no qual foram realizadas medidas com  $\psi$  variando entre  $\pm 21^\circ$ , com incremento de  $7^\circ$ . Essa faixa de variação de  $\psi$  foi adotada devido a limitação de espaço existente nas amostras. Pois, se  $\psi$  fosse maior do que  $\pm 21^\circ$ , ocorreria o contato entre o arco dos detectores e os parafusos que restringiram as amostras, conforme mostra a Figura 4.16. O material utilizado neste trabalho possui uma estrutura ferrítica, neste caso, a análise foi realizada nos planos (211),

utilizando um feixe monocromático com comprimento de onda  $\lambda$  obtido através de um tubo de raio X empregando radiação  $\text{CrK}\alpha$ .

Para os cálculos que determinaram os valores das tensões residuais, foram utilizados valores para o módulo de *Young* de 211 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3, tensão e a corrente utilizadas foram de 25 kV e 6 mA, respectivamente, além de um erro de tensões residuais de 3,5 MPa obtido durante a calibração do difratômetro de raio X, conforme apresentado no Apêndice B. A limpeza dos pontos de medição foi realizada de forma eletrolítica durante um tempo de 10 min., nesta limpeza, utilizou-se um reagente comercial adicionado de 10 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  por litro. Os pontos medidos por difração de raio X foram os pontos representados pelos círculos fechados localizados nas duas linhas centrais, *B* e *C*, das juntas, conforme mostra a Figura 4.15. As tensões residuais foram medidas nas direções paralela e transversal ao cordão de solda, denominadas  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$ , respectivamente. Sendo que o resultado final de tensões medido em cada ponto na direção paralela,  $\sigma_{xx}$ , correspondeu apenas a uma única medição e de uma única amostra de cada procedimento de soldagem. Já o resultado final de tensões medido em cada ponto na direção transversal,  $\sigma_{yy}$ , correspondeu a média aritmética entre as três réplicas. A área de atuação medida por difração foi de  $7 \text{ mm}^2$  em cada ponto devido ao diâmetro do feixe de raio X (3 mm). A precisão das medições de tensões residuais foi de 20 MPa (LU, 1996).

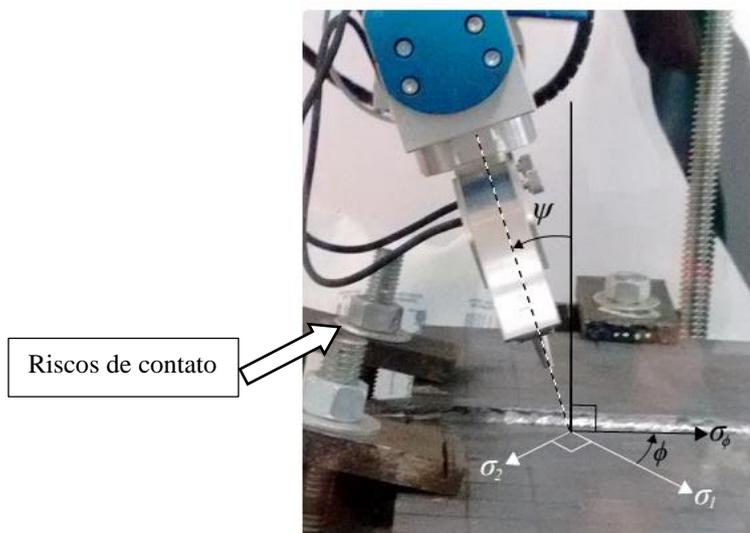


Figura 4.16 - Risco de contato entre o arco-detectores e as restrições das amostras soldadas.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos das análises químicas, mecânicas e microestrutural do metal de base (MB), em seguida, mostram-se os resultados das análises químicas, macro e microestrutural das soldas GMAW e GMAW-CW. Posteriormente a esses resultados, mostram-se os resultados referentes a escolha do tipo do método de captura do sinal da onda ultrassônica; a birrefringência acústica do material como recebido (BA0); a constante acustoelástica desse material (CAE). Por último, mostram-se os resultados das tensões residuais das soldas GMAW e GMAW-CW determinados por birrefringência acústica e difração de raio X.

#### 5.2 RESULTADOS DO METAL DE BASE

##### 5.2.1 Análise Química

A composição química do metal de base é apresentada na Tabela 5.1. Os valores obtidos, ou seja, as concentrações em peso percentual dos elementos presentes foram comparadas com as concentrações de vários aços, conforme a norma ASTM A131/A131M-14, também mostrados na Tabela 5.1. Os resultados referentes as análises químicas do MB mostraram que o material em estudo se assemelha aos aços ASTM A-131 de Grau AH32, DH32, EH32, FH32. O percentual de Manganês, o qual foi de 1,23%, justifica-se na medida em que o mesmo possa proporcionar maior resistência mecânica ao material, haja vista que, o aço ASTM A-131 é utilizado como aço estrutural na indústria naval.

Tabela 5.1 - Análise química do aço ASTM A-131.

Material	Elementos em peso (%)								
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Metal de base Aço ASTM A-131	0,22	<b>1,23</b>	0,24	0,022	<0,001	0,015	0,014	<0,001	0,012
Aço ASTM Grau AH32, DH32, EH32, FH32	0,18	0,9–1,6	0,1-0,5	0,035	0,015	0,4	0,2	0,08	0,35

Fonte: Autor, (2017); ASTM, (2014).

## 5.2.2 Análise de Resistência Mecânica

Os resultados de tensão de escoamento e de ruptura, além do alongamento encontrados à temperatura de 22 °C, aplicando-se uma carga axial uniforme ao longo de uma área útil 95,00 mm<sup>2</sup> por amostra estão organizados nas Tabelas 5.2. Os valores de referências para o metal de base de acordo com a norma ASTM A131/A131M-14 são: Tensão de Escoamento, mínimo de 315 MPa; Tensão de Resistência à Tração de 440 a 590 MPa e alongamento ( $\epsilon$ ) igual a 19% para corpo de prova de 200 mm de comprimento, também mostrados na Tabela 5.2. Os resultados das tensões de escoamento e de resistência à tração, assim como, o resultado do alongamento encontrados para o material em estudo corroboram com os resultados dos aços da classe AH32, DH32, EH32, FH32.

Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A131.

AMOSTRA	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	ALONGAMENTO (%) <sup>A</sup>
<b>1</b>	335,32	520,66	18,44
<b>2</b>	326,62	508,57	19,41
<b>3</b>	364,83	533,42	20,44
<b>MÉDIA</b>	<b>342,26</b>	<b>520,88</b>	<b>19,43</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>20,03</b>	<b>12,42</b>	<b>1,00</b>
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO</b>	<b>5,82%</b>	<b>2,38%</b>	<b>5,15%</b>
<b>Norma ASTM A131/A131M - 14.</b>	<b>315</b>	<b>440 - 590</b>	<b>19</b>

Fonte: Autor, (2017); ASTM, (14).

<sup>A</sup>Para espessura ou diâmetro abaixo de 8 mm

## 5.2.3 Análise Microestrutural

As Figuras 5.1 e 5.2 são respostas das análises microestruturais do MB referentes às Faces X e Y da Figura 4.3, conforme explicado no item 4.2.3. Por estas figuras se

observa a presença das microestruturas perlita (em coloração mais escura) e ferrita (em coloração mais clara), que são características do aço e se apresentaram semelhantes as imagens observadas em *Metals Handbook*, (1985). Na Figura 5.1, observa-se que os grãos apresentam uma orientação preferencial contínua e organizada, direção de laminação por exemplo, característica de material laminado. Direção de laminação esta que foi comprovada pela análise por ultrassom, na medida em que a velocidade da onda nessa direção do material foi maior em comparação com a velocidade na direção transversal a esta. A Figura 5.2 que mostra a imagem na direção transversal apresenta uma leve desordem na constituição e organização dos grãos. Esses resultados foram semelhantes aos encontrados por Souza (2014).

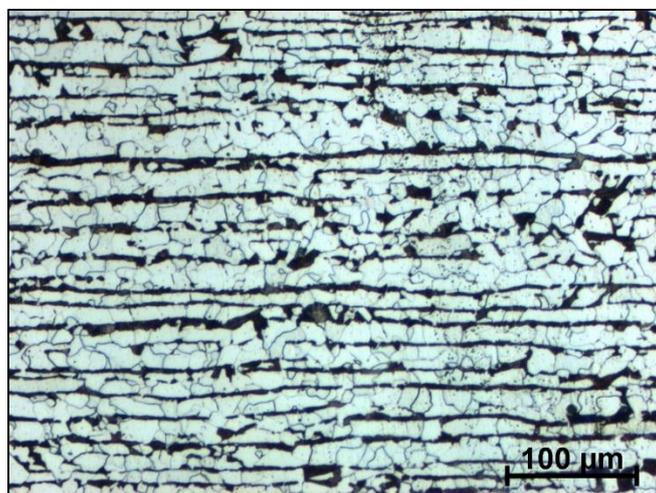


Figura 5.1 - Micrografia do metal de base, ASTM A-131, apresentando grãos de Ferrita identificados pela coloração clara e ilhas de Perlita em cor escura com aumento de 200x (duzentas vezes), face - X.

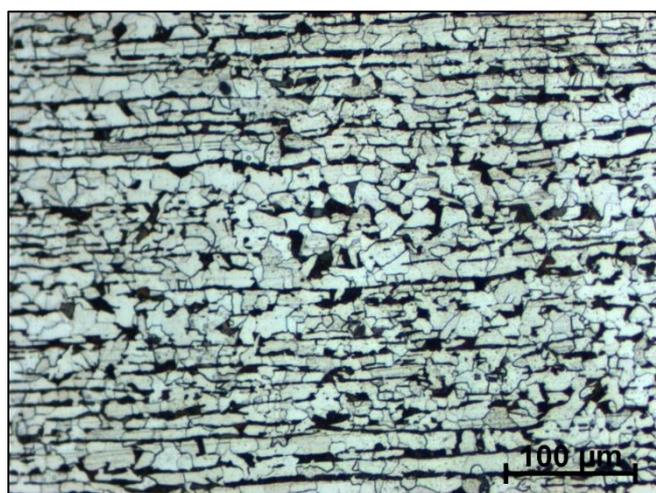


Figura 5.2 - Micrografia do metal de base, ASTM A-131, apresentando grãos de Ferrita identificados pela coloração clara e ilhas de Perlita em cor escura com aumento de 200x (duzentas vezes), face - Y.

### 5.3 RESULTADOS APÓS A SOLDAGEM

#### 5.3.1 Análise Química das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)

A Tabela 5.3 apresenta a composição química do consumível ER70S-6 antes da soldagem, conforme classificação da norma AWS 5.18. (AWS, 2001). Além disso, mostra também a composição química desse consumível após a soldagem, ou seja, somente a composição do cordão de solda (ZF) para as condições GMAW, GMAW(20%) e GMAW(40%) de soldagem empregadas. Essas análises foram realizadas por espectrômetro de emissão ótica.

Tabela 5.3 - Composição química do arame ER70S-6 pré e pós soldagem (ZF).

Classe	Tipo	Elementos (Peso %)										
		C	Si	Mn	S	P	Cu*	Ni	Cr	Mo	V	
AWS A 5.18	ER70S-6	Min.	0,06	0,8	1,4	-	-	-	-	-	-	-
		Max.	0,15	1,15	1,85	0,04	0,03	0,5*	0,15	0,15	0,15	0,03
	GMAW		0,09	0,48	1,26	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00
	GMAW-CW(20%)		0,08	0,53	1,28	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00
	GMAW-CW(40%)		0,08	0,55	1,28	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00

Fonte: Autor (2017); AWS, (2001).

\*O limite máximo de cobre inclui o residual existente no aço, mais o revestimento.

Com base nos resultados de composição química encontrados na zona fundida, observa-se que o valor de carbono se comportou de forma semelhante para os três procedimentos de soldagem. Além disso, esses valores estavam dentro dos limites estabelecidos pela norma em questão. Por outro lado, os percentuais de silício e de manganês foram menores do que o mínimo estabelecido pela norma. Esses valores podem ser justificados baseados em vários fatores que ocorrem durante os procedimentos de soldagem, entre os principais, pode-se mencionar a diluição e sublimação. Em relação a diluição, como ocorre a mistura do metal de base com o fundido, há uma transferência de elementos químicos metal de base para o de solda e vice-versa, gerando maior ou menor concentração de certos elementos nas duas regiões. Já em relação a sublimação, ocorre a perda de elementos para a atmosfera na forma vapor devido a elevada temperatura gerada pelo processo de soldagem.

### 5.3.2 Análise Macroestrutural ou Geométrica das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)

A Tabela 5.4 mostra os valores das análises geométricas obtidas nas juntas soldadas referentes aos processos GMAW e GMAW-CW. Entre os resultados estão: largura, reforço, relação entre reforço e largura, penetração e diluição.

Tabela 5.4 - Dados da Análise Geométrica.

PARÂMETROS	PROCESSOS DE SOLDAGEM		
	GMAW	GMAW-CW (20%)	GMAW-CW (40%)
Largura (mm)	15,29	16,29	16,55
Reforço (mm)	3,62	4,25	4,18
Reforço / Largura (%)	23,71	26,08	25,25
Penetração (mm)	7,9	5,58	4,13
Espessura – Penetração (mm)	2,17	4,54	6,07
Área Reforço (mm <sup>2</sup> )	39,03	47,55	47,24
Área Penetração (mm <sup>2</sup> )	47,88	37,29	32,13
Diluição (%)	55,06	43,92	40,50
Área da ZTA (mm <sup>2</sup> )	72,77	52,70	48,62
Ângulo de Molhabilidade	47,70°	51,00°	50,33°

Fonte: Autor, (2017).

As macrografias referentes aos dados de geometria das juntas soldadas mostradas na Tabela 5.4 são apresentadas na Figura 5.3. Esta figura mostra o perfil da seção transversal da região central de uma amostra referente a cada condição de soldagem.

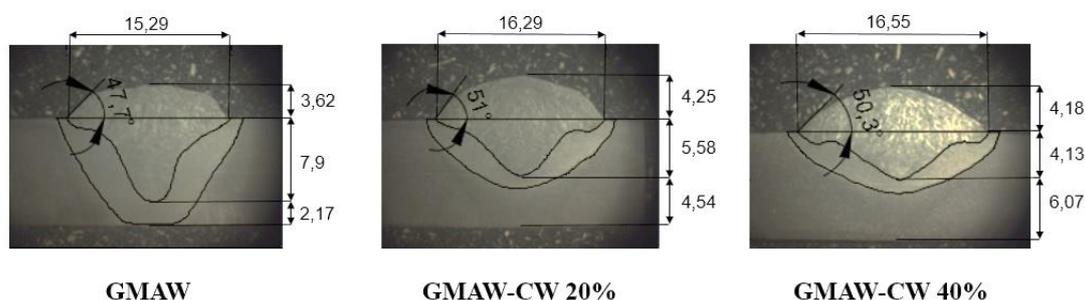


Figura 5.3 - Macrografias dos processos de soldagem GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%). Dimensões em mm.

Observa-se pelos resultados da Tabela 5.4 e confirmado pelas imagens macrográficas das juntas, que a soldagem GMAW apresentou penetração, diluição e área da ZTA, por exemplo, conforme o esperado, ou seja, maiores que os processos GMAW-

CW(20%) e GMAW-CW(40%). Ao se analisar as soldas realizadas pelo processo GMAW-CW(40%), observou-se que estas apresentaram o tamanho do reforço, o ângulo de molhabilidade e a penetração da solda foram menores em relação aos de 20%. Segundo Assunção, (2013), uma justificativa para que isso tenha ocorrido, foi deposição de mais massa no processo, o que retirou mais energia térmica do sistema arco/poça de fusão diminuindo a penetração e, talvez, gerando menor diluição. Além disso, Ribeiro *et al.* (2017) afirmam que para a adição de 40% em massa de arame frio, a posição onde o arame frio funde muda intermitentemente, entre o arco e a poça de fusão. Acredita-se que, quando o arame frio funde na poça de fusão, este arame impede que o material fundido do arame energizado impacte diretamente na poça de fusão, reduzindo-se a penetração total do cordão. Essa afirmativa é corroborada pela macrografia das soldas, mostradas na Figura 5.3, onde se observa que o *finger* para a soldagem com 40% de arame frio adicionado foi menor em relação aos outros procedimentos de soldagem.

### 5.3.3 Análise Microestrutural das Soldas GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%)

Em solda, de um só passe, a microestrutura da zona fundida será formada pelos produtos da decomposição da austenita em ferrita durante o ciclo de resfriamento contínuo, sendo que a ferrita assume diferentes morfologias, algumas de grande semelhança, por este motivo, nem sempre é de fácil identificação, a qual é ainda mais dificultada pela grande diferença de aparência destes constituintes em relação aos do metal base, com os quais os técnicos estão, em geral, mais habituados (MODENESI, 2004). Estas dificuldades causaram, há algumas décadas, a proliferação de terminologias diferentes e conflitantes para descrever a microestrutura do metal de solda. Há cerca de 20 anos, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) desenvolveu um sistema de classificação para os constituintes do metal de solda, baseado na sua observação com o microscópio ótico, que se tornou o mais aceito atualmente. Segundo este sistema, os constituintes mais comuns da zona fundida podem ser classificados como Ferrita de contorno de grão - PF(G); Ferrita poligonal intragranular - PF(I); Ferrita com segunda fase alinhada - FS(A); Ferrita com segunda fase não alinhada - FS(NA); Ferrita acicular - FA; Agregado ferrita-carbeto - FC; Martensita - M (MODENESI, 2004).

Nesse contexto, o principal objetivo da microscopia ótica foi identificar e avaliar, de maneira qualitativa, os microconstituintes formadores do metal de solda para os procedimentos de soldagem utilizados. Na Figura 5.4 é apresentada uma amostra indicando as três regiões de onde, geralmente, as imagens são retiradas. Neste item são mostradas somente imagens da ZTA e ZF, visto que a microestrutura do metal de base se comportou de forma semelhante à da antes da soldagem, ou seja, com ilhas de ferrita e perlita, porém mais refinadas. Este refinamento, provavelmente, pode ter influenciado nas propriedades mecânicas e no nível de tensões residuais presentes na junta, porém como não era o foco do trabalho, não se realizou um estudo mais criterioso sobre o assunto.

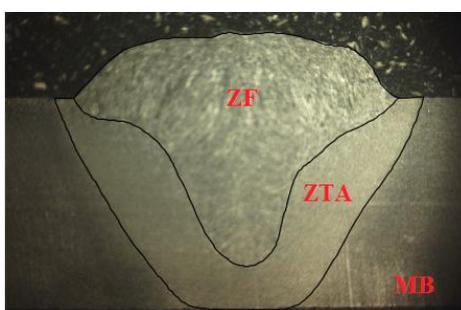


Figura 5.4 - Macrografia que identifica as regiões onde foram realizadas as análises micrográficas, metal de base (MB); zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). Ataque nital 2%.

Assim, as Figuras de 5.5 a 5.7 apresentam as microestruturas da ZTA e ZF para as juntas soldadas pelos três procedimentos de soldagem, GMAW, GMAW-CW(20%) e GMAW-CW(40%), respectivamente.

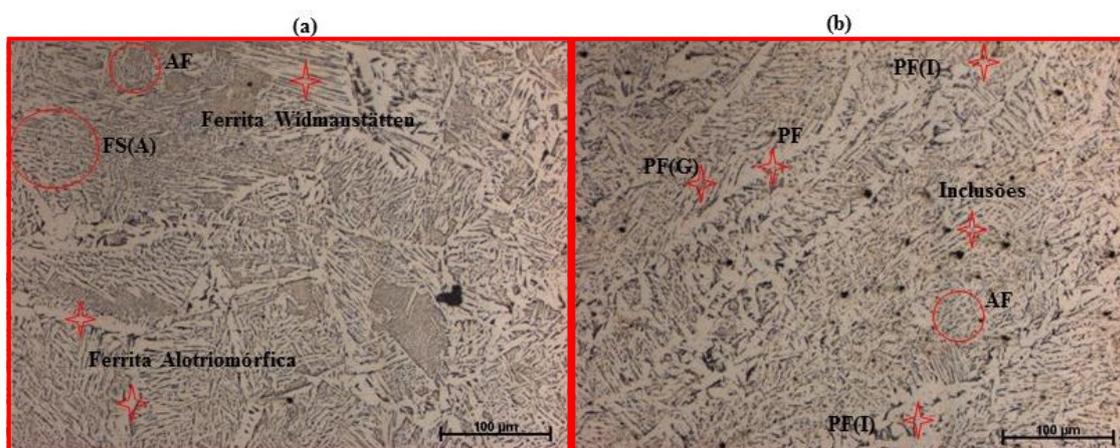


Figura 5.5 - (a) Micrografia da ZTA e (b) micrografia ZF de uma amostra GMAW, indicando a presença de Ferrita Acicular-(AF); Ferrita com Segunda Fase Alinhada-FS(A); Ferrita Alotriomórfica; Ferrita Windmastatten; Ferrita de Contorno de Grão-PF(G); Ferrita Poligonal Intragranular-PF(I); Ferrita Primária-FP e Inclusões, respectivamente. Aumento de 200X em M.O. Ataque nital 2%.

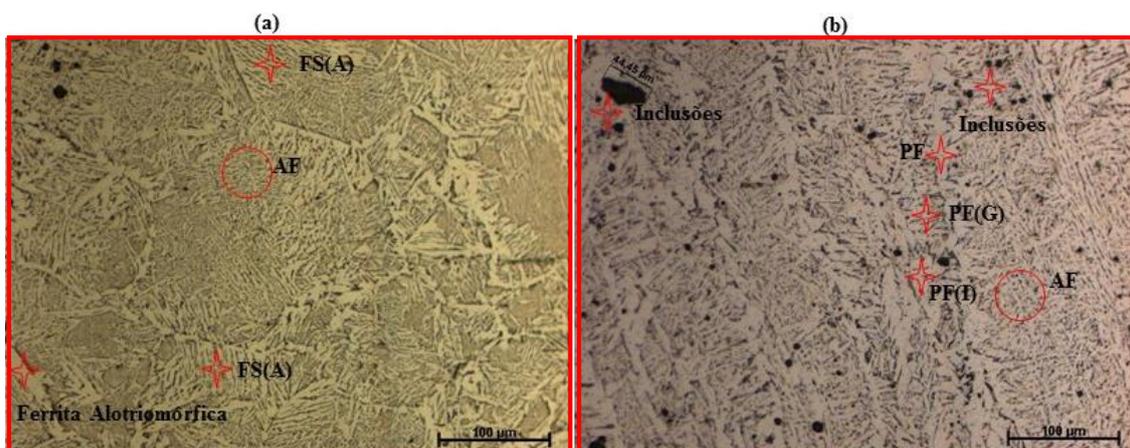


Figura 5.6 - (a) Micrografia da ZTA e (b) micrografia ZF de uma amostra GMAW-CW(20%), indicando a presença de Ferrita Acicular-(AF); Ferrita com Segunda Fase Alinhada- FS(A); Ferrita Alotriomórfica; Ferrita de Contorno de Grão-PF(G); Ferrita Poligonal Intragranular-PF(I); Ferrita Primária-FP e Inclusões, respectivamente. Aumento de 200X em M.O. Ataque nital 2%.

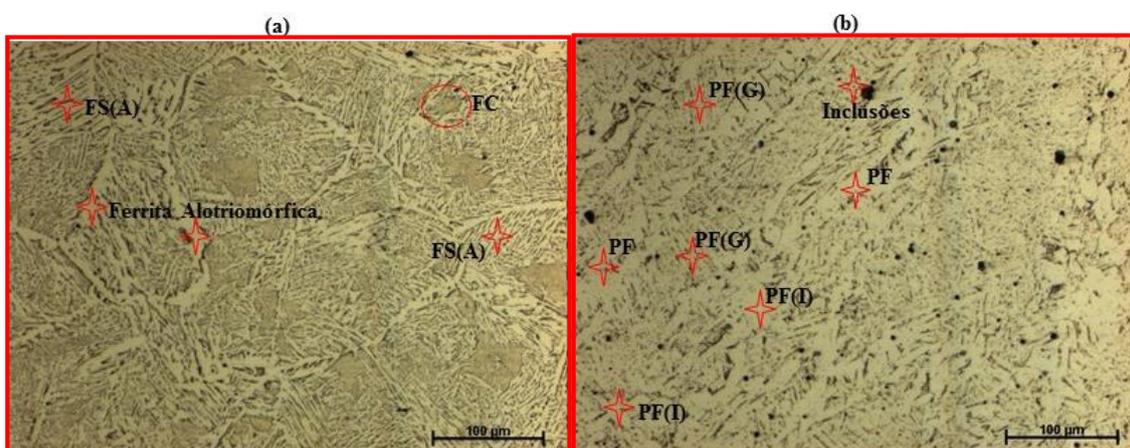


Figura 5.7 - (a) Micrografia da ZTA e (b) micrografia ZF de uma amostra GMAW-CW(40%), indicando a presença de Ferrita com Segunda Fase Alinhada-FS(A); Ferrita Alotriomórfica; Agregado Ferrita-Carbeto-FC; Ferrita de Contorno de Grão-PF(G); Ferrita Poligonal Intragranular-PF(I); Ferrita Primária-FP e Inclusões, respectivamente. Aumento de 200X em M.O. Ataque nital 2%.

Analisando a Figura 5.5, observa-se que na região da ZTA, porém, sem maior aprofundamento em sua análise, surgiram microconstituintes como ferrita acicular-AF, ferrita com segunda fase alinhada - FS(A), ferrita alotriomórfica e ferrita Windmasntatten.

A outra região analisada foi a zona fundida (ZF) ou metal de solda, que basicamente é a região onde ocorre as reações microestruturais mais importantes, haja vista que este metal se constitui em um material novo produzido pela mistura dos metais do arame (ou dos arames, no caso do GMAW-CW) diluindo o metal de base. Devido à presença de elementos químicos diversos e os seus respectivos percentuais e, também dependendo das taxas de resfriamento do metal fundido, as estruturas tendem a gerar mecanismos de formação da ferrita em modos complexos e diversificados

morfologicamente, proporcionando microestruturas favoráveis às propriedades mecânicas do material (COLPAERT, 2008). Portanto, para os procedimentos de soldagem em questão, na ZF, surgiram microconstituintes como ferrita intergranular - PF(I), ferrita primária - PF, ferrita de contorno de grão - PF(G) e algumas inclusões.

Para os procedimentos de soldagem GMAW com 20% e 40% de adição de arame frio, as Figuras 5.6 e 5.7 apresentam para a região da ZTA microconstituintes como ferrita acicular-AF, ferrita com segunda fase alinhada - FS(A), ferrita alotriomórfica, estes microconstituintes são semelhantes aos verificados na mesma região da solda GMAW. Em relação à ZF, os microconstituintes observados também foram semelhantes aos encontrados na solda GMAW.

Portanto, de maneira geral, as micrografias encontradas para as condições e processos de soldagem empregados apresentaram certo grau de semelhança quanto aos microconstituintes presentes nas regiões das juntas soldadas. O que talvez seja um indicativo de que a energia de soldagem não tenha influenciado na formação dos mesmos. Porém mais estudos sobre a influência da energia de soldagem na formação desses microconstituintes precisam ser realizados para confirmar ou não sua presença à medida que maiores percentuais de arame frio fossem adicionados ao processo de soldagem. O que poderia corroborar os resultados encontrados por Rodrigues (2011), Marques, (2012) e Assunção, (2013).

## 5.4 SELEÇÃO DA METODOLOGIA DE CAPTURA DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS

### 5.4.1 Resultados da Metodologia Par-a-Par

A Tabela 5.5 apresenta os tempos de percurso da onda ultrassônica obtidos nas direções longitudinal e transversal referentes a metodologia de captura Par-a-Par.

Tabela 5.5 - Tempos obtidos no teste com a metodologia de captura de sinal Par-a-Par aplicada a chapa como recebida.

Par	30 pares de tempo (ns) de percurso da onda em cada direção			
	Longitudinal	Transversal	Var. do tempo	Birrefringência
1	6251,50	6290,10	38,60	6,200E-03
2	6250,65	6290,45	39,80	6,300E-03

3	6251,65	6290,75	39,10	6,200E-03
4	6252,05	6289,80	37,75	6,000E-03
5	6251,30	6290,05	38,75	6,200E-03
6	6252,00	6289,30	37,30	5,900E-03
7	6251,80	6290,30	38,50	6,100E-03
8	6251,70	6289,45	37,75	6,000E-03
9	6251,50	6289,10	37,60	6,000E-03
10	6251,55	6289,05	37,50	6,000E-03
11	6251,25	6289,15	37,90	6,000E-03
12	6252,00	6288,80	36,80	5,900E-03
13	6250,45	6289,20	38,75	6,200E-03
14	6251,35	6289,25	37,90	6,000E-03
15	6250,50	6288,85	38,35	6,100E-03
16	6251,20	6290,30	39,10	6,200E-03
17	6252,10	6289,75	37,65	6,000E-03
18	6250,90	6289,60	38,70	6,200E-03
19	6251,60	6289,75	38,15	6,100E-03
20	6250,60	6289,85	39,25	6,300E-03
21	6251,20	6290,80	39,60	6,300E-03
22	6247,20	6290,65	43,45	6,900E-03
23	6253,85	6290,90	37,05	5,900E-03
24	6252,35	6290,40	38,05	6,100E-03
25	6251,45	6290,65	39,20	6,300E-03
26	6251,10	6290,45	39,35	6,300E-03
27	6252,45	6290,85	38,40	6,100E-03
28	6252,65	6290,00	37,35	6,000E-03
29	6251,05	6290,35	39,30	6,300E-03
30	6251,85	6291,00	39,15	6,200E-03
<b>MÉDIA</b>	<b>6251,43</b>	<b>6289,96</b>	<b>38,54</b>	<b>6,100E-03</b>
<b>DESV. PADRÃO</b>	<b>1,07</b>	<b>0,67</b>	<b>1,23</b>	<b>0,0002</b>

Fonte: Autor, (2017)

Com os tempos dessa tabela foram gerados três gráficos, Figuras 5.8, 5.9 e 5.10. Os dois primeiros gráficos mostram a variação dos tempos de percurso através da espessura do material com a onda polarizada nas direções longitudinal e transversal. Enquanto o gráfico da Figura 5.10 apresenta a diferença dos tempos entre essas duas direções

O gráfico da Figura 5.8 mostra que a onda ultrassônica com a direção de polarização alinhada com a direção de laminação do material (direção longitudinal) apresentou uma repetitividade de tempo em torno de 6251,00 ns com uma frequência de 53,33 % dos tempos capturados nessa direção. Isso significa dizer que mais da metade dos tempos capturados nessa direção apresentou esse valor de tempo. Nessa direção, um ponto deve ser ressaltado, o sinal de número 22 apresentou uma dispersão de 4,23 ns em relação à média dos tempos (6251,43 ns). Essa dispersão de tempo, provavelmente, ocorreu devido a manipulação equivocada dos instrumentos de medições do sinal, do transdutor, por exemplo. A dispersão desse ponto, muito provavelmente, implicou em um

desvio padrão diferente em relação à direção transversal, conforme é apresentado na Tabela 5.5.

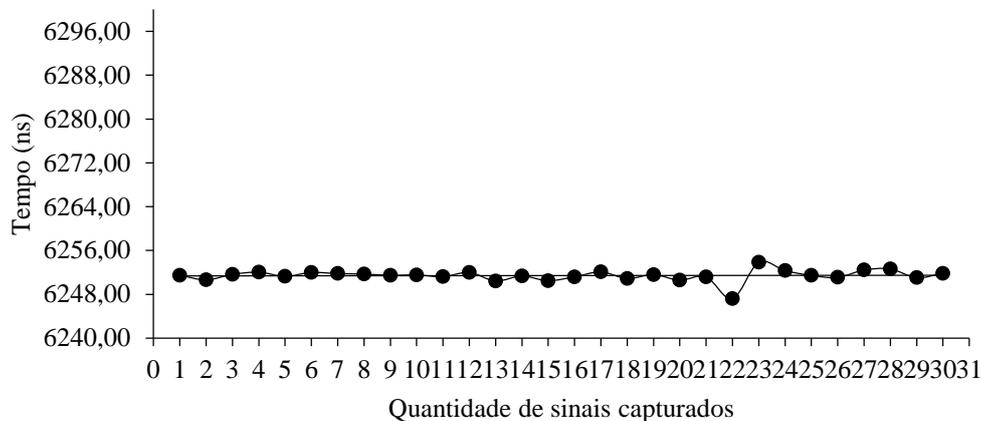


Figura 5.8 - Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização longitudinal (53,33% de frequência do tempo em torno de 6251 ns).

Em relação ao gráfico da Figura 5.9, medição do tempo na direção transversal, verifica-se que ocorreu uma variação maior do tempo. Entretanto, adotou-se o valor de 6290 ns como sendo a referência nessa direção, em que esse tempo ocorreu com uma frequência de 50 % dos tempos capturados. Isso significa dizer que somente 50% dos tempos capturados foram estáveis, entretanto, o desvio padrão nessa direção foi menor do que o da direção longitudinal, o que significa dizer que mesmo o tempo variando mais, mas manteve uma variação menor em torno da média.

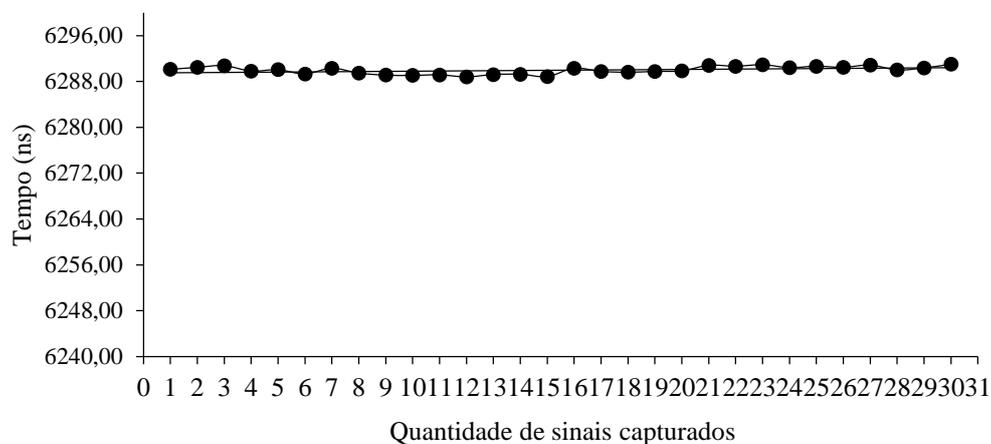


Figura 5.9 - Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização transversal (50 % de frequência do tempo em torno de 6290 ns).

A Figura 5.10 mostra a diferença dos tempos de propagação da onda nas direções longitudinal e transversal. Nessa figura, verifica-se que houve uma diferença de tempo entre essas direções, uma diferença média em torno de 38,54 ns. Essa diferença corrobora a presença de uma anisotropia acústica no material, ou seja, que o material apresentou uma textura cristalográfica definida (representada pela direção de laminação, por exemplo), comprovada com os resultados obtidos através da análise metalográfica, conforme mostraram as Figuras 5.1 e 5.2. Entretanto, é plausível comentar que essa diferença de tempo entre as direções pode ser influência também por tensões residuais presentes no material, haja visto que, a mesma influencia na velocidade (tempo) de propagação da onda na mesma ordem de grandeza da textura, conforme afirma BITTENCOURT, (2000).

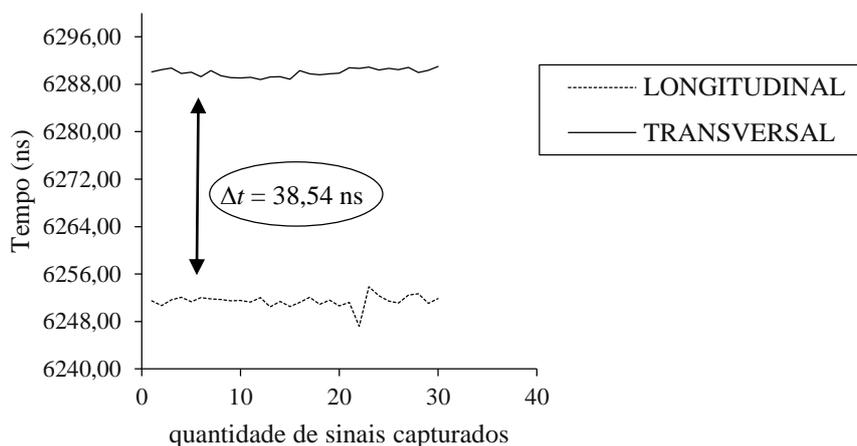


Figura 5.10 - Defasagem do tempo de percurso da onda nas direções longitudinal e transversal pelo método de captura Par-a-Par.

Outra análise dos resultados do método de captura Par-a-Par, refere-se aos desvios padrões, conforme mostrado na Tabela 5.3. Por essa tabela, verifica-se que o desvio padrão na direção longitudinal ( $D_{pL} = 1,07$ ) foi maior do que na direção transversal ( $D_{pT} = 0,67$ ), indicando que variações nas medições ocorreram, o que precisa ser investigado e corrigido para que não influenciem nos resultados finais, ou seja, nos valores de tensões residuais.

## 5.4.2 Resultados da Metodologia Contínua

A Tabela 5.6 apresenta os tempos das direções longitudinal e transversal referentes a metodologia de captura Contínua.

Tabela 5.6 - Tempos obtidos no teste com a metodologia de captura de sinal Contínua aplicada a chapa como recebida.

Sinal	30 Sinais de tempo (ns) de percurso da onda em cada direção		
	Longitudinal	Transversal	Variação do tempo
1	6250,35	6291,05	40,70
2	6250,80	6290,00	39,20
3	6249,85	6289,95	40,10
4	6249,60	6290,55	40,95
5	6250,15	6290,10	39,95
6	6251,10	6290,60	39,50
7	6249,55	6289,20	39,65
8	6250,05	6290,45	40,40
9	6251,00	6289,35	38,35
10	6249,60	6289,95	40,35
11	6250,30	6291,10	40,80
12	6249,85	6290,45	40,60
13	6250,75	6290,30	39,55
14	6250,35	6290,25	39,90
15	6250,55	6291,25	40,70
16	6249,90	6289,60	39,70
17	6249,80	6290,60	40,80
18	6249,85	6290,60	40,75
19	6250,20	6290,20	40,00
20	6250,40	6290,95	40,55
21	6250,10	6290,05	39,95
22	6251,45	6289,85	38,40
23	6250,55	6289,75	39,20
24	6250,40	6290,30	39,90
25	6250,50	6289,80	39,30
26	6250,95	6291,10	40,15
27	6250,20	6291,00	40,80
28	6250,25	6290,05	39,80
29	6250,40	6289,75	39,35
30	6249,45	6290,40	40,95
<b>MÉDIA</b>	<b>6250,28</b>	<b>6290,29</b>	<b>40,01</b>
<b>DESV. PADRÃO</b>	<b>0,49</b>	<b>0,53</b>	<b>0,71</b>
<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>		<b>6,400E-03</b>	

Fonte: Autor, (2017).

Com base nos resultados dessa tabela foram gerados também três gráficos, Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, as quais mostram a variação dos tempos de percurso da onda em cada direção de polarização (longitudinal e transversal) e a defasagem de tempo nessas duas direções, respectivamente.

No gráfico da Figura 5.10, mesmo se verificando uma oscilação dos tempos capturados, adotou-se que a onda ultrassônica com a direção de polarização paralela a direção de laminação apresentou o tempo de percurso em torno de 6250 ns com uma frequência de 60 % dos tempos capturados nessa direção, ou seja, a maior parte dos tempos capturados variou em torno desse tempo, enquanto a variação do tempo dos outros sinais em relação a esse tempo foi menor, o que é corroborado pelo desvio padrão dos tempos ( $D_{PL} = 0,49$ ) mostrado na Tabela 5.5.

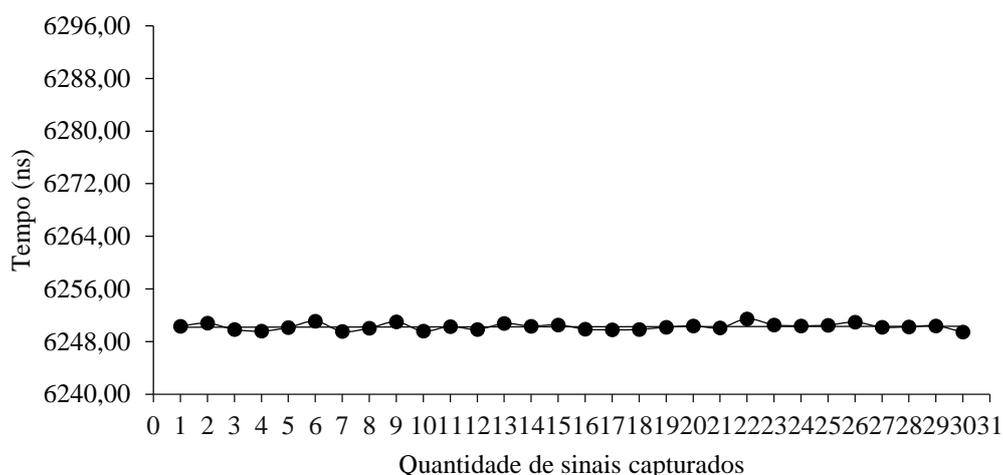


Figura 5.11 - Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização longitudinal.

Em relação ao gráfico da Figura 5.12, análise do tempo na direção transversal, também se verificou uma oscilação dos tempos capturados. De forma semelhante a análise dos tempos na direção longitudinal, adotou-se o tempo de percurso em torno de 6290 ns com maior quantidade de vezes capturado, ou seja, com uma frequência de 53,33 % dos tempos capturados nessa direção. Essa baixa oscilação dos tempos de percurso da onda nessa direção é corroborado pelo desvio padrão ( $D_{PT} = 0,53$ ), praticamente igual ao da direção longitudinal, ( $D_{PL} = 0,49$ ).

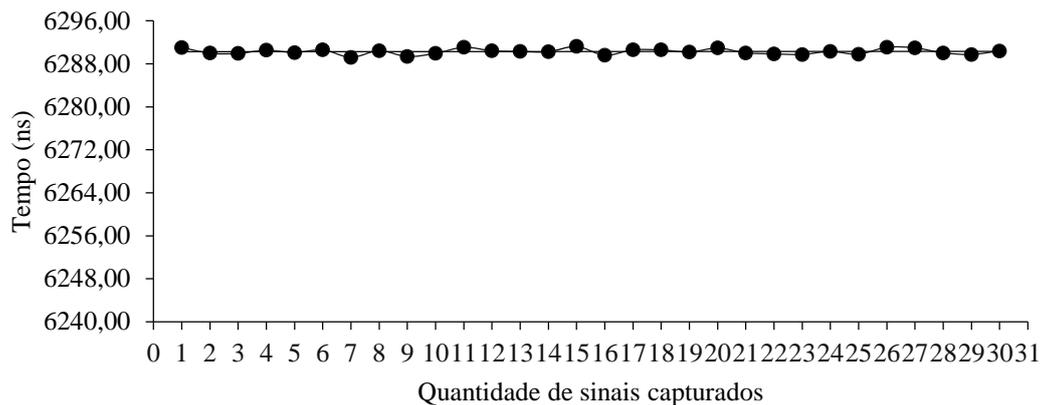


Figura 5.12 - Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização transversal.

A Figura 5.13 mostra a diferença dos tempos de propagação da onda entre as direções longitudinal e transversal para o método de captura em questão. Nessa figura, verifica-se que pela metodologia Contínua, a diferença dos tempos nas duas direções, aumentou de 38,5 para 40 ns, ou seja, 1,5 ns a mais, porém os tempos foram considerados semelhantes obtidos pelos dois métodos.

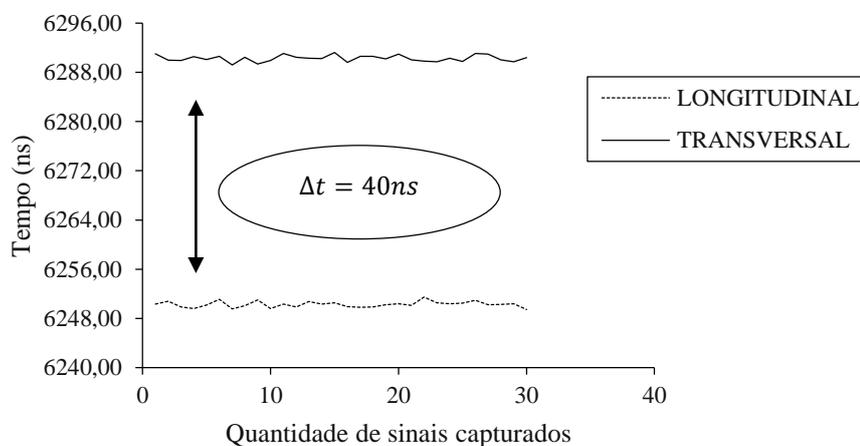


Figura 5.13 - Defasagem de tempo de percurso da onda nas direções longitudinal e transversal para o método de captura Contínuo.

Portanto, de posse dos valores dos tempos e dos desvios padrões encontrados para os dois métodos de captura foi importante determinar qual o melhor método a ser utilizado no trabalho. Nesse contexto, verificando-se os desvios padrões obtidos pelos dois métodos de captura e para as duas direções de polarização da onda, observa-se que o método de captura Par-a-Par apresentou desvios padrões maiores do que o método de

captura Contínuo. Contudo, para se determinar de forma técnica qual o melhor método de captura do sinal a ser utilizado nos experimentos, foi realizado um estudo estatístico baseado em teste de hipóteses sobre os desvios padrões dos tempos longitudinal e transversal. O teste de hipóteses é mostrado no.

Assim, com base nos resultados dessas análises estatísticas foi comprovado que os desvios padrões encontrados para os dois métodos de captura foram iguais, apesar da diferença entre eles, como é visto nas Tabelas 5.5 e 5.6. Dessa forma, concluiu-se que a utilização de qualquer um dos métodos implicaria em resultados semelhantes de tempo capturados. Porém, a metodologia de captura do sinal ultrassônico adotada foi a Contínua, principalmente, devido a sua grande simplicidade, praticidade e rapidez na captura dos sinais, quando comparada com a Par-a-Par.

## 5.5 BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA DO MATERIAL COMO RECEBIDO (BA0)

Tendo como parâmetros, o método de captura do tempo de percurso da onda ultrassônica e a direção de laminação do material já obtidos, determinou-se a partir destes a birrefringência acústica desse material como recebido (BA0). Entretanto, antes de se analisar os resultados de BA0, é importante apresentar e comentar os resultados dos tempos obtidos entre as nove amostras medidos nas direções longitudinal e transversal utilizados nos cálculos de BA0. Nesse contexto, são apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8 os 36 (trinta e seis) valores de tempos médios nas duas direções obtidos a partir da média entre as nove amostras. No Apêndice D são mostrados os resultados dos tempos medidos nas direções longitudinal e transversal de cada amostra, além de suas respectivas birrefringências antes da soldagem.

Tabela 5.7 - Variação dos tempos médios (ns) de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal antes da soldagem.

Tempos Médios na Direção Longitudinal (ns)				
Pontos	Linha A	Linha B	Linha C	Linha D
1	6250,22	6252,61	6251,45	6251,17
2	6250,74	6252,80	6251,00	6251,81
3	6252,27	6254,24	6252,14	6253,05
4	6251,72	6253,55	6252,64	6252,41
5	6248,98	6249,48	6248,16	6247,37
6	6253,24	6253,22	6253,66	6252,30
7	6254,95	6256,02	6256,36	6254,29
8	6251,74	6253,94	6253,32	6252,42
9	6249,29	6251,58	6251,69	6249,77

<b>Média</b>	<b>6251,46</b>	<b>6253,05</b>	<b>6252,34</b>	<b>6251,62</b>
<b>D. Padrão</b>	<b>1,91</b>	<b>1,82</b>	<b>2,22</b>	<b>2,02</b>

Fonte: Autor, (2017).

Tabela 5.8 - Variação dos tempos médios (ns) de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção transversal antes da soldagem.

Tempos Médios na Direção Transversal (ns)				
<b>Pontos</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>1</b>	6287,66	6289,74	6288,77	6287,99
<b>2</b>	6288,84	6290,92	6289,01	6289,73
<b>3</b>	6289,13	6291,68	6289,21	6290,20
<b>4</b>	6288,62	6290,56	6289,70	6289,37
<b>5</b>	6286,51	6287,46	6285,47	6284,57
<b>6</b>	6289,89	6290,68	6290,48	6289,45
<b>7</b>	6291,88	6293,42	6293,73	6291,69
<b>8</b>	6289,56	6292,33	6291,40	6290,82
<b>9</b>	6286,84	6289,04	6288,61	6287,32
<b>Media</b>	<b>6288,77</b>	<b>6290,65</b>	<b>6289,60</b>	<b>6289,02</b>
<b>D. Padrão</b>	<b>1,65</b>	<b>1,78</b>	<b>2,24</b>	<b>2,13</b>

Fonte: Autor, (2017).

Para uma melhor análise e visualização dos dados dessas duas tabelas, gráficos foram elaborados, conforme mostra a Figura 5.14. Nesta figura, são apresentados gráficos de linhas e de pontos, onde cada linha e cada ponto representa a região onde foi realizada a medição do tempo de percurso da onda. O eixo  $x$ , representado pelos pontos de zero a dez indica o comprimento das amostras ou sua direção de laminação, espaçados de 40 em 40 mm e o eixo  $y$  indica o tempo em cada direção. As siglas L.A-DL e L.A-DT significam medições em pontos da linha A, nas direções longitudinal e transversal, respectivamente.

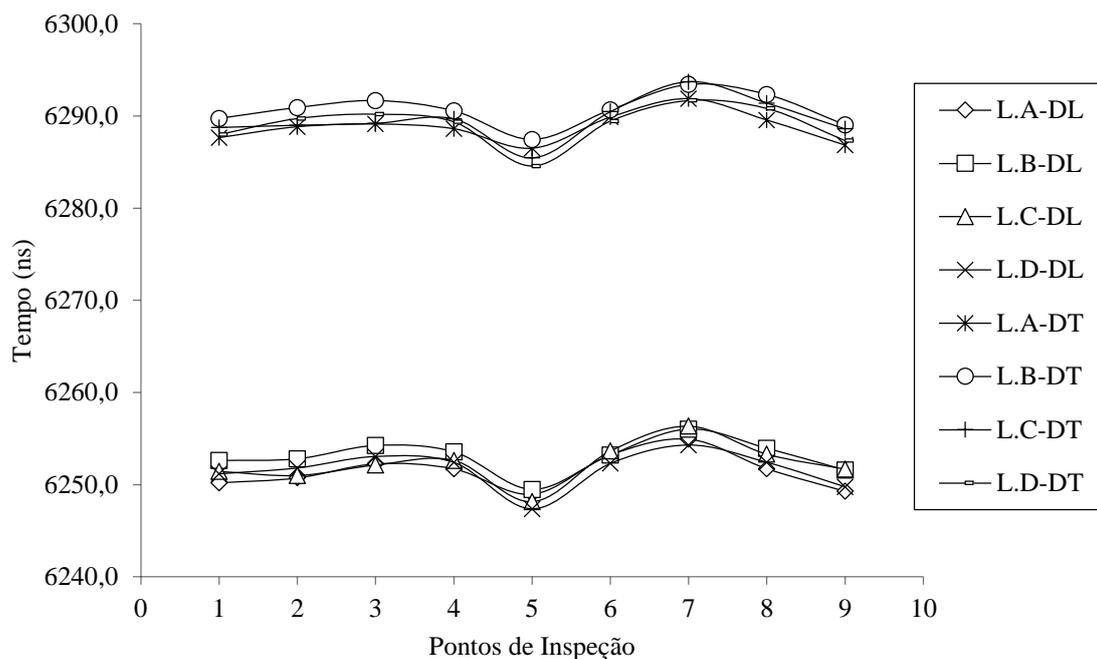


Figura 5.14 - Distribuição dos 36 (trinta e seis) tempos médio de percurso da onda ultrassônica polarizada nas direções longitudinal e transversal ao longo do material como recebido.

Conforme pode ser verificado nas Tabelas 5.7 e 5.8 e corroborado pela Figura 5.14, os tempos médios longitudinais foram sempre menores (velocidades maiores) do que os tempos médios transversais em todos os pontos medidos ao longo do material como recebido. A maior diferença dos tempos médios entre as duas direções foi de 46,36 ns, medidos nos pontos 5 (cinco) e 7 (sete) das linhas *D* e *C*.

A diferença de tempo entre as duas direções de polarização da onda pode estar também relacionada com as tensões residuais pré-existentes no material, já que esses dois fatores (tensão e textura cristalográfica) influenciam na mesma ordem de grandeza a velocidade da onda (HSU, 1974; FUKUOKA, *et al.*, 1983; SCHNEIDER, HOLLER e GOEBBELS, 1984; ORTEGA, *et al.*, 2011). Uma possível solução para minimizar essa incerteza sobre a diferença de tempo nas duas direções (se causada pela textura ou por tensões residuais) seria a aplicação de um processo de tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) antes da soldagem, porém não realizado neste trabalho. Assim, os resultados dos valores dos tempos medidos nas duas direções e, conseqüentemente, os valores de *BA* seriam influenciados somente pela textura cristalográfica presente no material. O tratamento térmico de alívio de tensões realizado no material como recebido também influenciaria nos resultados finais de tensões, na medida em que se teria outros valores de *BA0*, ou seja, sem a influência das tensões existentes nesse material.

Com os tempos médios longitudinal e transversal das Tabelas 5.7 e 5.8 e com o uso da Equação 3.30 foram calculados os 36 (trinta e seis) valores médios de  $BA0$ , conforme mostra a Tabela 5.9, que representam a distribuição da anisotropia ao longo do material como recebido. Isto foi realizado para verificar a homogeneidade ou heterogeneidade do material nessa condição. Além disso, esses dados foram utilizados também para determinar a tensões residuais após a soldagem.

Tabela 5.9 - Birrefringências acústicas distribuídas ao longo do material como recebido ( $BA0$ )

Pontos	Linha A	Linha B	Linha C	Linha D
1	5,973E-03	5,921E-03	5,952E-03	5,872E-03
2	6,077E-03	6,078E-03	6,062E-03	6,047E-03
3	5,878E-03	5,967E-03	5,912E-03	5,923E-03
4	5,884E-03	5,901E-03	5,909E-03	5,895E-03
5	5,988E-03	6,059E-03	5,954E-03	5,936E-03
6	5,843E-03	5,972E-03	5,871E-03	5,925E-03
7	5,886E-03	5,960E-03	5,956E-03	5,962E-03
8	6,031E-03	6,121E-03	6,072E-03	6,124E-03
9	5,991E-03	5,974E-03	5,888E-03	5,991E-03
<b>Desvio Padrão</b>		7,507E-05	<b>BA0Médio</b>	5,965E-03

Fonte: Autor, (2017).

Os resultados de  $BA0$  são mostrados graficamente na Figura 5.15. Nesta figura são apresentados gráficos de linhas, onde cada ponto localiza a linha e a região onde o tempo de percurso da onda foi medido e, conseqüentemente, a  $BA0$  (anisotropia). O eixo  $x$  indicando os valores de -200 a 200, anteriormente indicado pelos pontos de zero a dez, conforme mostrado na Figura 5.14, corresponde ao comprimento em mm das amostras e sua direção de laminação, conforme já mencionado anteriormente. Enquanto o eixo  $y$ , corresponde aos valores de  $BA0$ .

É importante ressaltar que a mudança de nomenclatura do eixo  $x$ , de pontos de inspeção (Figura 5.14) para distância (Figura 5.15), teve como objetivo seguir os trabalhos disponíveis na literatura, ou seja, após a soldagem a linha do centro do cordão é tomada como referência para a análise de tensões residuais. Dessa forma, a partir de uma vista superior da junta soldada, os pontos à esquerda e à direita dessa linha central do cordão são considerados negativos e positivos, respectivamente.

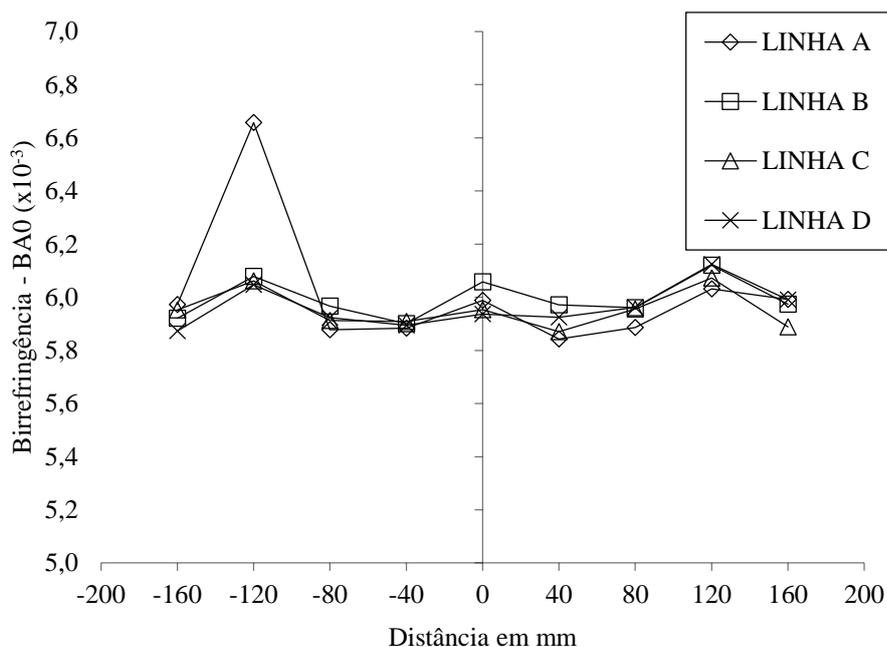


Figura 5.15 - Variação de  $BAO$  ao longo do material como recebido.

Conforme observado na Tabela 5.9 e corroborado pela Figura 5.15, o material apresentou uma distribuição não homogênea dos valores  $BAO$ . Este resultado era esperado por se tratar de um material com uma textura variável ao longo do mesmo, e também por não ter sido submetido a um TTAT. Contudo, apesar dessa observação gráfica não uniforme dos resultados, não foi possível afirmar de forma precisa se esses valores médios de  $BAO$  variavam muito um em relação ao outro, o que implicaria nos resultados de tensões após a soldagem.

Sendo assim, para solucionar essa incerteza e ajudar na interpretação desses números e ponderar sobre a homogeneidade ou heterogeneidade da anisotropia ao longo do material como recebido, foi realizada uma análise estatística de teste de hipóteses, utilizando-se a ferramenta estatística denominada ANOVA: FATOR ÚNICO. Segundo Montgomery e Runger, (2009), a ANOVA realiza uma análise de variância, procedimento estatístico de teste de hipóteses usado para comparar médias de duas ou mais populações e definir um resultado. Na análise estatística foi utilizado um grau de confiança de 95% ou de incerteza de 5%. No Apêndice E são apresentados a fundamentação teórica da análise estatística. Os resultados dessa análise são mostrados aqui através das Tabelas 5.10 e 5.11.

Tabela 5.10 - Resultados das análises estatísticas das linhas A, B, C e D do material como recebido.

Anova: fator único						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Linha A	9	5,36E-02	5,95E-03	6,41E-09		
Linha B	9	5,40E-02	5,99E-03	5,45E-09		
Linha C	9	5,36E-02	5,94E-03	5,07E-09		
Linha D	9	5,37E-02	5,97E-03	6,29E-09		
Anova						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos (MQG)	1,12E-08	3	3,73E-09	6,42E-01	5,94E-01	2,90
Dentro dos grupos (MQR)	1,86E-07	32	5,81E-09			
Total	1,97E-07	35				

Fonte: Autor, (2017)

Tabela 5.11 - Resultados das análises estatísticas dos pontos de 1 a 9.

Anova: fator único						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Ponto 1	4	0,0237	0,0059	1,91E-09		
Ponto 2	4	0,0243	0,0060	2,05E-10		
Ponto 3	4	0,0237	0,0059	1,35E-09		
Ponto 4	4	0,0235	0,0059	1,11E-10		
Ponto 5	4	0,0239	0,0059	2,93E-09		
Ponto 6	4	0,0236	0,0059	3,27E-09		
Ponto 7	4	0,0238	0,0059	1,33E-09		
Ponto 8	4	0,0243	0,0061	1,94E-09		
Ponto 9	4	0,0238	0,0059	2,43E-09		
Anova						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos (MQG)	1,51E-07	8	1,89E-08	10,97	9,71E-07	2,31
Dentro dos grupos (MQR)	4,64E-08	27	1,72E-09			
Total	1,97E-07	35				

Fonte: Autor, (2017).

Pela Tabela 5.10, ou seja, resultados obtidos ao longo das linhas, verifica-se que o valor de  $F_{\text{calculado}}$  foi menor do que o valor de  $F_{\text{tabelado}}$  ( $F_{\text{crítico}}$ ), assim como, o valor- $P$ , que foi maior do que o nível de significância adotado, isto é, de 5%. Além disso, o valor de  $MQG$  foi menor do  $MQR$ . Estes resultados obedeceram aos critérios estatísticos adotados e, portanto, implicaram a afirmar que a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) foi aceita, ou seja, não há evidências de diferença significativa entre tratamentos (entre as médias), ao nível  $\alpha$  de significância escolhido. Assim, concluiu-se que os valores de  $BAO$  analisados paralelamente à direção de laminação do material apresentam um comportamento homogêneo, estatisticamente.

Analisando-se os valores de  $BAO$ , transversalmente à direção de laminação, verifica-se pela Tabela 5.11 que o valor de  $F_{\text{calculado}}$  foi maior do que o  $F_{\text{tabelado}}$  e o valor- $P$  foi menor do que a incerteza de 5% adotada, estes resultados implicaram a afirmar que a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) foi rejeitada, ou seja, existem evidências de diferença

significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos nessa direção analisada, ao nível  $\alpha$  de significância escolhido. Portanto, baseado nos resultados das análises estatísticas foi comprovado que o material como recebido apresentou na direção transversal à direção de laminação um comportamento heterogêneo da anisotropia.

Como o material apresentou heterogeneidade da anisotropia, o BA0Médio (5,965E-03) não foi utilizado para a análise de tensões após a soldagem. Dessa forma, as tensões residuais oriundas de cada processo foram determinadas de forma pontual, ou seja, através da diferença entre *BA's* e *BA0* de cada ponto, antes e após a soldagem e, logicamente, dividido pela constante acustoelástica da região do metal de base, conforme mostra a Equação 3.33.

## 5.6 CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA DO MATERIAL COMO RECEBIDO (*CAE*)

De posse do valor do limite de escoamento do material foram determinadas as cargas para interrupção e captura dos sinais ultrassônicos no ponto central dos corpos de prova conforme é mostrado na Figura 4.10. A área da seção transversal dos corpos de prova utilizados para a determinação da *CAE* foi de 259,54 mm<sup>2</sup>. De posse do valor do limite de escoamento do metal de base, que foi de 342,26 MPa, utilizou-se 94,55% dessa tensão, que corresponde a 323,61 MPa. Portanto, baseado no conceito de tensão e tendo a área útil dos corpos de prova utilizados para determinação da *CAE*, determinou-se a carga máxima para a tensão de 323,61 MPa, que foi de 83.989,7394 N, ou aproximadamente 84 kN. Esta carga foi fracionada de 7 em 7 kN para parada e medição do sinal do percurso da onda ultrassônica nas direções paralela e transversal ao carregamento, conseqüentemente, determinação da *CAE*. O percentual de 94,55% da tensão de escoamento foi adotado, pois de acordo com a teoria da acustoelasticidade, a análise de tensões residuais pela técnica de *BA* utiliza equações no regime elástico.

Na Tabela 5.12 são mostrados as cargas utilizadas para a interrupção durante o ensaio de carregamento e os correspondentes valores de tensões aplicadas a que os três corpos de prova estavam sujeitos, além dos respectivos tempos de cada corpo de prova medidos nas direções longitudinal e transversal (*TL* e *Tt*, respectivamente) à direção do carregamento.

Tabela 5.12 - Cargas aplicadas para a obtenção da *CAE* e seus correspondentes valores de tensões e tempos obtidos nas direções longitudinal e transversal durante o ensaio de tração uniaxial para três corpos de prova.

Carga (kN)	Tensão (MPa)	Corpos de Prova					
		01		02		03	
		Tempo (ns)		Tempo (ns)		Tempo (ns)	
		$TL_1$	$Tt_1$	$TL_2$	$Tt_2$	$TL_3$	$Tt_3$
0	0	6152,74	6190,84	6171,22	6209,80	6163,28	6202,89
7	26,97	6151,32	6188,28	6169,14	6206,41	6160,61	6198,80
14	53,94	6151,89	6188,00	6170,80	6207,09	6162,30	6198,55
21	80,91	6152,59	6187,81	6170,82	6206,70	6164,04	6198,54
28	107,88	6153,47	6186,99	6172,10	6205,33	6164,08	6197,71
35	134,85	6155,04	6185,89	6173,62	6205,42	6165,32	6197,30
42	161,82	6156,26	6186,51	6174,66	6205,48	6166,49	6197,27
49	188,80	6156,28	6186,82	6175,12	6205,76	6169,31	6197,33
56	215,77	6157,81	6186,54	6175,12	6205,76	6168,96	6196,93
63	242,74	6159,87	6185,87	6176,14	6205,68	6170,45	6195,94
70	269,71	6160,27	6186,03	6177,90	6204,53	6170,57	6196,50
77	296,68	6160,85	6186,41	6178,19	6203,52	6170,06	6194,96
84	323,65	6162,27	6186,70	6178,62	6204,33	6170,99	6194,97

Fonte: Autor, (2017).

Como a *CAE* denota a variação da velocidade ou do tempo de percurso da onda ultrassônica cisalhante em relação a tensão aplicada no material, dessa forma, a variação do tempo de percurso da onda polarizada paralelamente e transversalmente à direção da carga aplicada para o material como recebido mostrado na Tabela 5.12, é apresentado graficamente na Figura 5.16. Nesta figura,  $TL$  e  $Tt$  representam os tempos de percurso da onda nas direções longitudinal e transversal, respectivamente, referentes aos carregamentos dos três corpos de prova.

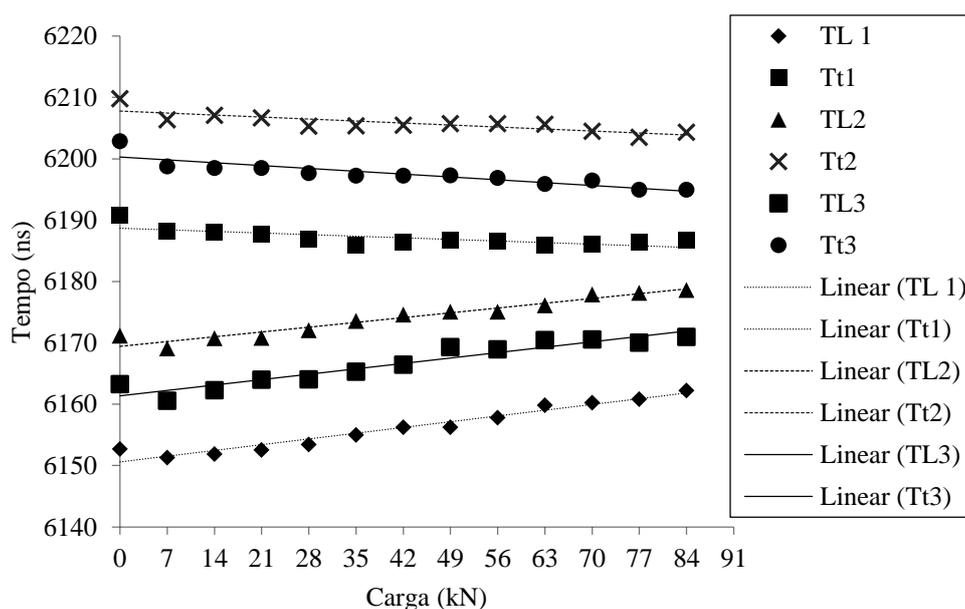


Figura 5.16 - Gráfico da variação dos tempos em função das cargas aplicadas no metal de base.

Conforme os dados da Tabela 5.12 e ilustrado na Figura 5.16, observa-se que o comportamento dos tempos de percurso da onda cisalhante através da espessura do material para esses corpos de prova se apresentou de forma semelhante, ou seja, o comportamento do tempo nas duas direções foi linear em relação à direção da carga aplicada. Sendo que o tempo médio de percurso da onda polarizada na direção da carga aplicada teve a tendência de aumentar com a aplicação da carga, enquanto, o tempo de percurso da onda polarizada transversalmente a carga aplicada apresentou um comportamento diferente, isto é, observou-se uma tendência em se manter levemente descendente. Esse comportamento do tempo de percurso da onda também foi obtido por BITTENCOURT, (2000).

Com base nos tempos de cada direção obtidos em cada carga, foram determinados os valores de  $BA$  e a partir destes e de suas respectivas tensões referentes a cada corpo de prova, foram gerados seus respectivos gráficos, birrefringência x tensão, conforme são apresentados na Figura 5.17. Esta figura mostra o comportamento linear de  $BA$  ao longo do ensaio de carregamento realizado, em que se observa uma tendência de decréscimo do valor de  $BA$  com o aumento dos valores de tensão. A variação linear da birrefringência acústica com a tensão aplicada foi relatada anteriormente para o aço e alumínio (HSU, 1974; OKADA, 1980: 1981), e ocorre devido ao fato de que o eixo acústico principal está alinhado com a direção de laminação do material (OKADA, 1983). A  $CAE$  encontrada para o material como recebido foi um valor médio de  $-7,33E-06$  (MPa)<sup>-1</sup>, obtido da inclinação do ajuste linear da curva de cada corpo de prova, conforme é mostrado na Tabela 5.13. O valor da  $CAE$  encontrada está de acordo com a literatura, para muitos aços esse valor compreende a faixa de  $-7E-6$  MPa<sup>-1</sup> a  $-9E-6$  MPa<sup>-1</sup> (HIRAO *et al.*, 1994),

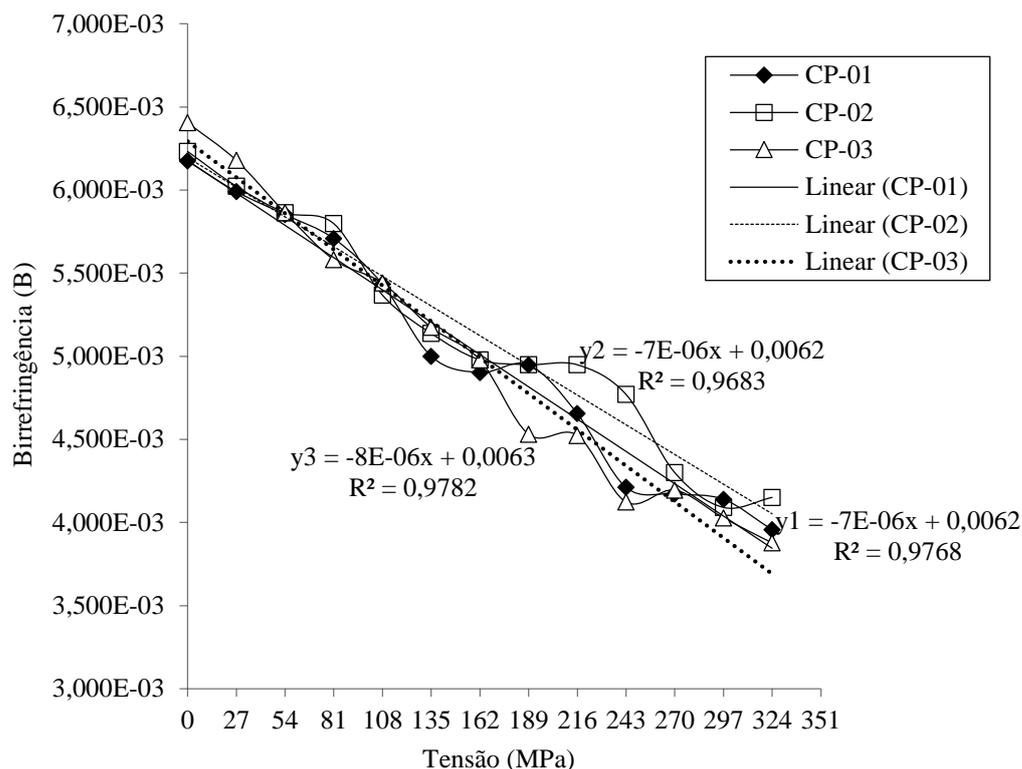


Figura 5.17 - Gráfico da variação de birrefringência x tensão para obtenção da CAE do metal de base.

Tabela 5.13 - Valores das constantes acustoelásticas do ASTM A-131 como recebido.

Corpos de prova	Valores de CAE (MPa) <sup>-1</sup>	Média (MPa) <sup>-1</sup>	Desvio padrão
CP-01	-7,000E-6		
CP-02	-7,000E-6	-7,330E-06	5,774E-07
CP-03	-8,000E-6		

Fonte: Autor, (2017).

## 5.7 TENSÕES RESIDUAIS DETERMINADAS POR BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA

Conforme foi mostrado no Fluxograma da Figura 4.13, para cada procedimento de soldagem foram soldados três amostras, dessa forma, no Apêndice F, mostram-se os tempos médios de percurso da onda ultrassônica nas direções paralela e transversal à direção de laminação dessas amostras resultante de cada procedimento de soldagem, bem como os seus valores de birrefringências acústicas. Sendo assim, a partir dos valores de birrefringências antes e após a soldagem e da constantes acustoelástica do material como recebido ( $-7,33\text{E-}06 \text{ (MPa)}^{-1}$ ) foram calculadas as diferenças de tensões residuais médias ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ), ao longo das direções paralela e perpendicular ao cordão de solda, com o uso da equação 3.33.

## 5.7.1 Tensões Residuais GMAW

A Tabela 5.14 apresenta os resultados da diferença de tensões residuais médias ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) ao longo das direções paralela e transversal ao cordão de solda medidos em pontos das linhas *A*, *B*, *C* e *D* após a soldagem GMAW, assim como, o desvio padrão (D.P) de cada ponto. Ressalta-se que os valores da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) de todas as amostras relativos a cada procedimento de soldagem medidos por BA estão no Apêndice *G*.

Tabela 5.14 - Valores de tensões residuais médios obtidos por BA após a soldagem GMAW.

PTS	TENSÕES RESIDUAIS ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) MPa							
	Linha-A	D.P	Linha - B	D.P	Linha - C	D.P	Linha-D	D.P
<b>-160</b>	29,58	109,45	<b>57,03</b>	66,53	<b>59,92</b>	55,69	50,67	27,75
<b>-120</b>	53,20	30,26	<b>87,05</b>	32,75	<b>74,14</b>	36,15	45,32	30,51
<b>-80</b>	38,88	51,71	<b>152,56</b>	62,70	<b>170,77</b>	51,40	67,26	42,57
<b>-40</b>	<b>23,09</b>	<b>64,68</b>	<b>319,84</b>	<b>88,21</b>	<b>339,74</b>	<b>47,69</b>	<b>107,20</b>	<b>25,31</b>
<b>0</b>								
<b>40</b>	<b>93,14</b>	<b>35,46</b>	<b>329,77</b>	<b>19,65</b>	<b>285,84</b>	<b>21,43</b>	<b>22,85</b>	<b>32,28</b>
<b>80</b>	52,09	45,49	<b>154,10</b>	57,09	<b>145,98</b>	42,74	6,56	37,25
<b>120</b>	43,94	6,15	<b>77,81</b>	27,61	<b>42,01</b>	45,93	33,21	25,54
<b>160</b>	40,28	8,55	<b>55,06</b>	13,92	<b>35,60</b>	10,28	70,07	25,45

Fonte: Autor (2017).

Para uma melhor visualização e análise dos dados da Tabela 5.14, gráficos em 2 e 3D de linha foram elaborados para mostrar a distribuição da diferença de tensões residuais do processo em pontos ao longo das linhas *A*, *B*, *C* e *D*. Nesse contexto, a Figura 5.18, apresenta a distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) observada ao longo da direção paralela do cordão de solda à medida que os pontos medidos se afastam do mesmo. Nessa figura, os eixos *xx*, *yy* e *zz*, representam, respectivamente, o comprimento (mm) ou direção de laminação das amostras, largura das amostras (mm) e os valores da diferença de tensões residuais. Essa nomenclatura dos eixos foi adotada em todos os gráficos referentes aos resultados de tensões residuais obtidos por BA. Ressalta-se que todos os pontos analisados estão a 40 mm de distância entre si.

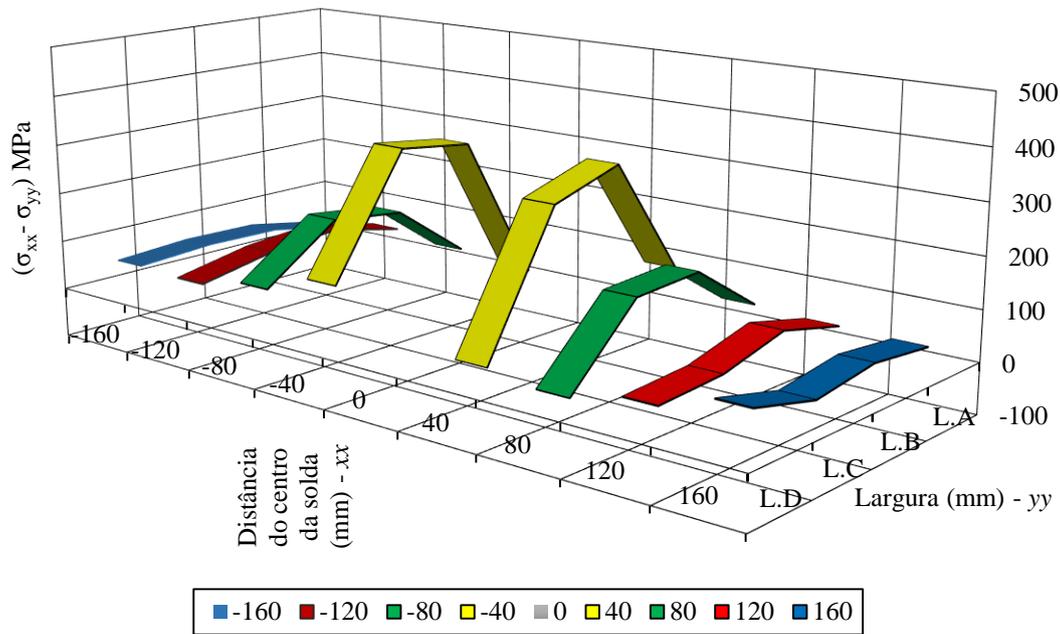


Figura 5.18 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção paralela ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW.

A Figura 5.19 apresenta a distribuição da diferença tensões ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) observada ao longo da direção transversal ( $xx$ ) do cordão de solda em pontos ao longo das linhas *A*, *B*, *C* e *D*. As nomenclaturas *L.A* e *L.B*, por exemplo, representam medidas da diferença de tensões residuais determinados em pontos ao longo das linhas *A* e *B*.

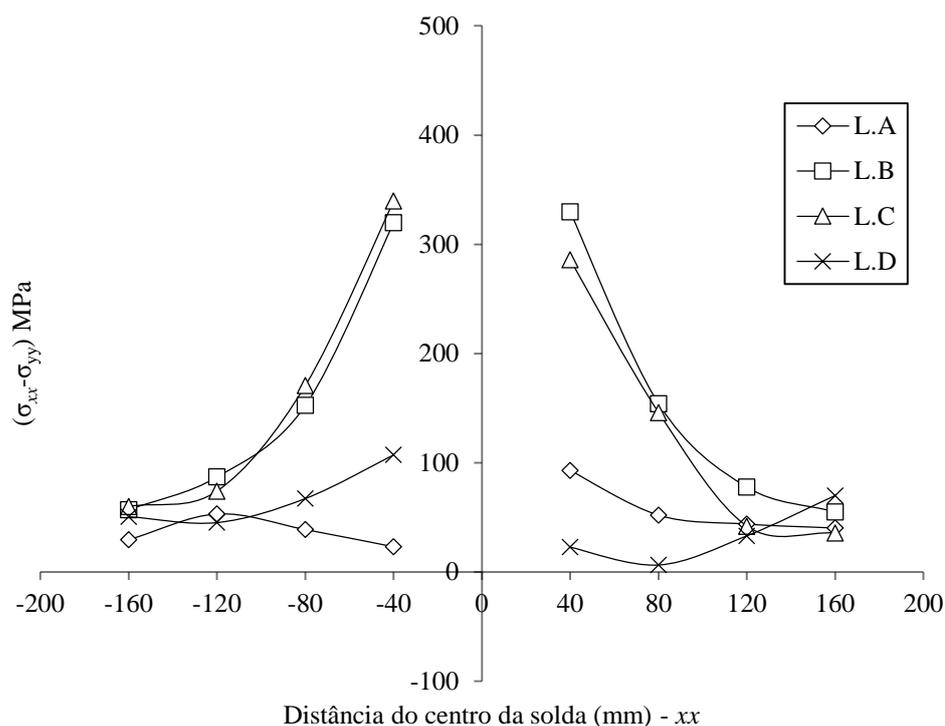


Figura 5.19 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção transversal ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW.

Conforme se verifica nos dados da Tabela 5.14 e ilustrados na Figura 5.18, a diferença de tensões residuais paralelas ao cordão, direção  $yy$ , e a uma distância de 40 mm, em ambos os lados do centro do mesmo, apresentam valores máximos de tração no meio do comprimento do cordão, enquanto em suas extremidades, esses valores diminuem. No meio do comprimento do cordão, os valores de tensões correspondem a faixa de 285,84 a 339,74 MPa. O valor máximo dessa faixa é 2,52 MPa menor do que a tensão de escoamento do metal de base. Em comparação com a tensão de escoamento do metal de base, pode-se afirmar que a soldagem GMAW gerou um nível elevado de tensões residuais trativas próximo ao cordão. Provavelmente, pelo aporte térmico elevado dessa região gerada pelo processo e também devido a menor expansão e contração causadas pelas restrições impostas às amostras. Contudo, à medida em que os pontos medidos foram se afastando do cordão, ou seja, a distâncias de 80, 120 e 160 mm deste, o nível de tensão foi reduzindo significativamente. Esta redução de tensões, talvez seja devido ao baixo aporte térmico dessa região, o que gerou menor expansão, embora as amostras estivessem restringidas. Com isso a contração no resfriamento dessa região quase não existe, conseqüentemente, as tensões residuais nessas regiões são menores ou provenientes do processo de fabricação do material.

Em relação aos valores da diferença de tensões analisadas transversalmente ao cordão, direção  $xx$ , observa-se na Figura 5.19 que os mesmos a distância de 40 mm, em ambos os lados do centro do cordão, medidos nas linhas  $B$  e  $C$ , apresentam-se de forma elevada, em tração, e foram diminuindo à medida que os pontos analisados se distanciaram do cordão. Nos pontos medidos nas linhas  $A$  e  $D$ , nas direções paralela e transversal ao cordão, os valores da diferença de tensões, de uma forma geral, foram menores do que os dos pontos das duas linhas centrais, provavelmente, porque as regiões onde se encontram esses pontos possuem maior facilidade de deformação ou maior contração térmica mesmo essas regiões estando restringidas, consequentemente, ocorre alívio das tensões residuais.

Além disso, observa-se pelas Figuras 5.18 e 5.19, que os valores da diferença de tensões medidos pela técnica de  $BA$ , no  $MB$ , apresentaram-se trativos em todos os pontos analisados. Estes tipos de tensões, certamente, predominaram ao longo da espessura do material após a soldagem, ajudado também pela restrição das amostras, que de acordo com Lamy (2002) e Leggatt (2008), a medida que a mesma é restringida durante a soldagem, ocorre redução da expansão e contração do material, gerando maior concentração de tensões.

Leggatt (2008) e Javadi *et. al.*, (2015) afirmam que as restrições das amostras geram tensões residuais de natureza trativas. Além disso, outro fato importante que talvez também justifique esses resultados obtidos por  $BA$ , está relacionado ao processo de fabricação do metal de base, isto é, ao processo de laminação. Pois tudo indica que o material utilizado neste trabalho foi laminado com rolos de diâmetros pequenos, já que de acordo com Kalpakjian e Schmid (2014), estes rolos deformam plasticamente a sua superfície, gerando tensões compressivas térmicas na mesma no momento do processo. Entretanto, a região central não se deforma plasticamente mesmo durante a laminação que ocorre a altas temperaturas. Ao término do processo de fabricação, isto é, após o resfriamento do material, os grãos da região central retornam ao seu tamanho original, gerando forças repulsivas do interior para a superfície, porém impedidas pelas regiões superficiais plastificadas, consequentemente, gerando tensões trativas nessa região central do material, as quais provavelmente, predominaram ao longo da espessura do material e se ampliaram próximos à  $ZTA$  e à  $ZF$  ajudadas com a menor expansão e contração devido à restrição.

De forma a enfatizar ainda mais os resultados da Tabela 5.14 e as Figura 5.18 e 5.19, mostram-se nas Figuras 5.20(a,b) gráficos em 3D de superfície baseada em cores,

referentes às diferenças de tensões nas direções paralela e transversal ao cordão de solda para o processo de soldagem GMAW. Esses gráficos mostram de forma clara o comportamento dessas tensões residuais no metal de base, com um nível de tensões de natureza trativas elevado próximo ao cordão.

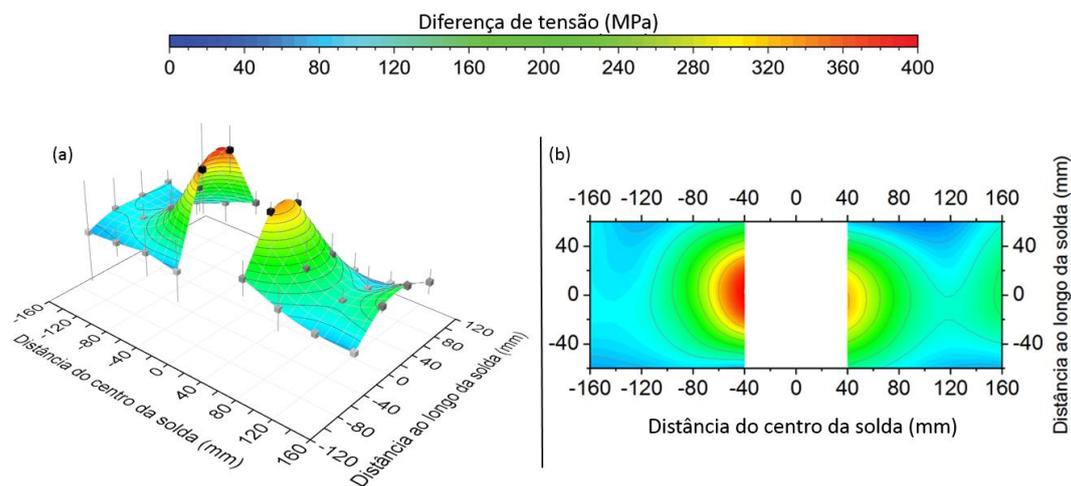


Figura 5.20 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) nas direções paralela e transversal ao cordão medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW. Fonte: COSTA, *et al.*, (2017).

### 5.7.2 Tensões Residuais GMAW-CW(20%)

A Tabela 5.15 apresenta os resultados da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) nas direções paralela e transversal ao cordão de solda após a soldagem GMAW-CW(20%), assim como, o desvio padrão (D.P) de cada medição.

Tabela 5.15 - Valores de tensões residuais médios obtidos por BA após a soldagem GMAW-CW(20%)

PTS	TENSÕES RESIDUAIS ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) MPa							
	Linha-A	D.P	Linha-B	D.P	Linha-C	D.P	Linha-D	D.P
-160	-12,58	20,15	<b>-18,75</b>	29,45	<b>-9,76</b>	40,11	-21,17	39,58
-120	-18,40	7,25	<b>-8,76</b>	17,11	<b>-7,24</b>	13,82	-29,93	3,66
-80	-50,79	20,44	<b>25,19</b>	73,46	<b>83,51</b>	32,11	2,62	11,59
-40	<b>-29,70</b>	<b>3,48</b>	<b>177,51</b>	<b>48,99</b>	<b>234,01</b>	<b>12,21</b>	<b>53,14</b>	<b>4,41</b>
0								
40	<b>64,33</b>	<b>16,87</b>	<b>260,65</b>	<b>30,26</b>	<b>217,75</b>	<b>9,49</b>	<b>-42,26</b>	<b>29,75</b>
80	-10,05	13,76	<b>93,05</b>	13,95	<b>72,23</b>	10,90	-40,06	25,43
120	-28,45	16,58	<b>21,13</b>	13,26	<b>-6,31</b>	10,53	-16,60	25,74
160	-16,37	16,74	<b>-9,36</b>	40,96	<b>-18,80</b>	26,69	-31,55	38,98

Fonte: Autor (2017).

De forma a se realizar também uma melhor visualização e análise dos dados da Tabela 5.15, gráficos em 3 e 2D foram elaborados para mostrar os perfis da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) nas direções paralela e transversal ao cordão de solda, respectivamente. Sendo assim, as Figuras 5.21 e 5.22 apresentam a distribuição da diferença dessas tensões residuais.

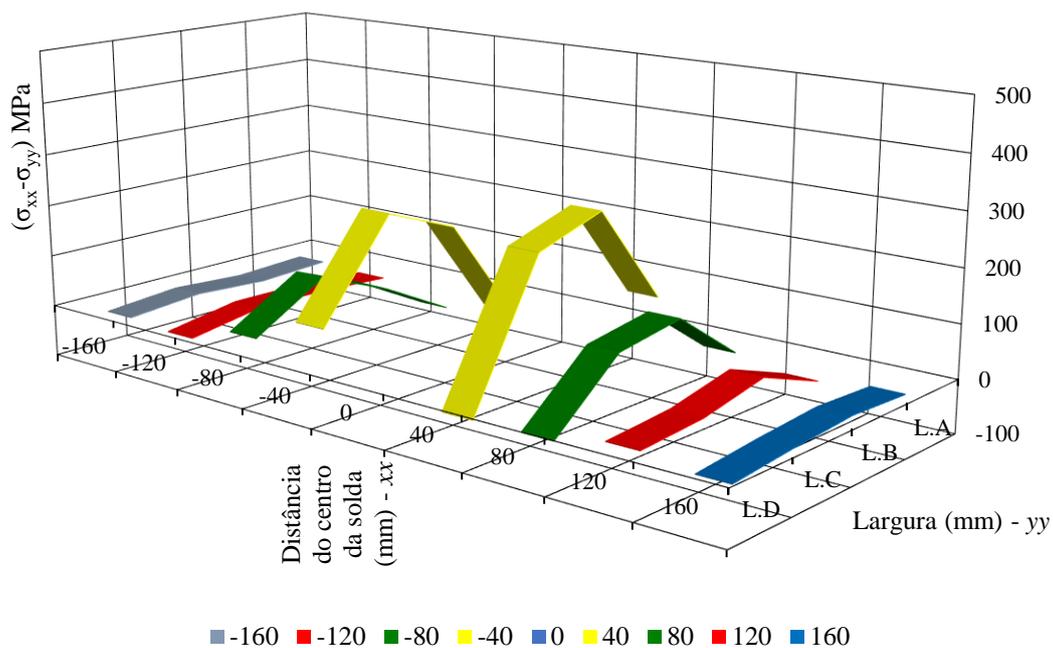


Figura 5.21 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção paralela ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(20%).

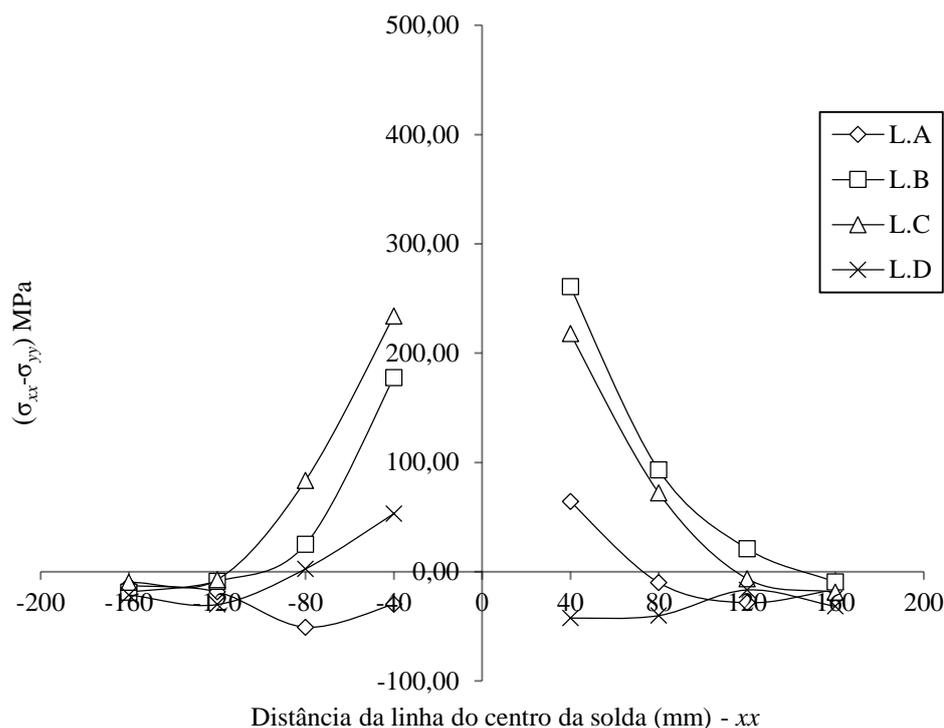


Figura 5.22 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção transversal ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(20%).

Conforme se verifica na Tabela 5.15 e na Figura 5.21, a diferença de tensões residuais trativas paralela ao cordão e a 40 mm, em ambos os lados deste, reduziram significativamente em relação aos valores encontrados pela soldagem GMAW nos mesmos pontos medidos, ou seja, no meio do comprimento do cordão. Além disso, observa-se também que à medida que os pontos analisados se afastam do cordão, ou seja, a 80, 120 e 60 mm, em ambos lados, ocorre uma redução relevante das tensões trativas, surgindo inclusive tensões compressivas nas extremidades. Os valores de tensões trativas máximas nos pontos analisados próximos ao cordão variaram na faixa de 177,51 a 260,65 MPa. Comparando-se os resultados de tensões trativas entre os processos GMAW e GMAW-CW para os pontos a 40 mm, em ambos os lados do centro do cordão das duas linhas centrais, verifica-se que ocorreu uma redução de aproximadamente 80 MPa, ou seja, 24%, com a adição de 20% de arame frio no processo GMAW-CW.

Uma justificativa para essa redução de tensões residuais trativas, provavelmente, está relacionada com a diminuição de transferência de calor ao metal de base devido à introdução de maior quantidade massa de arame frio ao processo. Afim de comprovar essa justificativa, mostra-se os resultados da energia de soldagem dos procedimentos de soldagem, determinados através da equação 5.1.

$$E = \eta \frac{(V.I)}{vs} \quad (5.1)$$

Nesta equação,  $E$  é energia de soldagem em KJ/mm;  $\eta$  é o rendimento do processo de soldagem, sendo igual a 80% para todos os procedimentos. Este rendimento é referente processo GMAW que varia na faixa de 75 a 95% (MARQUES *et al.*, 2016);  $V$  é tensão no arco, em Volts (V);  $I$  é a corrente de soldagem, em amperes (A) e  $vs$ , a velocidade de soldagem, em mm/s.

A Tabela 5.16 mostra as variações de corrente e energia de soldagem para os processos GMAW e GMAW-CW. Observa-se por essa tabela que ocorreu a diminuição da corrente e da energia de soldagem, na medida em que se muda do processo GMAW para o GMAW-CW com 20% de arame frio adicionado. Esta diminuição da corrente e energia de soldagem, mínima que seja, talvez estejam relacionadas com a diminuição de tensões, pois conforme se observa na Figura 5.21, com a introdução de 20% de arame frio, ocorreu a diminuição dos valores de tensões. Essa relação linear entre a energia de soldagem e tensões também foi encontrada por NITSCHKE-PAGEL e WOHLFAHRT (2002) e RAVISANKAR, *et al.*, (2014).

Tabela 5.16 - Variação de corrente e energia de soldagem dos processos GMAW e GMAW-CW.

Processo de soldagem	Corrente média (A)	Energia de Soldagem (kJ/mm)
<b>GMAW</b>	358,7	1,64
<b>GMAW-CW(20%)</b>	347,3	1,58
<b>VARIAÇÃO</b>	11,4	0,06
<b>GMAW-CW(40%)</b>	366,3	1,67
<b>VARIAÇÃO</b>	7,6	0,03

Fonte: Autor, (2017).

Em relação a diferença de tensões residuais analisada transversalmente ao cordão, observa-se pela Figura 5.22, que os valores dessa diferença a distância de 40 mm, em ambos os lados da solda, medidos nas linhas  $B$  e  $C$ , apresentam valores de tensões trativas máximas na faixa de 177,51 a 260,65 MPa e foram diminuindo à medida que os pontos analisados se distanciaram do cordão. Contudo, a mesma distância em ambos os lados do centro da solda, ou seja, a 40 mm do centro desta, mas em pontos analisados nas linhas  $A$  e  $D$ , ocorreu a alternância entre tensões trativas e compressivas, diferentemente do processo GMAW, que foram obtidos somente tensões trativas. As tensões trativas obtidas nas linhas  $A$  e  $D$  variaram na faixa de 53,14 a 64,33MPa e as compressivas na faixa de 29,70 a 42,26 MPa. De um modo geral, a presença de tensões trativas em valores baixos



<b>40</b>	<b>113,62</b>	<b>59,88</b>	<b>329,87</b>	<b>47,35</b>	<b>267,62</b>	<b>80,19</b>	<b>-19,35</b>	<b>78,69</b>
<b>80</b>	37,49	39,83	<b>132,84</b>	23,01	<b>127,36</b>	30,16	-9,78	48,37
<b>120</b>	-10,62	23,02	<b>37,85</b>	34,10	<b>23,01</b>	42,17	22,65	18,78
<b>160</b>	-39,36	63,49	<b>-9,95</b>	48,11	<b>-11,20</b>	30,58	-1,01	35,79

Fonte: Autor, (2017).

Com o objetivo de se realizar uma melhor visualização e análise dos dados da Tabela 5.17, gráficos em 3 e 2D foram elaborados para mostrar os perfis da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) nas direções paralela e transversal ao cordão de solda, respectivamente. Sendo assim, as Figuras 5.24 e 5.25 apresentam a distribuição da diferença dessas tensões residuais.

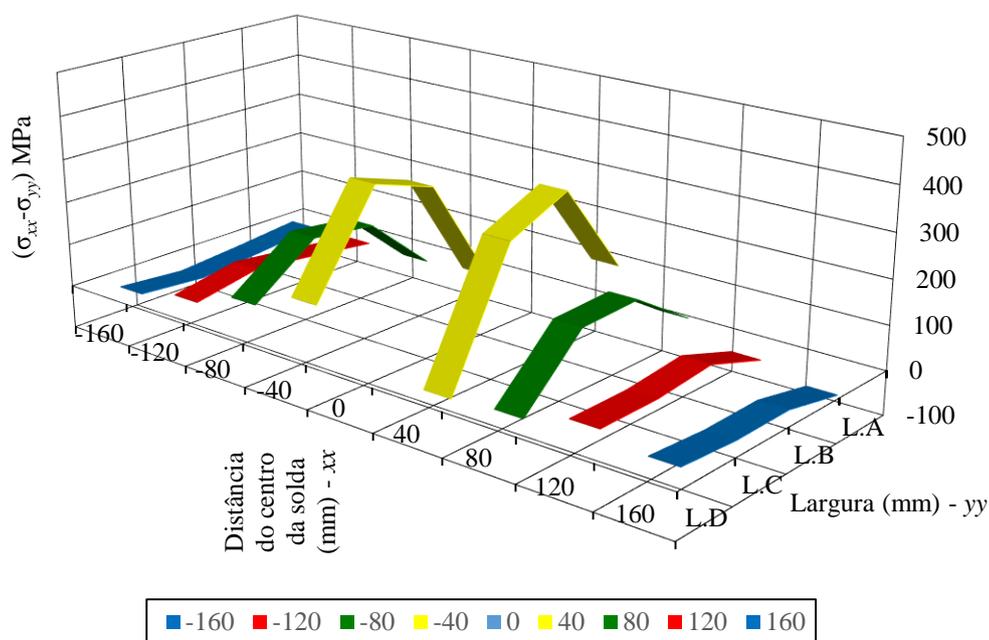


Figura 5.24 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção paralela ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(40%).

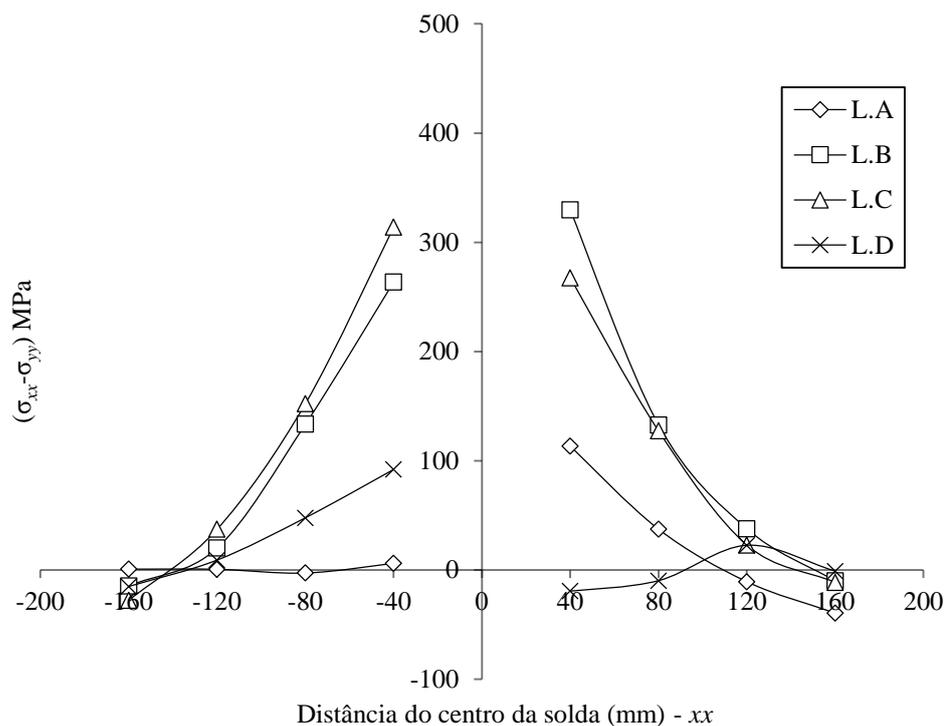


Figura 5.25 - Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) na direção transversal ao cordão de solda medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(40%).

Como se pode verificar na Tabela 5.17 e na Figura 5.24, a distribuição da diferença de tensões residuais trativas oriundos do processo GMAW-CW(40%) medidas paralelamente a 40 mm, em ambos os lados do centro do cordão de solda, não reduziram de forma significativa em relação aos valores encontrados pela soldagem GMAW no meio do comprimento do cordão, conforme a redução de tensões trativas observada no processo GMAW-CW(20%). Além disso, observa-se também que à medida que os pontos analisados se afastam, em ambos os lados do centro do cordão, ou seja, a 80, 120 e 160 mm deste, ocorreu uma redução enorme de tensões trativas, surgindo inclusive tensões compressivas, porém em níveis menores quando comparados com os valores originados pelo processo GMAW-CW(20%). Os valores de tensões trativas máximas nos pontos analisados próximos ao cordão variaram na faixa de 263,82 a 329,87 MPa. Comparando esses resultados com os obtidos pela soldagem GMAW, ocorreu uma redução de aproximadamente, 10 MPa, que corresponde a 3%, à medida que foi adicionado 40% de arame frio no processo GMAW-CW.

A justificativa para essa redução mínima de tensões residuais em relação ao processo GMAW, porém maior do que em relação ao processo GMAW-CW(20%), não ficou clara, pois, esperava-se o contrário, isto é, que as tensões residuais originadas após

a soldagem GMAW-CW(40%) reduzissem mais do que as tensões do processo GMAW-CW(20%). Contudo, para tentar justificar esses resultados, dois fatores principais podem ser levados em consideração. Primeiro, a energia de soldagem deste processo que aumentou em relação aos processos GMAW e GMAW-CW(20%), conforme mostrado na Tabela 5.16. Esse aumento da energia de soldagem é consequência da necessidade de mais corrente para fundir maior quantidade de massa de arame frio. Portanto, maior energia, maior transferência de calor ao metal de base e maior nível de tensões residuais.

Segundo, com a deposição de maior quantidade de massa realizada pela soldagem GMAW-CW(40%), a tendência era ocorrer maior deformação das amostras, mas como estas estavam restringidas, acredita-se que essa deformação foi impedida, gerando maiores níveis de tensões trativas em relação a soldagem GMAW-CW(20%), porém menor do que a soldagem GMAW. Mas, como justificar esses níveis de tensões intermediários entre os processos GMAW e GMAW-CW(20%)? Segundo Ribeiro *et al.*, (2017), para uma quantidade intermediária de arame frio adicionado, de 40 a 60%, a posição onde o arame frio funde muda intermitentemente entre o arco e a poça de fusão. Essa variação da posição do arame frio, ora fundindo no arco elétrico, ora na poça de fusão, provavelmente, pode alterar a transferência de calor ao metal de base e, portanto, gerar essa variação intermediária dos valores de tensões residuais para o procedimento de soldagem em questão.

Em relação a diferença de tensões analisadas transversalmente ao cordão, observa-se pela Figura 5.25, que os valores de tensões a distância de 40 mm do centro da solda, em ambos os lados, medidos nas linhas *B* e *C*, apresentam valores elevados de tensões trativas máximas na faixa de 263,82 a 329,87 MPa e foram diminuindo à medida que os pontos analisados se distanciaram do cordão. Contudo, nos mesmos pontos analisados nas linhas *A* e *D* ocorreu alternância entre tensões trativas e compressivas, diferentemente do processo GMAW, que foram somente tensões trativas. As tensões trativas obtidas nas linhas *A* e *D* variaram na faixa de 90,91 a 113,60 MPa e as compressivas na ordem de 19,35 MPa. Novamente, as tensões trativas baixas encontradas nessa região, pode ser devido ao alívio de tensões dessa região causada por uma maior expansão e contração da mesma.

Com o objetivo de destacar os resultados da Tabela 5.17, mostram-se nas Figura 5.26(a,b) gráficos em 3D de superfície, referentes às diferenças de tensões longitudinal e transversal ao cordão de solda para o processo de soldagem GMAW-CW(40%). Esses

gráficos confirmam a presença de tensões residuais trativas elevadas próximas ao cordão, semelhante ao processo GMAW, porém, diferente do processo GMAW-CW(20%).

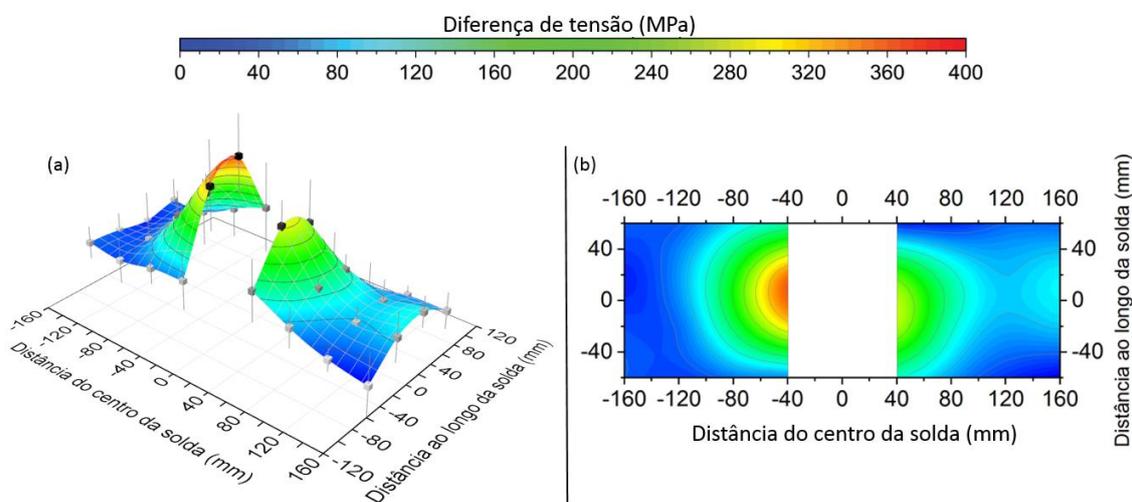


Figura 5.26- Distribuição da diferença de tensões residuais ( $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ ) nas direções paralela e transversal ao cordão medida por birrefringência acústica no metal de base para a soldagem GMAW-CW(40%).  
Fonte: COSTA, *et al.*, (2017).

## 5.8 TENSÕES RESIDUAIS DETERMINADAS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Os resultados de tensões residuais medidos em pontos ao longo das linhas *B* e *C*, na direção paralela ao cordão de solda, ou seja, na direção *yy*, referentes a cada amostra e a cada procedimento de soldagem, medidos por DRX, estão mostrados no Apêndice *H*. Contudo, nas Tabelas 5.18 a 5.20, são apresentadas somente as médias dessas tensões residuais. Já os valores de tensões residuais medidos na direção transversal ao cordão, ou seja, na direção *xx*, mostrados nas Tabelas 5.18 a 5.20, são referentes apenas a uma medição de uma única amostra de cada procedimento de soldagem. Esta única medição de tensões residuais na direção transversal foi consequência de problemas técnicos que ocorreram no equipamento.

## 5.8.1 Tensões Residuais GMAW

A Tabela 5.18 mostra os resultados de tensões residuais paralela ( $\sigma_{yy}$ ) e transversal ( $\sigma_{xx}$ ) ao cordão de solda referentes a soldagem GMAW obtidos em pontos das linhas B e C. Assim como, o erro médio de cada medição.

Tabela 5.18 - Valores de tensões residuais médios obtidos por DRX após a soldagem GMAW.

PTS	TENSÕES RESIDUAIS (MPa)							
	PARALELAS AO CORDÃO ( $\sigma_{yy}$ )				TRANSVERSAIS AO CODÃO ( $\sigma_{xx}$ )			
	Linha-B	Erro (+/-)	Linha-C	Erro (+/-)	Linha-B	Erro (+/-)	Linha-C	Erro (+/-)
<b>-160</b>	-240,87	15,70	-273,47	17,57	-241	9,4	-242,3	15,9
<b>-120</b>	-276,83	17,40	-261,23	19,57	-247,8	11,6	-279,6	14,0
<b>-80</b>	-298,33	18,67	-311,10	14,77	-268,5	9,6	-243,6	14,5
<b>-40</b>	-301,80	17,47	-298,90	20,07	-203,3	13,4	-226,7	12,4
<b>-20</b>	<b>416,10</b>	<b>17,83</b>	<b>430,50</b>	<b>21,13</b>	<b>-157,7</b>	<b>6,4</b>	<b>-126,9</b>	<b>13,9</b>
<b>0</b>	<b>215,20</b>	<b>11,67</b>	<b>195,40</b>	<b>22,90</b>	<b>-137,7</b>	<b>22,3</b>	<b>-133</b>	<b>12,9</b>
<b>20</b>	<b>408,10</b>	<b>24,03</b>	<b>426,50</b>	<b>22,70</b>	<b>-80,1</b>	<b>14,3</b>	<b>-158,5</b>	<b>16,8</b>
<b>40</b>	-315,93	19,23	-306,30	20,40	-147,7	14,7	-193,7	9,5
<b>80</b>	-269,00	17,53	-286,10	16,27	-229	14,5	-226,3	15,3
<b>120</b>	-251,23	17,93	-233,17	15,43	-280,5	10,0	-247,5	9,1
<b>160</b>	-228,53	14,00	-254,20	20,07	-263,5	13,8	-241	7,9

Fonte: Autor, (2017).

Com o objetivo de se obter uma melhor análise e visualização dos dados da Tabela 5.18, gráficos foram elaborados mostrando o perfil dessas tensões residuais, conforme mostram as Figuras 5.27 e 5.28. Na Figura 5.27, o eixo  $xx$  representa a distância em mm entre os pontos de medições em relação à linha central do cordão de solda, bem como o eixo ao longo do qual as tensões foram medidas. Já o eixo  $yy$ , representa os níveis de tensões residuais em MPa, assim como a direção de medição em relação ao cordão de solda, ou seja, paralela ao cordão de solda. Na Figura 2.28, o eixo  $xx$  representa também o eixo ao longo do qual as tensões foram medidas. O eixo  $yy$  representa os níveis tensões, mas para critério de informar a direção de medição das tensões, esse eixo é colocado na figura com  $xx$ , indicando que as tensões foram mediadas na direção transversal ao cordão de solda. As nomenclaturas L.B e L.C, significam resultados de tensões medidos em pontos ao longo das linhas B e C. Estas nomenclaturas foram adotadas para todos os resultados de tensões medidos por DRX.

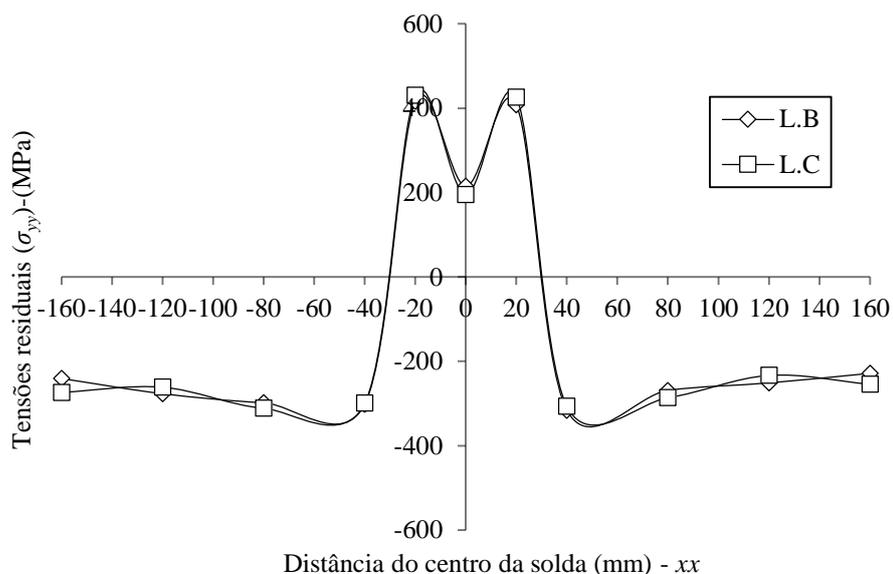


Figura 5.27 - Perfis da distribuição de tensões residuais paralelas ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW.

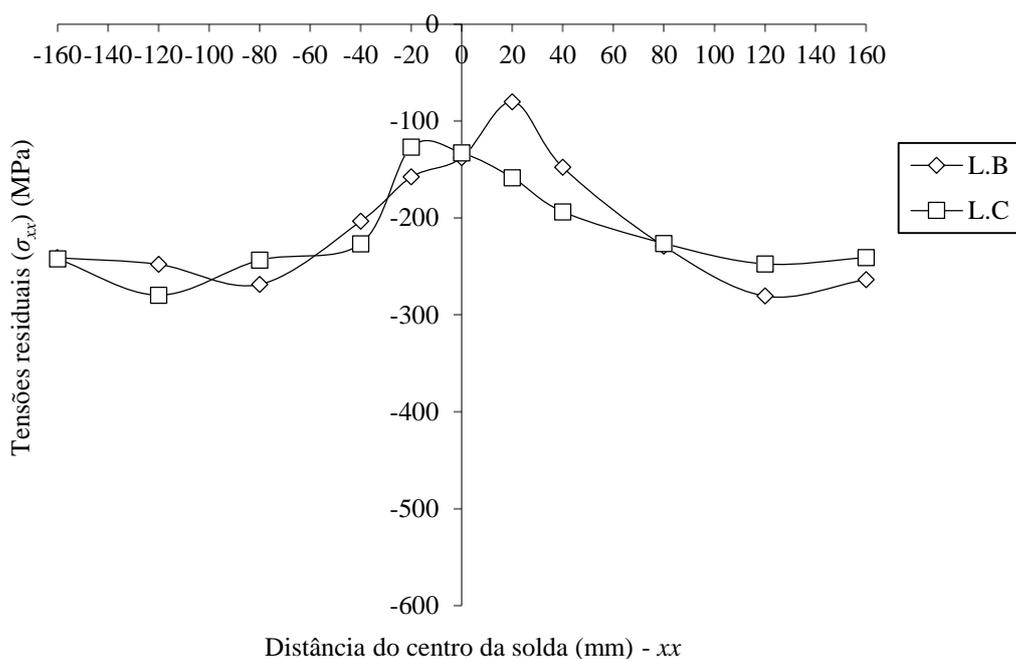


Figura 5.28 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW.

Conforme se observa na Tabela 5.18 e corroborado pela Figura 5.27, os valores de tensões paralelos ao cordão medidos por DRX apresentaram para ambas as linhas, no MB, tensões compressivas, enquanto na ZTA e ZF, tensões trativas (para valores menores que 40 mm ao centro do cordão). Os valores de tensões compressivas no MB variaram na faixa de 228,53 a 315,93 ± 19,23 MPa. As tensões residuais da superfície do metal de

base foram medidas antes da soldagem em vários locais nas placas de metal de base quando recebida e se verificou que as tensões de compressão foram de cerca de  $224,46 \pm 16,87$  MPa na direção longitudinal, ou seja, na direção paralela à solda e transversal à direção de laminação. Portanto, após a soldagem GMAW esses níveis de tensões compressivas aumentaram, ficando em torno de  $315,93 \pm 19,23$  MPa. Estes resultados, talvez signifiquem que a superfície do metal de base ficou mais comprimida após o resfriamento da soldagem GMAW. As tensões residuais de compressão medidas na superfície da placa antes da soldagem são resultantes do processo de fabricação do material, como a laminação (WOO *et al.*, 2011; 2013; 2016). Em um estudo detalhado, empregando várias técnicas de medição de tensão, Woo *et al.*, (2011; 2013; 2016) relataram a presença de tensões residuais compressivas nas superfícies de placas de 50 e 80 mm de espessura.

Na ZTA, as tensões residuais trativas variaram na faixa de 408,10 a  $430,50 \pm 24,03$  MPa e na ZF variaram na faixa de 195,40 a  $215,20 \pm 22,90$  MPa. O maior valor de tensão trativa nessa região foi de  $430,50 \pm 24,03$  MPa, que ultrapassou em 25,78% da tensão de escoamento do MB, que foi de  $342,26 \pm 23,80$  MPa. Em relação ao decréscimo de tensão trativa no centro da face da ZF, comparando-o ao valor da ZTA, muito provavelmente, deve-se ao fenômeno de transformação de fases dessas regiões.

Em relação as tensões transversais ao cordão, verifica-se pela Tabela 5.18 e pela Figura 5.28, que as tensões no MB foram compressivas, na faixa de 147,7 a  $280,0 \pm 10,0$  MPa. Em medições na superfície do metal de base antes da soldagem nessa direção e em vários locais nas placas, obteve-se tensões de compressão, as quais foram cerca de  $262,63 \pm 5,82$  MPa. Esse resultado também foi semelhante ao obtido por WOO *et al.*, (2011; 2013; 2016). Na ZTA e na ZF, as tensões também foram compressivas, na faixa de 80,10 a  $158,50 \pm 16,80$  MPa e 133,0 a  $137,7 \pm 22,30$  MPa, respectivamente, diferentemente da direção paralela que foram trativas. Esses resultados de tensões compressivas, tanto na ZTA, quanto na ZF, não esperado, pois de acordo com a literatura, nessas regiões em geral, as tensões residuais devem ser de natureza trativas, principalmente, na zona fundida. Porém, deve ser levado em consideração que as tensões residuais geradas pelos processos de soldagem são consequências da interação entre vários fatores, como tempo, temperatura, deformação e microestrutura (BHADESHIA, 2002). Dessa forma, é impossível afirmar com clareza qual o fator preponderante gerador de tensões em um processo de soldagem.

## 5.8.2 Tensões Residuais GMAW-CW(20%)

A Tabela 5.19 mostra os resultados de tensões residuais paralela ( $\sigma_{yy}$ ) e transversal ( $\sigma_{xx}$ ) ao cordão de solda referentes a soldagem GMAW-CW(20%), obtidos em pontos das linhas B e C. Assim como, o erro médio de cada medição. Nas Figuras 5.29 e 5.30, mostram-se os gráficos referentes a essa tabela, de forma a realizar uma análise mais adequada desse processo de soldagem.

Tabela 5.19 - Valores de tensões residuais médios obtidos por DRX após a soldagem GMAW-CW(20%).

PTS	TENSÕES RESIDUAIS (MPa)							
	PARALELAS AO CORDÃO ( $\sigma_{yy}$ )				TRANSVERSAIS AO CODÃO ( $\sigma_{xx}$ )			
	Linha-B	Erro (+/-)	Linha-C	Erro (+/-)	Linha-B	Erro (+/-)	Linha-C	Erro (+/-)
<b>-160</b>	-216,53	19,07	-212,03	18,43	-277,5	7,6	-289,3	13,4
<b>-120</b>	-172,33	17,87	-239,97	19,73	-279,1	7	-248	8,6
<b>-80</b>	-173,00	18,53	-239,63	20,23	-257,1	11,4	-267,3	13,8
<b>-40</b>	-223,47	17,27	-268,93	19,27	-231,8	10,2	-200,1	8
<b>-20</b>	<b>307,60</b>	<b>21,37</b>	<b>260,47</b>	<b>20,27</b>	<b>-123,8</b>	<b>14,3</b>	<b>-91,7</b>	<b>7,8</b>
<b>0</b>	<b>45,47</b>	<b>14,03</b>	<b>55,37</b>	<b>16,87</b>	<b>-84,7</b>	<b>13,2</b>	<b>-128,3</b>	<b>11,6</b>
<b>20</b>	<b>314,70</b>	<b>17,77</b>	<b>286,37</b>	<b>18,63</b>	<b>-107,2</b>	<b>4,6</b>	<b>-91,8</b>	<b>9,7</b>
<b>40</b>	-186,40	19,63	-238,97	17,90	-267,5	9,5	-225,7	13,5
<b>80</b>	-228,30	19,07	-168,63	19,50	-258,6	16,8	-296,3	3,5
<b>120</b>	-71,33	13,47	-135,73	18,30	-260	6,5	-221,5	6,4
<b>160</b>	-151,87	16,00	-81,53	15,90	-306,7	6,6	-275,5	5,9

Fonte: Autor, (2017).

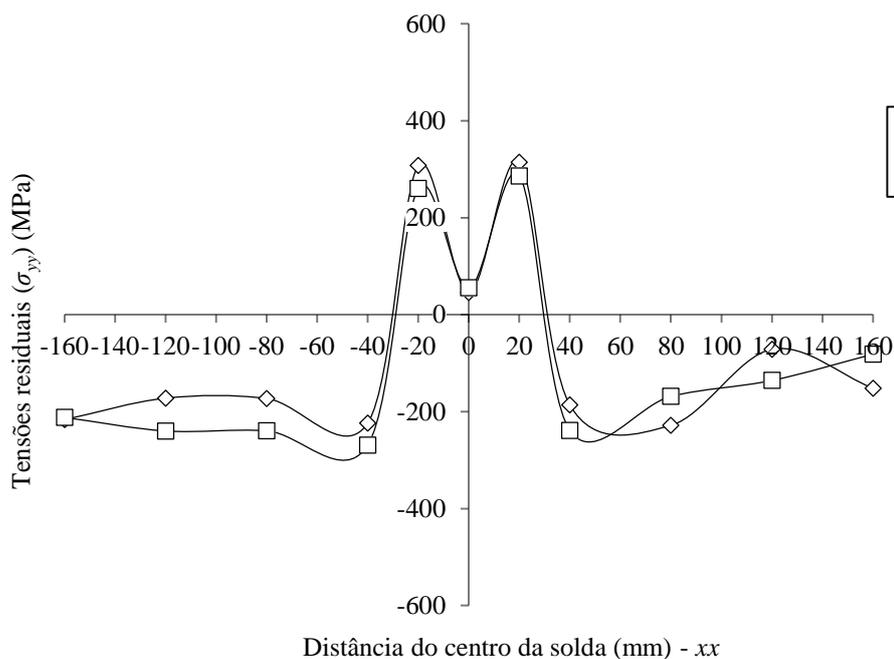


Figura 5.29 - Perfis da distribuição de tensões residuais paralelas ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW-CW(20%).

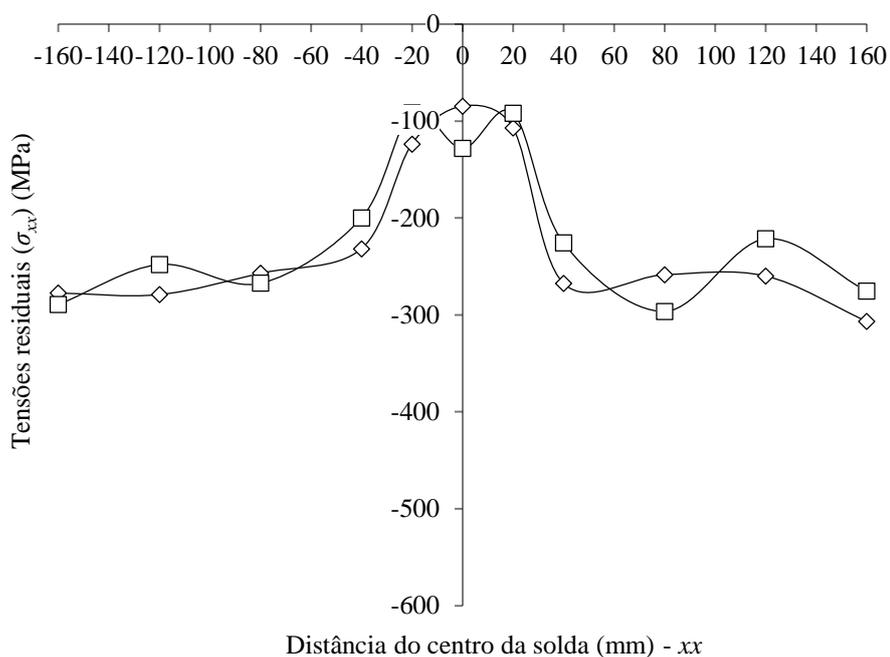


Figura 5.30 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW-CW(20%).

Conforme se observa na Tabela 5.19 e ilustrado pela Figura 5.29, os valores de tensões paralelos ao cordão medidos por DRX apresentaram, para ambas as linhas, no MB tensões compressivas, enquanto na ZTA e ZF, tensões trativas. Os valores de tensões

compressivas no MB variaram na faixa de 71,33 a 268,93  $\pm$  19,27 MPa. Enquanto na ZTA variaram na faixa de 260,47 a 314,70  $\pm$  17,77 MPa e na ZF variou na faixa de 45,47 a 55,37  $\pm$  16,87 MPa. Comparando esses resultados com os obtidos pela soldagem GMAW, observa-se que no MB ocorreu uma redução de 47 a 157,20 MPa; na ZTA de 115,8 a 147,30 MPa e na ZF de 149,93 a 159,80 MPa. Francis *et al.*, (2009) afirmam que, quando se compara a distribuição de tensões residuais para condições de entrada de calor baixa e alta, a menor entrada de calor leva a tensões residuais menores na ZTA e paralelas ao cordão. Isto também foi encontrado por Woo *et al.*, (2013), ao comparar condições de entrada de calor baixas e extremamente altas. Além disso, Woo *et al.*, (2013) verificaram que à medida que a entrada de calor muda de valores baixos para valores altos, o máximo em tensões residuais de tração muda do centro da solda para a ZTA.

Em relação as tensões transversais, observa-se pela Tabela 5.19 e pela Figura 5.30, que para ambas as linhas, tanto no MB, quanto na ZTA e ZF, as tensões residuais se comportaram de natureza compressivas. No MB, variaram na faixa de 200,10 a 306,70  $\pm$  6,6 MPa. Enquanto na ZTA variaram na faixa de 91,80 a 123,80  $\pm$  14,30 MPa e na ZF variou na faixa de 84,7 a 128,3  $\pm$  11,60 MPa. Comparando esses resultados com os obtidos pela soldagem GMAW, observa-se que no MB ocorreu um leve aumento das tensões compressivas de 26,20 a 52,40 MPa. Enquanto na ZTA e ZF, ocorreu uma leve redução de tensões compressivas na ordem de 35 e 53 MPa, respectivamente. Baseado nesses resultados, não foi possível observar de forma clara a influência da adição de 20% de arame frio em relação ao processo GMAW, nas regiões da ZTA e ZF.

### 5.8.3 Tensões Residuais GMAW-CW(40%)

A Tabela 5.20 mostra os resultados de tensões residuais paralelas ( $\sigma_{yy}$ ) e transversais ( $\sigma_{xx}$ ) ao cordão de solda referentes a soldagem GMAW-CW(40%), obtidos em pontos das linhas B e C. Assim como, o erro médio de cada medição. E nas Figuras 5.31 e 5.32, mostra-se os gráficos referentes a essa tabela, de forma a realizar uma análise mais adequada desse processo de soldagem.

Tabela 5.20 - Valores de tensões residuais médios obtidos por DRX após a soldagem GMAW-CW(40%).

PTS	PARALELAS AO CORDÃO ( $\sigma_{yy}$ )				TRANSVERSAIS AO CODÃO ( $\sigma_{xx}$ )			
	Linha-B	Erro (+/-)	Linha-C	Erro (+/-)	Linha-B	Erro (+/-)	Linha-C	Erro (+/-)
	<b>-160</b>	-221,13	14,63	-239,33	19,30	-243,3	9,1	-276,5
<b>-120</b>	-261,90	18,30	-250,00	18,93	-236,6	9,8	-258	10
<b>-80</b>	-286,60	13,93	-271,33	20,37	-260,5	8	-284,9	12,4
<b>-40</b>	-260,33	20,33	-272,57	20,13	-261,1	11,4	-174,1	15,7
<b>-20</b>	<b>201,63</b>	<b>21,40</b>	<b>177,03</b>	<b>20,03</b>	<b>-75,3</b>	<b>14,2</b>	<b>-94,2</b>	<b>20,4</b>
<b>0</b>	<b>14,80</b>	<b>16,93</b>	<b>29,37</b>	<b>20,90</b>	<b>-238,1</b>	<b>14,1</b>	<b>-259,3</b>	<b>19,3</b>
<b>20</b>	<b>172,30</b>	<b>18,93</b>	<b>174,27</b>	<b>23,03</b>	<b>-66,8</b>	<b>20,8</b>	<b>-65,5</b>	<b>5,8</b>
<b>40</b>	-275,40	16,43	-285,50	14,07	-190,7	6,1	-206,8	10,3
<b>80</b>	-269,67	15,40	-259,40	17,00	-276,7	9,9	-261,9	12
<b>120</b>	-254,17	18,37	-272,73	20,33	-292,7	14,3	-269,7	7,4
<b>160</b>	-250,57	11,90	-262,57	16,30	-264,6	14,5	-281,9	10,1

Fonte: Autor (2017).

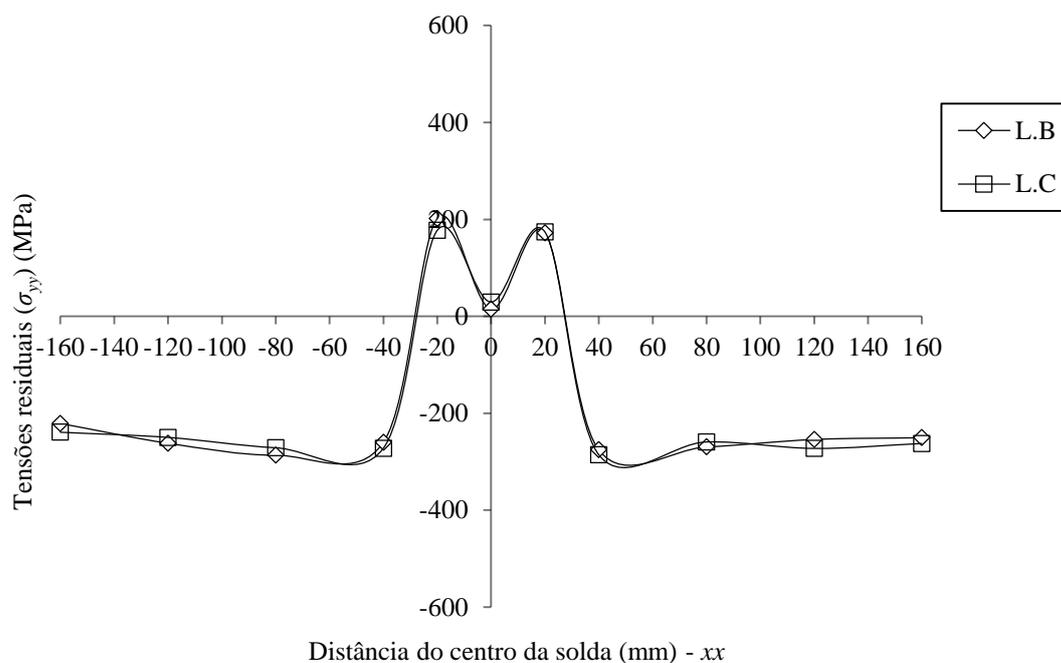


Figura 5.31 - Perfis da distribuição de tensões residuais paralelas ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW-CW(40%).

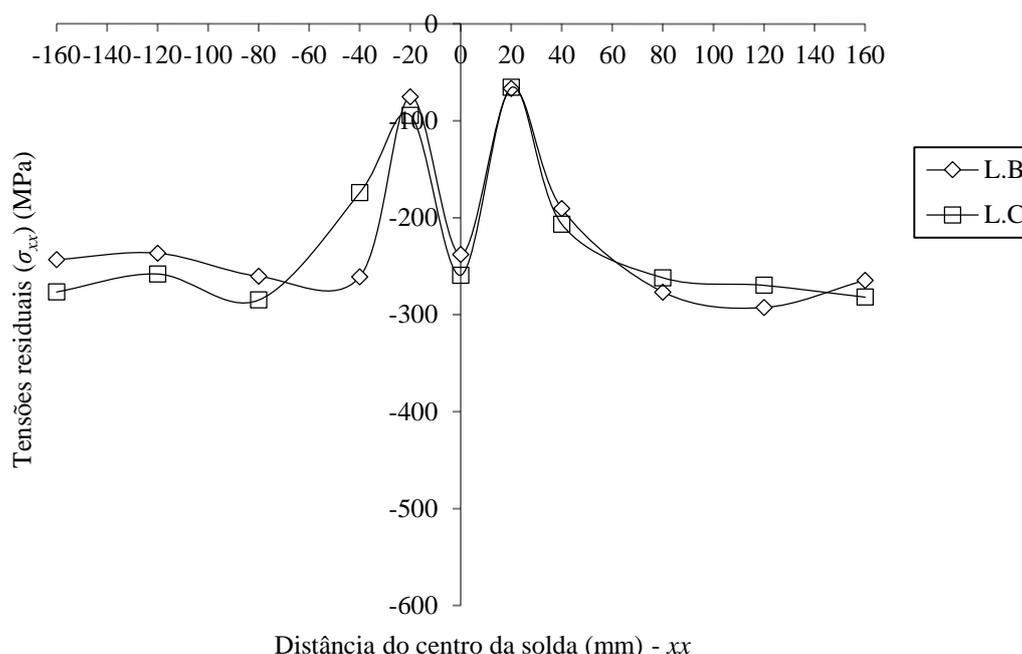


Figura 5.32 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após a soldagem GMAW-CW(40%).

Em relação ao processo de soldagem GMAW-CW(40%), verifica-se pelos dados da Tabela 5.20 e pela Figura 5.31, que os valores de tensões paralelas ao cordão medidos por DRX apresentaram, para ambas as linhas no MB, tensões compressivas, enquanto na ZTA e ZF, tensões trativas. Os valores de tensões compressivas no MB variaram na faixa de 221,13 a  $286,6 \pm 13,93$  MPa. Enquanto na ZTA, as tensões trativas variaram na faixa de 172,30 a  $201,63 \pm 21,240$  MPa e na ZF variou na faixa de 14,80 a  $29,37 \pm 20,90$  MPa. Comparando esses resultados com os obtidos pela soldagem GMAW, observa-se que no MB ocorreu uma redução de tensões compressivas na faixa de 7,47 a 29,33 MPa; na ZTA de 228,87 a 235,80 MPa e na ZF de 180,6 a 185,83 MPa. A partir desses resultados, concluiu-se que com o aumento de 40% de massa do arame frio, as tensões paralelas no MB e na ZF reduziram consideravelmente, particularmente na ZF, que pode ser considerada, aproximadamente 0 MPa. Mas na ZTA, essa redução não foi tão significativa, permanecendo em torno de  $201,63 \pm 21,40$  MPa.

A diminuição de tensões residuais trativas paralelas ao cordão devido a adição de arame frio pode ser melhor explicada pelos resultados de Marques *et al.*, (2017). De acordo com a Tabela 5 do referido autor, foi relatado que para as juntas fabricadas utilizando GMAW-CW, a maior parte das trincas que promoveu a fratura por fadiga iniciou na região da ZTA. Enquanto que para juntas produzidas utilizando GMAW,

somente um pequeno número de juntas fraturadas devido as trincas se iniciaram na nessa região da ZTA. Como é conhecido, os esforços de tração promovem o início e o crescimento da fissura durante a carga de fadiga, por isso, parece razoável associar o início e propagação de fissuras mais frequentes na região da ZTA para as juntas soldadas pelo processo GMAW-CW, devido a menos tensões residuais de compressão nessa região.

Em relação as tensões transversais, observa-se pela Tabela 5.20 e pela Figura 5.32, que para ambas as linhas, tanto no MB, quanto na ZTA e ZF, as tensões residuais se comportaram de natureza compressivas. No MB, essas tensões variaram na faixa de 174,10 a  $292,70 \pm 14,30$  MPa; na ZTA variaram na faixa de 65,50 a  $94,20 \pm 20,40$  MPa e na ZF variaram na faixa de 238,10 a  $259,30 \pm 19,30$  MPa. Comparando esses resultados com as tensões obtidas pela soldagem GMAW, observa-se que no MB ocorreu um leve aumento das tensões compressivas em torno de 13,10 MPa, indicando que ocorreu uma leve compressão dessa região. Na ZTA ocorreu uma redução de tensões compressivas na ordem de 14,60 a 64,30 MPa, tendendo surgir, possivelmente, tensões trativas nessa região. Na ZF, o nível de tensões compressivas aumentou na faixa de 105,10 a 121,60 MPa, valores estes próximos ao do MB. Estes resultados não eram esperados, e tampouco são comentados, visto que, esperava-se que os mesmos, no mínimo, acompanhassem os resultados dos processos GMAW e GMAW-CW(20%).

Para se ter uma noção real da influência da adição de arame frio no nível de tensões residuais, medidos por difração de raio X, mostram-se nas Figuras 5.33 e 5.34 gráficos representando a média das tensões residuais das duas linhas analisadas em cada direção referentes ao cordão de solda, ou seja, nas direções paralela e transversal ao mesmo, para cada procedimento de soldagem. Como se observa, as tensões trativas na ZTA e ZF, medidas na direção paralela ao cordão reduziram consideravelmente à medida que o arame frio foi adicionado. Assim como, as tensões compressivas medidas no MB. Já na direção transversal ao cordão, na ZTA e ZF, as tensões se comportaram de forma compressivas e no MB, também foram compressivas, em níveis maiores do que antes da soldagem.

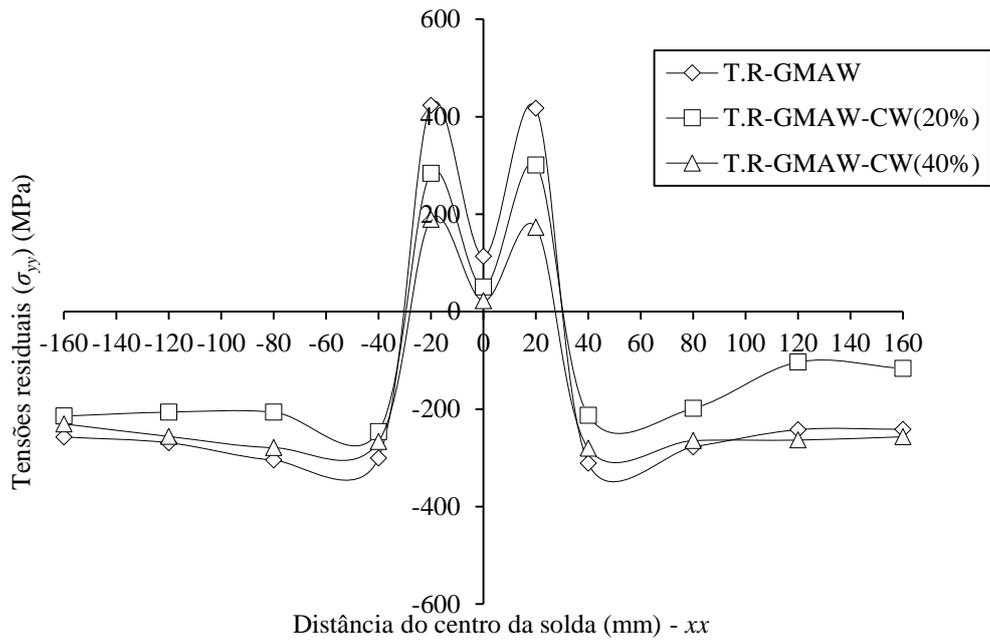


Figura 5.33 - Perfis da distribuição de tensões residuais paralelas ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após os três procedimentos de soldagem.

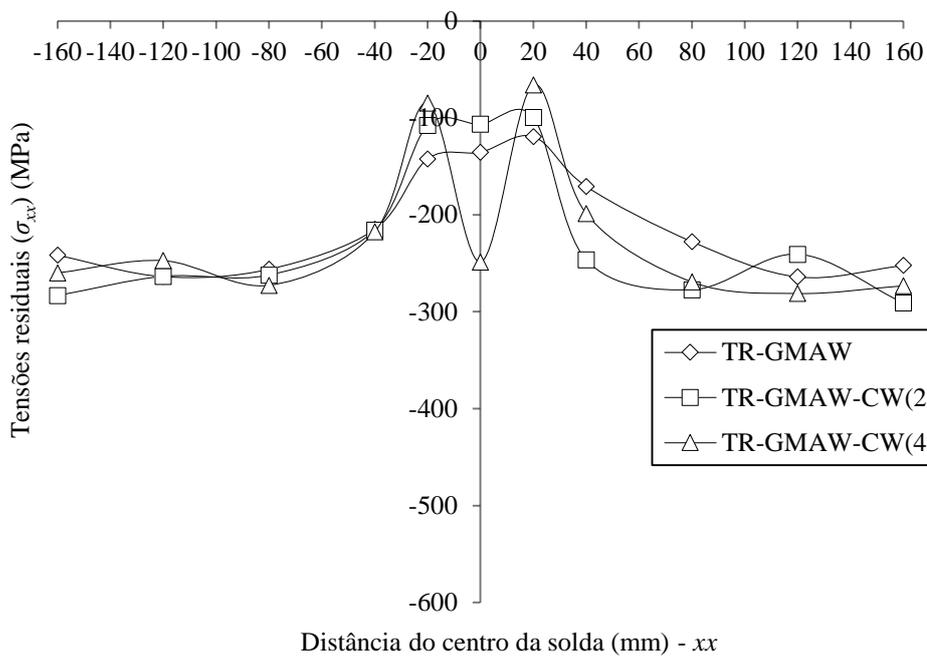


Figura 5.34 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX após os três procedimentos de soldagem.

### 5.9 Comentários dos resultados de Tensões Residuais medidos por Birrefringência Acústica e Difração de Raio X

Embora o objetivo desta tese não seja a comparação entre as duas técnicas de medição de tensões residuais, torna-se importante colocar alguns comentários (motivos) que tentem nortear os leitores quanto aos resultados obtidos pelas técnicas, os quais foram completamente diferentes entre si. Nesse contexto, a Figura 5.35 mostra essa diferença, onde se observando os resultados no metal de base, nos pontos de  $\pm 40$  a  $\pm 160$ , os quais foram medidos por ambas as técnicas, verifica-se que, independentemente do processo, para a difração de raio X as tensões se comportaram de forma compressiva e para a birrefringência acústica de forma trativa, em quase em sua totalidade. Ressalta-se que os resultados das Figuras 5.33 e 5.34, assim como da Figura 5,35 são a média das tensões das duas linhas centrais, B e C, já que foram as únicas linhas medidas por DRX.

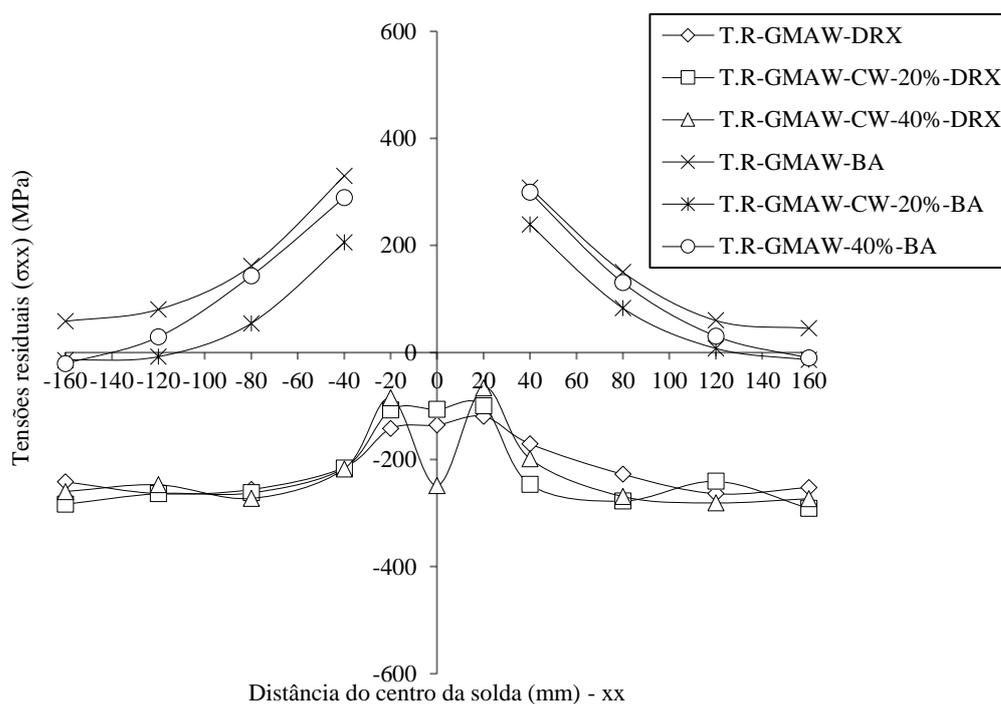


Figura 5.35 - Perfis da distribuição de tensões residuais transversais ao cordão de solda obtidos pela técnica de DRX e BA após os três procedimentos de soldagem.

Neste sentido, analisando os pontos  $\pm 40$  mm, observa-se que os resultados de tensões por DRX foram todos compressivos semelhantes aos do metal de base antes da soldagem,  $224,46 \pm 16,87$  MPa, enquanto para a BA, as tensões foram todas trativas, onde

a mínima foi em torno de 200 MPa. Estes resultados, teoricamente, deveriam ser semelhantes por estarem a mesma distância do centro do cordão e sofrerem o mesmo efeito de contração no resfriamento já que estão no metal de base, porém são completamente opostos. Então, baseado nisso, pode-se dizer que, provavelmente, o principal motivo a ser considerado pela diferença dos resultados de tensões é a profundidade de análise das técnicas, que para a difração de raio X, a análise ocorreu a poucos micrometros de profundidade da superfície das amostras, ou seja, em torno de 7 micrometros, baseado no manual do equipamento e esta técnica mediu na realidade, as tensões superficiais pré-existente do processo de fabricação da chapa. Já para a birrefringência acústica, a análise ocorreu ao longo de toda a espessura das amostras. Portanto, esses resultados são tensões que os processos geraram ao longo da espessura do material.

Outro motivo, além da área do ponto analisado ( $7 \text{ mm}^2$  e  $42 \text{ mm}^2$  para o DRX e BA, respectivamente) que concorreu também para essa diferença é a forma como essas tensões são lidas no ponto analisado, ou seja, para a DRX essas tensões principais são pontuais em relação a uma dada direção,  $\sigma_{xx}$  ou  $\sigma_{yy}$ . Por outro lado, os resultados das tensões obtidos por BA é uma diferença dessas tensões principais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ), observadas também paralela e transversalmente ao cordão. Em virtude dessas diferenças de análises no ponto pelas técnicas, torna-se evidente que os resultados obtidos pelas mesmas jamais poderiam ser semelhantes e, portanto, não podem ser comparados e sim complementados.

Contudo, para a análise de tensões residuais em juntas soldadas pelas duas técnicas, acredita-se que a birrefringência acústica seja mais adequada, visto que essa técnica consegue ser sensível as tensões presentes em todo o interior do material quando a onda ultrassônica se propaga pelo mesmo. Além dos equipamentos e acessórios serem mais baratos e de fácil operação em comparação ao difratômetro de raio X.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Este trabalho que teve como objetivo determinar e avaliar tensões residuais geradas pelos processos de soldagem GMAW e GMAW-CW, apresentam as seguintes conclusões:

- ✓ A chapa do aço naval ASTM A-131 como recebido apresentou uma distribuição não homogênea da anisotropia, dessa forma, para calcular as tensões residuais por BA foi utilizado o BA0 pontual.
- ✓ As medições por difração de raio X mostraram que com a adição de arame frio as tensões residuais longitudinais diminuem na ZF, na ZTA e na região ao entorno do cordão. Enquanto na direção transversal não se observou de forma clara a influência do arame frio nas tensões residuais, principalmente na ZTA.
- ✓ As medidas por birrefringência acústica mostraram que a diferença entre as tensões residuais longitudinal e transversal tenderam a diminuir quando o arame frio foi adicionado, em comparação com nenhuma adição de arame frio. Esses resultados sugerem que a adição de arame frio diminui a quantidade de calor transferida ao metal de base e, conseqüentemente, as tensões residuais de soldagem.
- ✓ Apesar de utilizarem metodologias de análises diferentes, as técnicas de birrefringência acústica e difração de raio X detectaram a redução de tensões residuais ao ser adicionado o arame frio no processo GMAW.
- ✓ Os resultados de tensões residuais são promissores, pois mostram que a alimentação de arame frio em um arco elétrico GMAW, gerando um novo processo de soldagem, o GMAW-CW, reduz o nível de tensões residuais, sem comprometer a produtividade do processo, uma vez que mais massa é depositada.

## CAPÍTULO 7

### PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados apresentados nesta tese, e também a partir de algumas observações, novas oportunidades de pesquisas e desenvolvimentos dentro desta área podem ser sugeridas, tais como:

- ✓ No trabalho foi utilizado um acoplante, cujo valor financeiro para a aquisição do mesmo é elevado. Em vista disso, propõe-se desenvolver acoplantes fabricados a partir de alguns produtos regionais com o objetivo de reduzir custos em relação ao acoplante utilizado. Além disso, ter acesso com maior facilidade ao mesmo.
- ✓ Os resultados de tensão encontrados no trabalho, tanto por birrefringência quanto por difração de raio X apresentam a influência inicial da textura e tensão devido ao processo de fabricação da chapa. Dessa forma, para avaliar as tensões residuais somente dos processos de soldagem, sugere-se que o material como recebido passe por tratamento térmico de alívio de tensões antes da soldagem, assim, após a soldagem, as tensões resultantes medidas seriam menos influenciadas pelas pré-existentes.
- ✓ Como os pontos medidos por birrefringência acústica apresentaram um espaçamento de 40 mm entre si, sugere-se que esse espaçamento diminua, ou seja, aumenta-se a resolução espacial entre as medições para verificar se ocorre variação significativa do nível de tensão ao longo do material analisado.
- ✓ Como a birrefringência determina a tensão ao longo da espessura do material, sugere-se também determinar as tensões residuais por outros métodos que analisam toda a espessura do material, como por exemplo, os métodos de difração de nêutrons e do contorno.

- ✓ Afim de consolidar os resultados de tensões residuais obtidos pelos três procedimentos de soldagem, sugere-se simular o perfil dessas tensões para cada procedimento.
  
- ✓ Como no Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos-UFPA está sendo desenvolvido estudos em juntas soldadas usando o chanfro estreito (*Narrow-gap*), propõe-se avaliar o nível de tensão nesses tipos de juntas por Birrefringência acústica e difração de raio X. Certamente, superando as limitações encontradas nesta tese.
  
- ✓ No cordão de solda não foi medido tensão por birrefringência acústica devido ao problema de acoplamento do transdutor, assim, como forma de eliminar esse problema, propõe-se utilizar sapatas de acrílico ou de outros materiais no cordão para medir a tensão do mesmo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, D. R; SAYERS, C. M., "The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique", **Ultrasonics**, pp. 179-188, July 1984.

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por ultrassom: Aspectos básicos**. Associação brasileira de ensaios não destrutivos. 2014. Disponível em: <[http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US\\_maio-2014%20\(1\).pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20(1).pdf)>. Acesso em: 20 out. 2015.

ANDRINO, Marcilio Haddad. **Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos utilizando o efeito acustoelástico**: 2003. 186p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ARAÚJO, D. B. **Estudo de Distorções em Soldagem com Uso de Técnicas Numéricas e de Otimização**, 201 2. 262 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

ASM Handbook. Nondestructive evaluation and quality control. **ASM International**, v. 17, 1989.

ASTM E494-15, **Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM A131/A131M - 14, **Standard Specification for Structural Steel for Ships**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM A131/A131M - 15, **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015a.

ASSUNÇÃO, P.D.C. **Estudo da viabilidade do processo de soldagem GMAW-DCW (DOUBLE COLD WIRE)**. 2013. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

AWS (American Welding Society). AWS B4.0.92: **Standard Methods for Mechanical Testing of Welds**. Miami: AWS; 1992.

AWS (American Welding Society), **Gas metal arc welding** .Welding Handbook. 8 edição. v. 2. 1997.

AWS (American Welding Society). Welding Handbook. **Welding science and technology**. 9 edição. v. 1. 2001.

AWS (American Welding Society). AWS A3.0M/A3.0:2010: **standard welding terms and definition**. Miami: AWS; 2010.

BACELAR, A. R. C.; FERRAZ, A. C. **Estudo da Viabilidade Operacional do Processo de Soldagem MAG com Alimentação Adicional de um Arame Frio**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia. Belém, 2005.

BARRON, Randall F.; BARRON, Brian R. **Design for thermal stresses**. John Wiley & Sons, 2011.

BHADESHIA, H. K. D. H. Material factors. **ASM International, Member/Customer Service Center, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 2002.**, p. 3-10, 2002.

BITTENCOURT, M. S. Q. **Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido da onda ultrassônica e análise do estado de tensões em materiais**

**metálicos pela técnica da birrefringência acústica.** 2000. 115f. Tese (Doutorado) - Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BUENOS, Alexandre Aparecido. **Avaliação de tensões residuais gerada pelo processo de usinagem utilizando acoustoelasticidade.** 2010. 205p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRAY, D.E., STANLEY, R.K., **Nondestructive Evaluation a Tool in Design manufacturing and Service.** Revised Edition. ISBN-0-8493-2655-9, CRC Press, 1997.

BROOKS, S. J. **Ultrasonic biaxial stress measurement for evaluating the adequacy of gusset plates.** 2014. 108f. A Thesis presented to the Faculty of the Graduate School at the University of Missouri – Columbia.

CABRAL, Tércio dos Santos. **Influência dos procedimentos e processos de soldagem MAG na redução de deformações em painéis de estruturas navais.** 2011. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução.** Rio de Janeiro: LTC, 9 ed., 2016.

CLAPHAMA, L.; ABDULLAH, K.; JESWIET, J. J., *et al.* Neutron diffraction residual stress mapping in same gauge and differential gauge tailor-welded blanks. **J Mater Process Technol**, 2004; 148(2):177-85.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderurgicos Comuns**. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

COSTA, E. S. et al. Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 22 , n. 8, p. 706 – 713, 2017.

CRECRAFT, D.I. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. **J. Sound Vib.** (1967) 5 (I), 173-192.

CULLITY, Bernard Dennis. **Elements of X-ray Diffraction**. 1956.

DANN, J. A.; DAYMOND, M. R.; JAMES, J. A. J.; SANTISTEBAN, J. R.; EDWARDS, L. A new diffractometer optimized for stress measurements. **ENGIN-X Proc. ICANS XVI 2003**; 1: 231-238.

DUTRA, Marco Aurélio Monteiro. **Avaliação acustoelástica do aço 20MnMoNi55, material estrutural do vaso de pressão dos reatores nucleares de Angra II e III**. 2009. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) - Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2009.

ESTEFEN, Segen; GUROVA, Tatiana; CASTELLO, Xavier, LEONTIEV, Anatoli. Análise de evolução do estado das tensões residuais de soldagem. **Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção**. Rio de Janeiro, 2008.

FONSECA, Manoel Antônio da Costa. **Avaliação acustoelástica de tubos octg do tipo casing Api 5ct grau n80q soldados com o processo ERW/HFIW**. 2012. 134p. Dissertação (Mestrado)-engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FRANCIS, J. A.; TURSKI, M.; WITHERS, P. J. Measured residual stress distributions for low and high heat input single weld beads deposited on to SA508 steel. **Materials Science and Technology**, v. 25, n. 3, p. 325-334, 2009.

FRAGA, Ricardo dos Santos. **Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas**. 2007. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

FUKUOKA, H.; TODA, H.; NAKA, H. Nondestructive residual-stress measurement in a wide-flanged rolled beam by acoustoelasticity. **Experimental Mechanics**, v. 23, n. 1, p. 120-128, 1983.

GALATOLO, R; LANCIOTTI, A. Fatigue crack propagation in residual stress field of welded plates. **International Journal of Fatigue**, vol. 19, (1) (1997) pp. 43-49.

HAUK, Viktor (Ed.). **Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: Evaluation-Application-Assessment**. Elsevier, 1997.

HELLIER, Charles J. **Handbook of nondestructive evaluation**. McGRAW-HILL, 2003.

HIBINO, Alberto Hisashi, **Estudo de tenacidade da zona termicamente afetada dos aços inoxidáveis ferríticos uns s41001 e uns s41003**. 2011. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

HIRAO, M.; OGI, H.; FUKUOKA, H. Advanced ultrasonic method for measuring rail axial stresses with electromagnetic acoustic transducer. **Journal of Research in Nondestructive Evaluation**, v. 5, n. 3, p. 211-223, 1994.

HSU, N. N., "Acoustical Birefringence and the Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis", **Experimental Mechanics**, v. 14, n. 5, pp. 169-176, May 1974.

HUTCHINGS, M. T; WITHERS, P. J.; HOLDEN, T. M; LORENTZEN, T.  
**Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction.** taylor & francis group, llc. 2005.

HUGHES, D.S.; KELLY, J.K., "Second - Order Elastic Deformation of Solids", **Physical Review**, v. 92, n. 5, pp. 1145-1149, Dec. 1953.

IWASHIMIZU, Y., KUOBOMURA, K., "Stress-Induced Rotation of Polarization Direction of Elastic Waves in Slightly Anisotropy Materials", **Int. J.Solids Structures**, v. 9, pp. 99-114, 1973.

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**, v. 34, n. 1, p. 1-11, 2015.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. **Manufacturing engineering and technology.** Prentice Hall, 2014.

KANDIL, F.A.; LORD, J.D.; FRY, A.T.; GRANT, P.V. A review of residual stress measurement method - a guide to technique selection. **NPL Report MATC(A)04**, Teddington, UK, 2001.

KRUTH, J. P.; BLEYS, P.H. Measuring residual stress caused by Wire EDM of tool steel. *International Journal of Electral Machining*. Vol.5, pages: 23-28. 2000.

KUDRYAVTSEV, Y. Residual Stress. Springer Handbook on Experimental Solid Mechanics. Springer-SEM. 2008. P. 371-387.

LAMY, C.A.; PAYÃO FILHO, J.C.; BITTENCOURT, M.S.Q., AREAS, V.L.F., 2002, "Avaliação por Ultra-som do Tratamento Térmico para Alívio de Tensões", **VI Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos e XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos**, 19 a 21 de ago. de 2002, 10 pp., Salvador - BA.

LANCIOTTI, A. *et al*, presentation at the Porto meeting of the European Union DaToN project, April 17-18, 2007.

LEGGATT, R. H. Residual stresses in welded structures. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 85, n. 3, p. 144-151, 2008.

LEITE, P. G. P. **Ensaios não destrutivos**. 14ª impressão. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1984. p.11.1-13.32.

LU, J. Handbook of Measurement of Residual stresses, vol. 1. SEM, Bethel 1996, ISBN: 978-0132557382. p. 22-319.

LU, J. Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress Problem. **In: Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. ASM International, 2002. P. 11-26.

MACHERAUCH, Eckard; MÜLLER, Paul. Das  $\sin^2\psi$ -Verfahren der röntgenographischen Spannungsmessung. **Z. angew. Phys**, v. 13, n. 7, p. 305-312, 1961.

MAGINA, Priscila Goreti. **Análise de tensões com ultra-som em tubos soldados**. 2009. 100f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MARQUES, Luis Fernando Nazaré. **Comportamento à fadiga de juntas do aço naval ASTM a 131 soldadas pelo processo GMAW-CW**. 2011. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

MARQUES, L. F. N. et al. Fatigue life assessment of weld joints manufactured by GMAW and CW-GMAW processes. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 22, n. 2, p. 87-96, 2017.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A.Q., **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 4. ed. Elsevier Ed., 2016.

MARQUEZE, Cleide M. **Análise por ultra-som da textura dos materiais e tensões residuais em juntas soldadas**. 2002. 124p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MASUBUCHI, K. **Analysis of Welded Structures: residual stresses, distortion, and their consequences**. Pergamon Press Ltd, 1980.

MASUBUCHI, K. **Residual Stresses and Distortion**. *In*: ASM Handbook, Welding Fundamentals and Processes, v6A, 2011, p 166-175.

MESSLER JR, R. W. **Principles of welding: processes, physics, chemistry and metallurgy**. Wiley-VCH, 2004.

MODENESI, Paulo J. Soldabilidade dos aços transformáveis. **UFMG, Belo Horizonte, MG**, 2004.

MORAES, Bruno César. **Avaliação acustoelástica da soldagem e tratamento térmico de alívio de tensões de aço do vaso de pressão de angra III**. 2015. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) - Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2015.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C., Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Editora LTC. 4 ed., 2009.

NDT. Resource center. Disponível em: < <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/Couplant.htm>>. Acesso em: 10 out. 2016.

NITSCHKE-PAGEL, T. e WOHLFAHRT, H. Residual stresses in welded joints – sources and consequences. **Mater. Sci. Forum**, 2002, 404–407, 215–224.

NOYAN, I.C.; COHEN, J.B. **Residual Stress, Measurement by Diffraction and Interpretation**, N.York, Berlin, Springer Verlag, 1987.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C., **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1982. 461p.

OLIVEIRA, G. L. G., et al. Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem sobre as Tensões Residuais Resultantes em Juntas Soldadas com Multipasse. **Revista Soldagem e Inspeção Online**, v. 15, n. 3, p. 218-224, 2010.

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.

OKADA, Kenichi. Acoustoelastic determination of stress in slightly orthotropic materials. **Experimental Mechanics**, v. 21, n. 12, p. 461-466, 1981.

OKADA, Ken-ichi. Two-Dimensional Acoustoelasticity Using Pulse Echo Overlap Technique. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 22, n. S3, p. 57, 1983.

ORTEGA, L. P. C., LAMY, C. A., BITTENCOURT, *et al.* **Introdução à Avaliação de Tensões por Ultrassom**. 1ª ed. Rio de Janeiro, Virtual Científica, 2011.

ORTEGA, *et al.* Avaliação por ultra-som de tratamento térmico de alívio de tensões em componente industrial. In: **III Conferência Pan-Americana de Ensaio Não Destrutivos (PANNDT)**, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 02-06 Junho, 2003.

PREVÉY, Paul S. X-Ray Diffraction Residual Stress Techniques. **Metals Handbook: Ninth Edition**, Vol. 10, ed. K. Mills, Metals Park, OH: American Society for Metals, 1986, pp. 380-392.

RAJ, Baldev *et al.* X-ray Diffraction Based Residual stress measurements for assessment of fatigue damage and rejuvenation process for undercarriages of aircrafts. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 28, n. 3-4, p. 157-162, 2009.

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**, v. 16, n. 2, p. 200-211, 2014.

RIBEIRO, R. A; DOS SANTOS, E. B. F.; ASSUNÇÃO, P. D. C., *et al.* **The cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process**. [unpublished work]. 2017.

RODRIGUES, L. A. **Caracterização Microestrutural e de propriedades Mecânicas de Soldas do Aço ASTM A 131 Pelos Processos FCAW Convencional e Com Adição de Arame Frio**. 2011. 143 f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

ROSE, J. L.. **Ultrasonic waves in solid media**. New York: Cambridge University Press, 1999. 454p.

ROSSINI, N. S.; DASSISTI, M.; BENYOUNIS, K. Y; OLABI, A. G. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials and Design** 35 (2012) 572–588.

RUUD, C.O. Measurement of Residual Stresses. **In: Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. ASM International, 2002. P. 99-117.

RUUD, C. O. A review of selected non-destructive methods for residual stress measurement. NDT-International, 1982.

SÁBIO, A. D. **Estudo da Viabilidade Operacional do Processo de Soldagem MAG com Alimentação Adicional de Arame Frio**. 2007. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém. 2007.

SAE. **Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction**. SAE J784, Society of Automotive Engineers Handbook Supplement, Warrendale, 2003.

SANTOS, Allan Xavier dos. **Estudo de uma nova técnica de medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica usando o espectro de frequência**. 2010. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2010.

SANTOS, Claudiane Soares. **Proposta de Sistema Automatizado para Medição de Tensão Utilizando o Efeito Acustoelástico**. 2013. 245f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2013.

SANTOS, C.S.; PEREIRA JÚNIOR, P.; SANTOS, A.H.C.; SANTOS JÚNIOR, A.A. Avaliação da Influência de Variáveis envolvidas no Comportamento da Velocidade de Propagação e Tempo de Percurso das Ondas Lcr utilizando Planejamento Experimental. In: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ), **Anais...** Recife, Porto de Galinhas, 2011a.

SCHAJER, G. S. **Practical residual stress measurement methods**. John Wiley & Sons, 2013.

SCHAJER, G. S. Application of finite element calculations to residual stress measurements. **J. Eng. Mater. Technol.** 1981; 103(2):157-163.

SCHNEIDER, E.; HOLLER, P.; GOEBBELS, K. Non-destructive detection and analysis of residual and loading stress in thick-walled components. **Nuclear Engineering and Design** 84 (1985) 165-170.

SCOTTI, Américo. Modelos de cinco barras e de uma barra para geração de tensões térmicas na ZF, ZAC e MB durante soldagem a arco. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 1, p. 82-90, 2014.

SIQUEIRA FILHO, Aníbal Veras de. **Estudo comparativo das tensões residuais em juntas soldadas pelas técnicas de medição por coordenadas e difração de raio-x**. 2012. 86f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2012.

SONG, Wentao *et al.* Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 29, n. 2, p. 365-371, 2016.

SOUSA, Diogo Antônio de. **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza**. 2012. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2012.

SOUZA, Rodrigo Guerra. **Processamento de Sinais de Ultrassom para Determinação da Direção de Laminação em Materiais Metálicos**. 2014. 90f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2014.

TANALA, E., BOURSE, G., FREMIOT, M., BELLEVAL, J. F. Determination of Near Surface Residual Stresses on Welded Joints Using Ultrasonic Methods, **NDT&E International**, v. 28, n. 2, pp. 83-88, 1995.

TEBEDGE, N.; ALPSTEN, G.; TALL, L. Residual-stress Measurement by the Sectioning Method. **Experimental Mechanics**, 1973.

THOMPSON, R.B., LU, N.Y., CLARK, AV., "UltrasonicMethods", In: Lu, Jian, Handbook of Measurement of Residual Stresses / Society for Experimental Mechanics, Inc., ISBN 0-88173-229-X, chapter 7, The Fairmont Press, 1996.

TOTTEN, George E. (Ed.). **Handbook of residual stress and deformation of steel**. ASM international, 2002.

WALASZEK, H; ABDALLAHOU, Y; LIEURADE, H.P. Potentialities of ultrasonics for evaluating residual stresses: Influence of microstructure. **15th World Conference on Nondestructive testing**, Roma (Italy) 15-21 October, 2000.

WEBSTER, G. A (Ed.), Polycrystalline materials – determinations of residual stresses by neutron diffraction. **ISO/TTA3 Technology Trends Assessment**, Geneva 20, witzerland, 2001.

WITHERS, P. J. Mapping residual and internal stress in materials by neutron diffraction. **Comp Rendus Phys**, 2007;8(7–8):806–20.

WITHERS, P. J., BHADESHIA, H. K. Residual Stress Part 1 – Measurement Techniques. **Materials Science and Technology**. v. 17, p. 355-365, Apr. 2001a.

WITHERS, P. J.; TURSKI, M. EDWARDS, L; BOUCHARD; BUTTLED, D.J. Recent advances in residual stress measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping** 85 (2008) 118–127.

WOO, W.; Em, V.; Mikula, P. *et al.* Neutron diffraction measurements of residual stresses in a 50 mm thick weld. **Mater Sci Eng A**.;528(12):4120–4124. 2011

WOO, W.; An, G. B., *et al.* Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds: A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study. **Acta Materialia**, v. 61, n. 10, p. 3564-3574. 2013.

WOO, W.; An, G. B; Truman, C. E, *et al.* Two-dimensional mapping of residual stresses in a thick dissimilar weld using contour method, deep hole drilling, and neutron diffraction. **Journal of Materials Science**, v. 51, n. 23, p. 10620-10631. 2016.

## APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR

A verificação e/ou calibração dos instrumentos e equipamentos de medição da velocidade/tempo da onda ultrassônica cisalhante são essenciais para confiabilidade dos resultados de tensões nas amostras. Nesse trabalho foi observada a necessidade de verificar os instrumentos de medição, bem como os equipamentos utilizados nos ensaios. Dentre os instrumentos de medição, o transdutor, embora venha aferido de fábrica, optou-se por verificar a sua velocidade/tempo de propagação no aço, que de acordo com a *ASM* (1989); *HELLIER* (2003), a velocidade da onda ultrassônica cisalhante no aço é de 3240 m/s.

Nesse contexto, para realizar as medições das amostras foi utilizado o transdutor da marca Panametrics/Olympus, modelo V155-RM com frequência de 5 MHz e elemento piezoelétrico de 12,7 mm (0,5 in) de diâmetro, a Figura A1 mostra o transdutor. Esse transdutor foi escolhido com base em estudos preliminares realizados pelo grupo de pesquisa do Instituto de Engenharia Nuclear - IEN, no Rio de Janeiro. Em que amostras do material a ser utilizada neste trabalho foram enviadas e analisadas pelo IEN, sendo que os resultados obtidos indicaram que esse transdutor apresentou sensibilidade adequada nas medições de tensões.

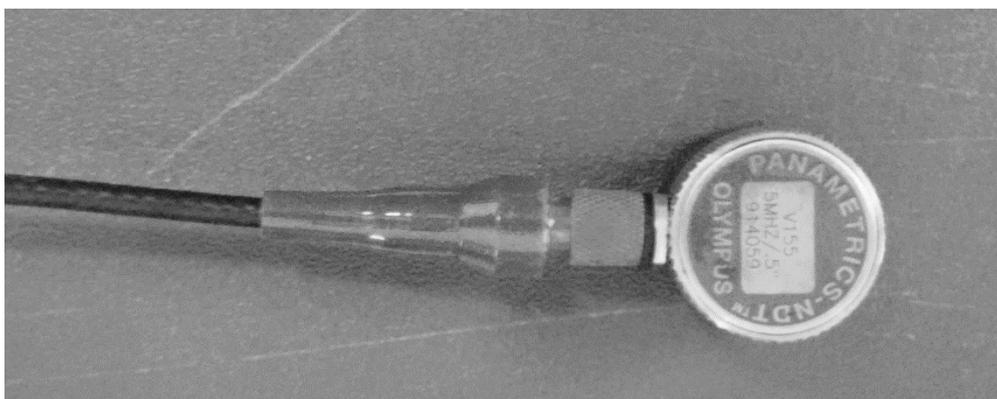


Figura A1 - Transdutor Panametrics/Olympus -V155-RM.

O procedimento de verificação da velocidade/tempo da onda ultrassônica foi realizado por meio de um bloco padrão, conforme Figura A2, da Panametrics/Olympus®, modelo TB 1054-1, ASTM E 164 IIW produzido em aço 1018 para medições por ultrassom.

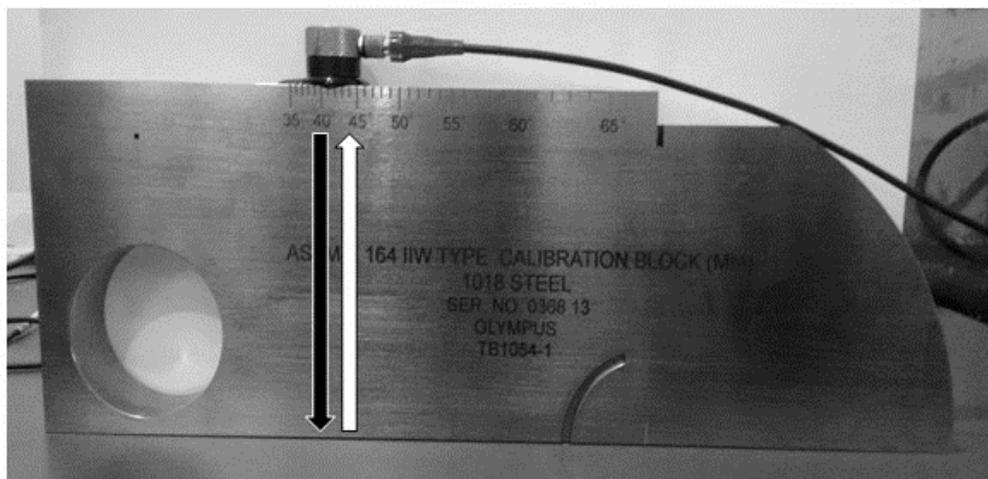


Figura A2 - Bloco padrão utilizado na calibração do transdutor.

A verificação e/ou calibração da velocidade/tempo, de um modo geral, consistiu na comparação da distância encontrada através do tempo de percurso dos transdutores e a distância no bloco padrão de 100 mm, conforme Figura A2, utilizando-se o método de pulso eco. Após a onda ser refletida na parte inferior do bloco padrão (seta preta), ela retorna para o transdutor (seta branca) que funciona como emissor/receptor. O tempo de propagação da onda cisalhante foi adquirido através do programa de captura de sinais desenvolvido pelo IEN.

As medições do tempo de percurso da onda foram realizadas em três pontos diferentes e em cada ponto foram capturados vinte sinais, após serem processados, resultou em vinte tempos, sendo que o tempo em cada ponto foi a média entre esses vinte tempos. O procedimento realizado entre cada medição consistiu na retirada dos transdutores, limpeza da superfície do bloco padrão e na reaplicação de uma camada de gel acoplante comercial. A calibração foi realizada antes dos experimentos a temperatura ambiente.

Então, tendo como base o valor da velocidade da onda cisalhante no aço, 3240 m/s e a espessura do bloco de calibração padrão, 100 mm, determinou-se o tempo de percurso teórico da onda no aço, que foi de 0,00006172839 s ou 61728,39 ns. A partir desse valor de tempo de referência, mediu-se o tempo de percurso da onda no bloco padrão em três pontos distintos para verificar se havia ou não variação do tempo, dessa forma, fazer alguma correção se necessário. A Tabela A1 apresenta as medidas de tempo, velocidade e de espessura obtidos pelo transdutor durante o procedimento de calibração do mesmo.

Tabela A1 - Medidas de tempo, velocidade e espessura obtidos na calibração do transdutor.

<b>Pontos</b>	<b>Tempo (ns)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Espessura (m)</b>
<b>1</b>	61722,06	3240,33	0,1999
<b>2</b>	61729,16	3239,96	0,2000
<b>3</b>	61726,22	3240,11	0,1999
<b>Media</b>	<b>61725,81</b>	<b>3240,13</b>	<b>0,1999</b>
<b>D. Padrão</b>	<b>3,57</b>	<b>0,2</b>	<b>0,000057</b>
<b>Valor-referência</b>	<b>61728,39</b>	<b>3240</b>	<b>0,2</b>
<b>Variação</b>	<b>-2,58 (-0,728%)</b>	<b>0,13 (0,004%)</b>	<b>-0,0001 (-0,05%)</b>

Como se pode observar pela Tabela A1, o tempo médio de percurso experimental da onda foi menor do que o tempo teórico (valor-referência), que indica uma velocidade maior da onda percorrida no material para uma mesma distância. Pela Tabela A1 também se observa que a variação dos valores experimentais de tempo de percurso da onda, de velocidade e de espessura em relação aos valores teóricos não foi superior a 1%, ou seja, não foi encontrada uma variação significativa que pudesse comprometer os resultados finais dos experimentos, dessa forma, concluiu-se que o sistema de medição do sinal ultrassônico utilizado neste trabalho estava calibrado, não sendo necessário, portanto, nenhum ajuste no sistema de medição.

## APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DO DIFRATÔMETRO DE RAIO X

XTronic version 1.6.0r4125, Copyright (C) Stresstech Oy  
Series report printed at qui 16. fev 10:51:24 2017

### Calibration

#### Parameters

Stress Calculation		Corrections	
$\varphi$ offset	0	Peak limits	Disabled
Calc. shear stresses	Disabled	Smoothing	Disabled
Calc. princ. stresses	Disabled	Bg sub.	Enabled
Calc. stress tensor	Disabled	Bg type	Constant
Peak Position		Bg pixels	30
Peak shift	Cross correlation	Ka 2 corr.	Disabled
Parab. lvl	85	Material Data	
Threshold	20	Poiss. ratio	0.3
2 $\theta$ pos.	Library	Young's mod	211000
Det. used	A and B	Set Expr.	Disabled
		2 $\theta$ val.	156.4
		Used K	Using Ka

Tensao medida na amostra padrão ( aço ferrítico)

	$\sigma$ (MPa): 0.0°	FWHM(°): 0.0°
<b>3</b>	-5.6 $\pm$ 3.5	2.42 $\pm$ 0.05

Summary of measurement parameters:

Voltage: 25.0 kV

Current: 6.0 mA

Exposure: 5 s

## APÊNDICE C - ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A SELEÇÃO DA METODOLOGIA DE CAPTURA DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS

Segundo Montgomery e Runger (2009), muitos problemas de engenharia requerem que se decida entre aceitar ou rejeitar uma “afirmação” acerca de algum parâmetro. Essa “afirmação” é chamada de “hipótese” e o procedimento de tomada de decisão sobre a hipótese é chamado de teste de hipótese. Existem, basicamente, dois tipos de hipóteses, a saber:

- Hipótese Nula ( $H_0$ ): É a hipótese a ser testada, onde se faz o teste se dois resultados são iguais, dentro de um determinado nível de confiança ou grandeza de incerteza;
- Hipótese Alternativa ( $H_1$ ): É a hipótese que contraria a hipótese nula ( $H_0$ ), onde se faz o teste se dois resultados são diferentes, dentro de um determinado nível de confiança ou grau de incerteza.

Neste contexto, para se determinar qual a metodologia de captura do sinal da onda ultrassônica a ser adotada neste trabalho, realizou-se um estudo estatístico baseado na análise de hipóteses, utilizando-se os valores dos tempos (determinados em duas direções ortogonais entre si) de percurso da onda ultrassônica obtidos com as metodologias “Par-a-Par” e “Contínua”, conforme mostram as Tabelas 5.5 e 5.6 no capítulo 5. A análise estatística utilizou os desvios padrões de cada metodologia e em cada direção, ou seja, foi realizada uma avaliação estatística comparando suas variâncias para determinar o método de captura a ser utilizado.

Para a comparação das variâncias foi realizado o seguinte teste de hipóteses:

$$Dp_1 = Dp_2 \rightarrow \text{Hipótese nula}$$

$$Dp_1 \neq Dp_2 \rightarrow \text{Hipótese alternativa}$$

em que  $Dp_1$  e  $Dp_2 \rightarrow$  são os desvios padrões encontrados para os tempos de percurso da onda na mesma direção, porém para cada metodologia, ou seja, desvios padrões para a direção longitudinal utilizando as metodologias Par-a-Par e Contínuo e desvios padrões para a direção transversal também para as duas metodologias.

Foi adotado um nível de significância  $\alpha = 0,05$ , ou seja, 95% de certeza dos resultados. Além disso, a quantidade de valores de tempos em cada direção e para cada metodologia foi  $n = 30$ . E o valor- $p$  (valor de referência calculado pelo programa estatístico, a ser comparado com o valor do nível de significância  $\alpha$  definido).

Para a realização da análise estatística foi usado o *software* estatístico MINITAB17, versão livre. Em cada um dos testes de hipóteses foram inseridos os tempos de percurso da onda ultrassônica de uma das direções de polarização, ou seja, um teste com os tempos dos dois métodos na direção de polarização longitudinal e o outro com os tempos na transversal (Tabelas 5.5 e 5.6).

Para a hipótese nula ser aceita, o valor de “ $p$ ” deve ser maior que o de “ $\alpha$ ”, ou seja, “ $p$ ” está fora dos 5% de erro estipulado para a análise. Isso sendo verdadeiro ( $p > \alpha$ ), mostra que os desvios padrões podem ser considerados estatisticamente iguais. Por outro lado, se  $p < \alpha$ , a hipótese nula é rejeitada.

Nesse contexto, analisando-se os tempos de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal obtidos com os dois métodos de captura, a hipótese nula foi aceita, isto é  $p = 0,106 > \alpha = 0,05$ , indicando que os desvios padrões de **1,1** obtido na metodologia “Par-a-Par” e **0,59** na “Contínua” nesta direção de polarização não são significativamente diferentes, podendo ser considerados estatisticamente iguais.

Para a análise estatística dos tempos na direção transversal com as duas metodologias utilizadas, a hipótese nula também foi aceita, pois  $p = 0,106 > \alpha = 0,05$ , o que mostra estatisticamente que o desvio padrão de **0,7** na metodologia “Par-a-Par” é igual ao desvio padrão de **0,5** na metodologia “Contínua”. Baseado nesses resultados, concluiu-se que os dois métodos podem ser usados para capturar os sinais ultrassônicos.

As Figuras C1 e C2 mostram a interface do *Software* Minitab 17 com os resultados das análises estatísticas.

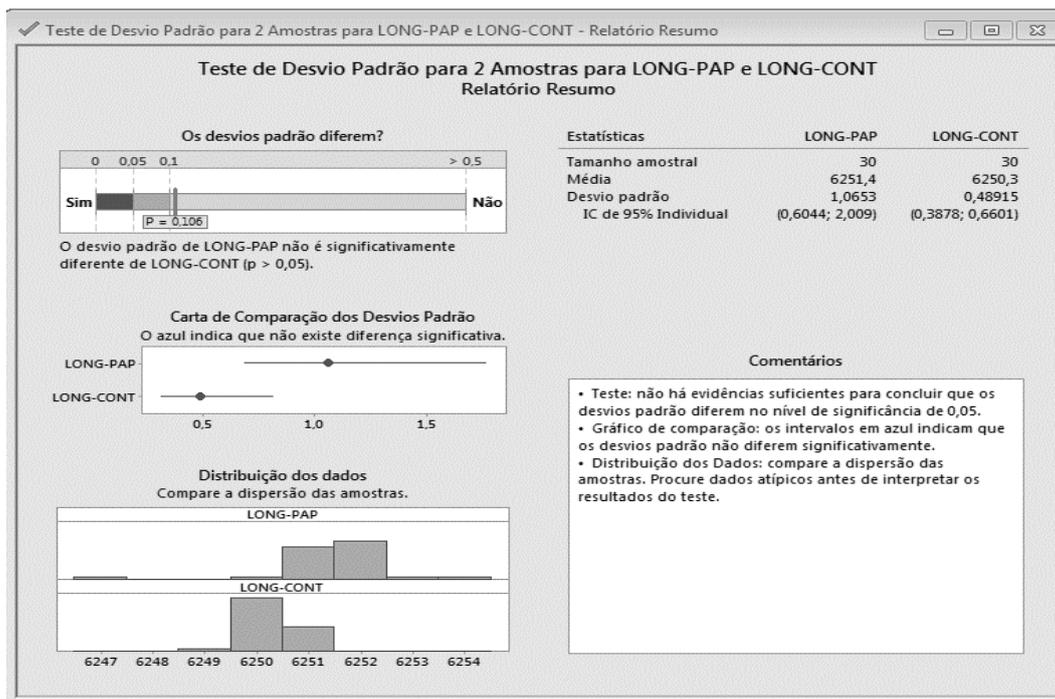


Figura C1 - Resultado do teste de hipóteses dos tempos na direção longitudinal.

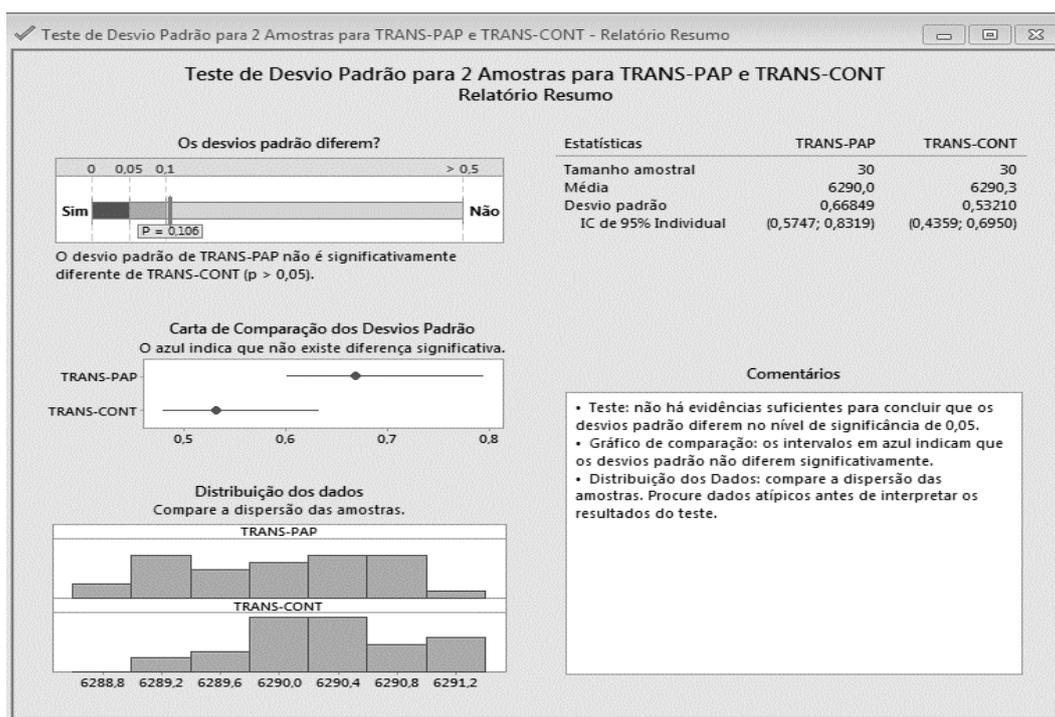


Figura C2 - Resultado do teste de hipóteses dos tempos na direção transversal.

**APÊNDICE D - TEMPO DE PERCURSO DA ONDA ULTRASSÔNICA E  
BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA ANTES DA SOLDAGEM**

Tabela D1 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-1 antes da soldagem.

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
<b>A1</b>	6249,21	6286,24	37,03	5,758E-11	5,447E-11	5,908E-03
<b>A2</b>	6252,03	6293,81	41,79	4,443E-11	1,154E-10	6,661E-03
<b>A3</b>	6248,13	6287,48	39,35	4,435E-11	4,443E-11	6,278E-03
<b>A4</b>	6245,37	6283,83	38,46	6,245E-06	6,340E-11	6,139E-03
<b>A5</b>	6239,46	6278,78	39,32	6,129E-11	6,172E-11	6,282E-03
<b>A6</b>	6239,55	6277,80	38,26	5,730E-11	7,159E-11	6,112E-03
<b>A7</b>	6245,11	6282,74	37,64	5,356E-11	4,375E-11	6,009E-03
<b>A8</b>	6243,94	6281,76	37,82	6,806E-11	3,839E-11	6,039E-03
<b>A9</b>	6243,01	6281,88	38,87	6,806E-11	6,935E-11	6,207E-03
<b>B1</b>	6248,43	6284,09	35,66	8,944E-11	6,935E-11	5,691E-03
<b>B2</b>	6253,20	6292,96	39,77	7,931E-11	4,833E-11	6,339E-03
<b>B3</b>	6252,43	6292,20	39,77	8,188E-11	4,723E-11	6,341E-03
<b>B4</b>	6241,90	6279,48	37,84	8,758E-10	1,360E-10	6,003E-03
<b>B5</b>	6240,37	6280,36	39,99	1,455E-10	9,216E-11	6,387E-03
<b>B6</b>	6238,78	6278,78	39,06	7,340E-11	1,061E-10	6,240E-03
<b>B7</b>	6245,29	6284,50	39,22	5,871E-11	4,588E-11	6,259E-03
<b>B8</b>	6247,59	6287,89	40,30	5,821E-11	6,708E-11	6,429E-03
<b>B9</b>	6241,45	6280,72	39,27	4,435E-11	4,617E-11	6,272E-03
<b>C1</b>	6243,13	6279,71	36,58	1,332E-10	1,366E-10	5,841E-03
<b>C2</b>	6251,16	6288,98	37,83	1,127E-10	1,995E-10	6,033E-03
<b>C3</b>	6246,51	6286,35	39,84	1,131E-10	5,250E-11	6,357E-03
<b>C4</b>	6241,64	6279,48	37,84	1,162E-10	1,360E-10	6,044E-03
<b>C5</b>	6237,91	6276,92	39,01	1,127E-10	1,040E-10	6,234E-03
<b>C6</b>	6238,09	6274,99	36,91	1,597E-10	6,129E-11	5,899E-03
<b>C7</b>	6244,37	6281,70	37,34	1,027E-10	1,950E-10	5,962E-03
<b>C8</b>	6242,97	6281,98	39,02	2,140E-10	8,645E-11	6,230E-03
<b>C9</b>	6240,62	6279,63	39,01	6,340E-11	6,387E-11	6,231E-03
<b>D1</b>	6242,42	6279,37	36,96	8,777E-11	5,495E-11	5,903E-03
<b>D2</b>	6243,48	6282,66	39,18	7,327E-11	7,592E-11	6,255E-03
<b>D3</b>	6239,06	6278,32	39,26	4,552E-11	4,413E-11	6,272E-03
<b>D4</b>	6233,06	6272,12	39,06	5,356E-11	4,940E-11	6,247E-03
<b>D5</b>	6230,20	6269,63	39,43	4,723E-11	4,702E-11	6,309E-03
<b>D6</b>	6229,41	6268,82	39,41	8,926E-11	8,013E-11	6,307E-03
<b>D7</b>	6234,85	6273,87	39,02	2,387E-10	5,231E-11	6,239E-03
<b>D8</b>	6233,72	6273,18	39,46	4,894E-11	5,257E-11	6,310E-03
<b>D9</b>	6230,81	6270,36	39,55	6,669E-11	4,064E-11	6,328E-03

Tabela D2 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-2 antes da soldagem.

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6184,46	6224,16	37,03	3,839E-11	1,530E-10	6,398E-03
A2	6189,68	6229,07	41,79	2,936E-11	6,340E-11	6,343E-03
A3	6187,10	6226,70	39,35	3,627E-11	6,469E-11	6,379E-03
A4	6183,58	6223,60	38,46	4,443E-11	4,292E-11	6,452E-03
A5	6183,91	6223,71	39,32	2,447E-11	5,911E-11	6,415E-03
A6	6192,38	6231,34	38,26	2,894E-10	3,839E-11	6,271E-03
A7	6194,97	6234,81	37,64	3,663E-11	5,821E-11	6,412E-03
A8	6200,77	6240,62	37,82	7,482E-11	6,569E-11	6,406E-03
A9	6196,50	6233,65	38,87	4,723E-11	3,796E-11	5,977E-03
B1	6198,81	6238,87	35,66	7,232E-11	9,386E-11	6,442E-03
B2	6199,10	6241,06	39,77	4,435E-11	3,940E-11	6,745E-03
B3	6197,16	6237,01	39,77	3,479E-11	3,839E-11	6,410E-03
B4	6200,85	6241,15	37,84	8,807E-11	7,340E-11	6,477E-03
B5	6200,76	6240,94	39,99	2,936E-11	5,911E-11	6,460E-03
B6	6204,67	6244,67	39,06	7,860E-11	4,007E-11	6,425E-03
B7	6212,71	6251,98	39,22	4,064E-11	7,122E-11	6,302E-03
B8	6210,99	6251,08	40,30	4,375E-11	6,935E-11	6,434E-03
B9	6207,79	6244,46	39,27	1,055E-10	5,282E-11	5,889E-03
C1	6209,49	6249,07	36,58	3,479E-11	1,565E-10	6,353E-03
C2	6211,93	6250,73	37,83	5,938E-11	5,250E-11	6,226E-03
C3	6209,31	6248,88	39,84	4,253E-11	5,730E-11	6,352E-03
C4	6208,12	6247,55	37,84	3,663E-11	4,723E-11	6,332E-03
C5	6207,25	6246,19	39,01	6,172E-11	3,582E-11	6,253E-03
C6	6212,49	6251,58	36,91	4,375E-11	8,503E-11	6,272E-03
C7	6218,70	6257,83	37,34	4,292E-11	7,695E-11	6,272E-03
C8	6222,28	6261,60	39,02	4,435E-11	1,134E-10	6,299E-03
C9	6215,16	6250,71	39,01	5,026E-11	7,881E-11	5,704E-03
D1	6215,98	6255,41	36,96	2,991E-11	7,182E-11	6,323E-03
D2	6216,60	6257,32	39,18	4,840E-11	6,767E-11	6,530E-03
D3	6217,84	6257,23	39,26	9,358E-11	1,322E-10	6,315E-03
D4	6214,83	6254,51	39,06	1,666E-10	9,984E-11	6,365E-03
D5	6219,58	6258,28	39,43	8,315E-11	3,726E-11	6,203E-03
D6	6218,28	6257,22	39,41	3,796E-11	5,871E-11	6,242E-03
D7	6224,93	6264,64	39,02	7,504E-11	1,417E-10	6,359E-03
D8	6226,23	6265,31	39,46	4,702E-11	1,385E-10	6,256E-03
D9	6222,65	6259,69	39,55	1,175E-10	5,200E-11	5,936E-03

Tabela D3 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-3 antes da soldagem.

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6274,10	6311,94	37,83	2,552E-11	3,193E-11	6,012E-03
A2	6274,74	6312,62	37,88	6,198E-11	6,973E-11	6,019E-03
A3	6269,73	6306,66	36,95	4,104E-11	3,354E-11	5,873E-03
A4	6274,15	6310,33	36,18	9,597E-11	3,432E-11	5,750E-03
A5	6274,11	6310,42	36,31	5,282E-11	4,007E-11	5,770E-03
A6	6285,57	6319,46	33,89	1,171E-10	1,042E-10	5,378E-03
A7	6278,87	6315,79	36,92	1,977E-10	1,977E-10	5,862E-03
A8	6265,07	6303,62	38,54	4,993E-11	4,894E-11	6,133E-03
A9	6262,01	6299,98	37,97	5,821E-11	4,702E-11	6,045E-03
B1	6277,52	6315,81	38,30	7,964E-11	7,232E-11	6,082E-03
B2	6271,59	6310,24	38,65	4,833E-11	4,894E-11	6,143E-03
B3	6269,12	6307,18	38,06	9,747E-11	5,257E-11	6,053E-03
B4	6269,91	6309,18	38,00	8,410E-11	5,684E-11	6,244E-03
B5	6267,50	6305,50	38,00	7,340E-11	5,596E-11	6,044E-03
B6	6278,95	6314,09	35,14	6,781E-11	1,131E-10	5,581E-03
B7	6271,18	6308,50	37,32	1,067E-10	7,159E-11	5,933E-03
B8	6262,68	6300,40	37,72	7,340E-11	7,518E-11	6,005E-03
B9	6262,10	6302,12	40,00	7,518E-11	6,091E-11	6,370E-03
C1	6268,57	6306,78	38,21	4,007E-11	8,025E-11	6,077E-03
C2	6265,01	6303,55	38,54	1,373E-10	5,596E-11	6,132E-03
C3	6262,91	6299,68	36,76	8,410E-11	7,522E-11	5,853E-03
C4	6269,14	6306,59	37,45	4,833E-11	1,247E-10	5,956E-03
C5	6265,09	6302,28	37,19	9,580E-11	7,864E-11	5,918E-03
C6	6275,76	6310,29	34,53	1,021E-10	8,208E-11	5,487E-03
C7	6268,61	6306,29	37,67	8,867E-11	7,090E-11	5,992E-03
C8	6258,84	6297,28	38,44	1,344E-10	4,104E-11	6,123E-03
C9	6256,66	6294,15	37,49	7,048E-11	5,774E-11	5,974E-03
D1	6268,29	6305,36	37,07	3,479E-11	1,142E-10	5,896E-03
D2	6265,44	6265,44	38,94	3,726E-11	1,268E-10	6,196E-03
D3	6265,45	6303,79	38,34	9,525E-11	1,095E-10	6,101E-03
D4	6267,36	6304,85	37,50	5,596E-11	2,782E-10	5,965E-03
D5	6261,45	6299,98	38,53	5,849E-11	5,480E-11	6,134E-03
D6	6269,51	6305,95	36,44	5,590E-11	1,214E-10	5,795E-03
D7	6271,64	6308,86	37,22	4,894E-11	1,301E-10	5,917E-03
D8	6262,28	6301,01	38,73	4,667E-11	1,087E-10	3,873E-08
D9	6257,78	6295,60	37,82	6,366E-11	1,376E-10	6,025E-03

Tabela D4 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-4 antes da soldagem.

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6264,75	6301,37	36,32	4,867E-11	5,231E-11	5,828E-03
A2	6263,18	6299,48	36,30	4,375E-11	4,723E-11	5,778E-03
A3	6275,22	6310,32	35,05	3,432E-11	3,796E-11	5,578E-03
A4	6283,66	6317,02	36,36	4,757E-11	4,128E-11	5,295E-03
A5	6268,87	6304,90	36,04	3,663E-11	4,867E-11	5,732E-03
A6	6274,42	6310,80	36,35	4,940E-11	4,588E-11	5,782E-03
A7	6269,67	6305,99	36,32	4,974E-11	3,663E-11	5,775E-03
A8	6270,84	6307,86	37,03	4,007E-11	5,350E-11	5,887E-03
A9	6275,67	6313,33	37,60	6,767E-11	5,501E-11	5,982E-03
B1	6264,19	6300,88	36,69	6,609E-11	4,702E-11	5,840E-03
B2	6266,85	6304,30	37,45	4,435E-11	4,840E-11	5,958E-03
B3	6279,60	6314,00	34,35	1,853E-10	6,172E-11	5,462E-03
B4	6286,38	6319,24	32,86	4,136E-11	3,285E-11	5,214E-03
B5	6268,46	6306,92	38,46	2,730E-10	4,894E-11	6,116E-03
B6	6277,60	6313,95	36,35	1,234E-10	1,317E-10	5,774E-03
B7	6279,12	6315,74	36,63	4,323E-11	5,200E-11	5,816E-03
B8	6276,70	6315,05	38,35	1,100E-10	6,070E-11	6,091E-03
B9	6280,57	6317,81	37,50	1,947E-10	9,305E-11	5,912E-03
C1	6267,56	6304,08	36,53	3,940E-11	4,104E-11	5,811E-03
C2	6266,89	6305,55	38,66	6,267E-06	6,306E-06	6,150E-03
C3	6279,87	6315,38	35,35	3,403E-11	8,192E-11	5,638E-03
C4	6289,83	6321,88	32,06	5,501E-11	6,340E-11	5,084E-03
C5	6272,65	6308,84	36,20	9,162E-11	6,544E-11	5,754E-03
C6	6281,80	6317,44	35,20	4,128E-11	2,915E-10	5,657E-03
C7	6278,20	6313,46	35,27	9,525E-11	1,098E-09	5,601E-03
C8	6275,56	6313,18	37,62	5,821E-11	6,569E-11	5,976E-03
C9	6284,18	6322,13	38,35	1,808E-10	1,362E-10	6,020E-03
D1	6265,11	6300,99	35,87	4,833E-11	8,288E-11	5,709E-03
D2	6270,52	6305,79	35,27	5,231E-11	1,317E-10	5,609E-03
D3	6279,71	6314,61	34,90	7,759E-11	1,037E-10	5,542E-03
D4	6294,81	6326,24	31,43	6,544E-11	3,582E-11	4,981E-03
D5	6272,37	6309,39	36,02	8,796E-11	3,193E-11	5,884E-03
D6	6280,73	6316,16	35,45	4,413E-11	3,582E-11	5,626E-03
D7	6277,52	6312,85	35,34	5,911E-11	8,347E-11	5,613E-03
D8	6280,21	6317,33	37,13	5,911E-11	7,656E-11	5,894E-03
D9	6282,21	6319,03	36,90	8,867E-11	6,129E-11	5,844E-03

Tabela D5 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-5 antes da soldagem.

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
<b>A1</b>	6229,91	6269,41	39,50	4,375E-11	4,560E-11	6,320E-03
<b>A2</b>	6226,18	6266,23	40,05	6,366E-11	9,801E-11	6,411E-03
<b>A3</b>	6225,12	6263,09	37,97	6,156E-11	5,026E-11	6,081E-03
<b>A4</b>	6225,49	6266,27	40,78	1,822E-10	1,733E-10	6,529E-03
<b>A5</b>	6226,06	6265,85	39,79	7,759E-11	6,172E-11	6,371E-03
<b>A6</b>	6232,72	6271,70	38,98	8,503E-11	9,662E-11	6,234E-03
<b>A7</b>	6234,19	6272,48	38,29	1,024E-10	6,500E-11	6,124E-03
<b>A8</b>	6223,69	6263,46	39,77	5,447E-11	6,002E-11	6,370E-03
<b>A9</b>	6221,21	6261,39	40,18	9,801E-11	9,612E-11	6,438E-03
<b>B1</b>	6229,26	6268,62	39,36	6,544E-11	7,504E-11	6,299E-03
<b>B2</b>	6224,88	6264,92	40,04	3,432E-11	5,684E-11	6,412E-03
<b>B3</b>	6222,21	6261,29	39,09	3,726E-11	7,304E-11	6,262E-03
<b>B4</b>	6222,04	6261,19	39,15	4,375E-11	3,726E-11	6,272E-03
<b>B5</b>	6223,91	6263,72	39,81	3,204E-11	2,351E-11	6,376E-03
<b>B6</b>	6227,91	6267,96	40,06	1,224E-10	3,536E-11	6,411E-03
<b>B7</b>	6230,08	6268,75	38,67	3,796E-11	2,236E-11	6,187E-03
<b>B8</b>	6225,51	6265,13	39,63	2,447E-11	2,936E-11	6,345E-03
<b>B9</b>	6220,28	6261,03	40,75	4,104E-11	4,413E-11	6,530E-03
<b>C1</b>	6217,09	6257,54	40,46	6,463E-11	4,064E-11	6,486E-03
<b>C2</b>	6211,37	6251,85	40,47	4,723E-11	4,560E-11	6,495E-03
<b>C3</b>	6210,77	6248,73	37,95	4,435E-11	4,136E-11	6,092E-03
<b>C4</b>	6213,43	6253,30	37,84	3,726E-11	3,796E-11	6,395E-03
<b>C5</b>	6215,92	6255,56	39,01	3,726E-11	3,591E-11	6,357E-03
<b>C6</b>	6222,34	6262,01	36,91	7,304E-11	4,757E-11	6,355E-03
<b>C7</b>	6222,46	6261,48	39,02	4,552E-11	4,128E-11	6,250E-03
<b>C8</b>	6217,33	6256,16	38,84	5,735E-11	5,821E-11	6,227E-03
<b>C9</b>	6213,41	6253,66	40,25	4,940E-11	3,153E-11	6,458E-03
<b>D1</b>	6211,00	6249,38	38,38	6,382E-11	1,577E-10	6,160E-03
<b>D2</b>	6210,21	6249,32	39,10	4,253E-11	1,461E-10	6,277E-03
<b>D3</b>	6206,23	6244,36	38,13	4,128E-11	2,515E-10	6,125E-03
<b>D4</b>	6202,32	6242,25	39,93	4,993E-11	9,597E-11	6,417E-03
<b>D5</b>	6204,08	6242,82	38,74	8,955E-11	1,434E-10	6,224E-03
<b>D6</b>	6212,24	6251,13	38,90	6,091E-11	6,767E-11	6,241E-03
<b>D7</b>	6213,76	6253,48	39,72	5,758E-11	1,781E-10	6,372E-03
<b>D8</b>	6205,59	6246,40	40,81	4,940E-11	6,781E-11	6,555E-03
<b>D9</b>	6200,67	6241,62	40,95	3,122E-10	1,705E-10	6,583E-03

Tabela D6 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-6 antes da soldagem.

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6256,05	6295,88	39,83	5,250E-11	6,156E-11	6,347E-03
A2	6254,36	6294,24	39,89	4,840E-11	5,026E-11	6,357E-03
A3	6252,76	6290,37	37,61	3,726E-11	4,104E-11	5,997E-03
A4	6252,41	6291,41	39,00	4,757E-11	4,840E-11	6,217E-03
A5	6251,16	6290,25	39,09	9,159E-11	9,386E-11	6,233E-03
A6	6263,13	6299,41	36,28	5,447E-11	1,245E-10	5,776E-03
A7	6261,32	6299,19	37,87	1,204E-10	1,582E-10	6,030E-03
A8	6251,21	6289,38	38,18	6,935E-11	1,004E-10	6,088E-03
A9	6247,31	6285,77	38,46	5,350E-11	7,691E-11	6,137E-03
B1	6261,09	6299,92	38,84	6,463E-11	1,094E-10	6,183E-03
B2	6253,62	6292,20	38,58	4,375E-11	1,572E-10	6,150E-03
B3	6251,39	6289,58	38,19	8,208E-11	5,447E-11	6,091E-03
B4	6252,54	6290,29	37,75	7,304E-11	6,407E-11	6,019E-03
B5	6251,49	6291,05	39,56	1,099E-10	1,192E-10	6,309E-03
B6	6254,48	6292,62	39,06	6,935E-11	4,435E-11	6,079E-03
B7	6254,41	6293,00	38,59	1,162E-10	5,130E-11	6,151E-03
B8	6248,25	6287,88	39,62	8,025E-11	5,257E-11	6,321E-03
B9	6241,52	6279,72	38,20	1,106E-10	1,092E-10	6,101E-03
C1	6254,63	6293,77	39,15	6,177E-11	6,767E-11	6,239E-03
C2	6249,36	6288,72	39,36	7,931E-11	6,509E-11	6,278E-03
C3	6248,17	6283,58	35,41	5,231E-11	8,352E-09	5,652E-03
C4	6246,24	6286,00	39,77	1,087E-10	1,208E-10	6,346E-03
C5	6245,19	6283,15	37,97	5,871E-11	1,203E-10	6,061E-03
C6	6256,37	6293,87	37,50	1,362E-10	2,802E-10	5,975E-03
C7	6255,71	6293,76	38,05	1,168E-10	1,011E-10	6,064E-03
C8	6245,36	6283,91	38,55	5,590E-11	1,700E-10	6,154E-03
C9	6240,15	6278,70	38,55	8,503E-11	8,188E-11	6,159E-03
D1	6254,68	6294,07	39,39	8,030E-11	2,601E-10	6,278E-03
D2	6250,24	6290,14	39,91	1,014E-10	2,509E-10	6,365E-03
D3	6249,82	6287,56	37,75	7,273E-11	8,826E-11	6,021E-03
D4	6250,85	6289,68	38,83	8,272E-11	1,045E-10	6,192E-03
D5	6244,28	6279,28	35,00	1,007E-10	1,203E-08	5,590E-03
D6	6253,67	6290,34	36,67	1,055E-10	1,273E-10	5,847E-03
D7	6250,76	6288,25	37,49	9,987E-11	1,111E-10	5,980E-03
D8	6248,57	6287,29	38,73	1,101E-10	7,122E-11	6,179E-03
D9	6237,91	6277,32	39,41	1,896E-10	9,515E-11	6,298E-03

Tabela D7 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-7 antes da soldagem.

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6268,01	6302,85	34,84	3,479E-11	6,172E-11	5,543E-03
A2	6272,42	6306,48	34,07	5,938E-11	1,719E-10	5,416E-03
A3	6285,03	6316,80	31,76	1,004E-10	1,423E-10	5,041E-03
A4	6286,24	6317,63	31,39	3,193E-11	3,804E-11	4,981E-03
A5	6275,85	6311,41	39,32	1,240E-10	3,193E-11	5,651E-03
A6	6280,66	6315,43	34,77	3,582E-11	4,064E-11	5,521E-03
A7	6277,61	6311,73	34,12	3,591E-11	3,078E-11	5,421E-03
A8	6277,64	6313,82	36,18	3,932E-11	5,911E-11	5,747E-03
A9	6280,00	6316,45	36,46	3,106E-11	4,128E-11	5,788E-03
B1	6270,58	6305,37	35,66	3,441E-11	4,940E-11	5,533E-03
B2	6271,40	6306,75	35,35	4,128E-11	5,528E-11	5,621E-03
B3	6283,01	6317,01	34,00	6,129E-11	4,940E-11	5,397E-03
B4	6284,23	6317,28	33,05	3,432E-11	3,035E-11	5,245E-03
B5	6274,49	6309,14	34,66	3,285E-11	4,472E-11	5,508E-03
B6	6276,77	6311,29	39,06	3,432E-11	1,061E-10	5,484E-03
B7	6278,85	6313,86	35,01	5,495E-11	1,017E-10	5,560E-03
B8	6277,19	6312,81	35,62	4,472E-11	3,582E-11	5,659E-03
B9	6282,93	6318,38	35,45	1,094E-10	3,796E-11	5,626E-03
C1	6273,80	6308,98	35,18	3,591E-11	6,387E-11	5,592E-03
C2	6274,37	6309,21	34,84	2,991E-11	4,360E-11	5,538E-03
C3	6284,45	6319,48	35,03	5,955E-11	5,712E-11	5,558E-03
C4	6287,37	6321,87	34,50	4,413E-11	2,856E-11	5,471E-03
C5	6279,27	6314,87	35,60	5,477E-11	3,770E-11	5,653E-03
C6	6283,10	6319,20	36,10	6,382E-11	1,292E-10	5,728E-03
C7	6283,57	6318,79	35,21	8,656E-11	1,137E-10	5,588E-03
C8	6284,76	6320,75	36,00	6,935E-11	5,495E-11	5,711E-03
C9	6285,54	6321,94	36,39	6,129E-11	4,894E-11	5,773E-03
D1	6271,51	6306,26	36,96	5,026E-11	6,129E-11	5,525E-03
D2	6274,72	6308,89	39,18	8,955E-11	5,350E-11	5,430E-03
D3	6285,32	6319,45	39,26	1,351E-10	1,980E-10	5,415E-03
D4	6291,90	6326,07	39,06	7,518E-11	1,093E-10	5,416E-03
D5	6277,88	6312,62	39,43	6,177E-11	1,766E-10	5,520E-03
D6	6284,08	6320,03	39,41	1,164E-10	2,142E-10	5,705E-03
D7	6278,87	6314,43	39,02	7,452E-11	6,781E-11	5,648E-03
D8	6283,11	6318,97	39,46	4,168E-11	5,200E-11	5,691E-03
D9	6286,27	6321,61	39,55	8,315E-11	6,544E-11	5,606E-03

Tabela D8 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-8 antes da soldagem

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
<b>A1</b>	6250,75	6289,75	39,00	4,588E-11	7,860E-11	6,220E-03
<b>A2</b>	6247,91	6286,00	38,08	3,193E-11	5,826E-11	6,077E-03
<b>A3</b>	6252,16	6291,01	38,85	4,757E-11	5,525E-11	6,195E-03
<b>A4</b>	6246,38	6284,62	38,23	4,413E-11	4,617E-11	6,102E-03
<b>A5</b>	6251,81	6289,15	37,33	1,346E-10	1,272E-10	5,954E-03
<b>A6</b>	6253,84	6291,22	37,38	8,900E-11	5,447E-11	5,960E-03
<b>A7</b>	6265,11	6301,96	36,85	8,522E-11	6,863E-11	5,864E-03
<b>A8</b>	6263,85	6301,16	37,31	8,584E-11	9,358E-11	5,938E-03
<b>A9</b>	6258,64	6294,21	35,58	4,323E-11	5,098E-11	5,668E-03
<b>B1</b>	6251,66	6289,15	37,49	1,024E-10	5,250E-11	5,979E-03
<b>B2</b>	6257,29	6294,74	37,45	7,412E-11	1,503E-10	5,967E-03
<b>B3</b>	6256,65	6294,78	38,13	9,931E-11	5,250E-11	6,075E-03
<b>B4</b>	6254,38	6291,78	37,40	5,911E-11	8,025E-11	5,961E-03
<b>B5</b>	6249,20	6286,81	37,61	5,730E-11	6,859E-11	6,000E-03
<b>B6</b>	6255,35	6292,51	37,16	7,434E-11	8,717E-11	5,923E-03
<b>B7</b>	6263,87	6301,30	37,43	6,935E-11	8,584E-11	5,958E-03
<b>B8</b>	6266,82	6304,37	37,55	7,691E-11	8,025E-11	5,974E-03
<b>B9</b>	6261,73	6296,27	34,54	6,156E-11	5,250E-11	5,501E-03
<b>C1</b>	6258,63	6295,89	37,27	5,501E-11	5,684E-11	5,937E-03
<b>C2</b>	6259,77	6297,21	37,45	5,684E-11	1,099E-10	5,964E-03
<b>C3</b>	6257,18	6295,29	38,11	9,497E-11	3,582E-11	6,071E-03
<b>C4</b>	6255,87	6293,90	38,02	7,691E-11	7,931E-11	6,059E-03
<b>C5</b>	6256,40	6293,03	36,63	8,656E-11	1,019E-10	5,838E-03
<b>C6</b>	6257,81	6294,78	36,97	1,055E-10	6,584E-11	5,890E-03
<b>C7</b>	6268,15	6306,32	38,17	6,283E-11	8,156E-11	6,071E-03
<b>C8</b>	6268,37	6306,63	38,26	1,666E-10	5,938E-11	6,085E-03
<b>C9</b>	6266,97	6301,78	34,80	8,025E-11	8,192E-11	5,538E-03
<b>D1</b>	6261,38	6297,54	36,16	1,498E-10	1,115E-10	5,758E-03
<b>D2</b>	6264,12	6301,65	37,53	1,976E-10	1,175E-10	5,973E-03
<b>D3</b>	6266,20	6302,84	36,63	5,250E-11	1,226E-10	5,829E-03
<b>D4</b>	6259,33	6295,86	36,53	5,735E-11	9,403E-11	5,820E-03
<b>D5</b>	6259,36	6295,85	36,50	7,592E-11	7,159E-11	5,814E-03
<b>D6</b>	6263,58	6300,40	36,81	6,767E-11	5,826E-11	5,860E-03
<b>D7</b>	6272,95	6309,76	36,80	4,723E-11	6,048E-11	5,850E-03
<b>D8</b>	6273,22	6311,55	38,34	6,304E-11	6,283E-11	6,092E-03
<b>D9</b>	6272,70	6307,40	34,70	6,382E-11	5,730E-11	5,517E-03

Tabela D9 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-9 antes da soldagem

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6274,72	6307,37	32,64	1,057E-10	8,599E-11	5,189E-03
A2	6276,16	6311,63	35,47	8,315E-11	1,293E-10	5,635E-03
A3	6275,19	6309,77	34,58	1,527E-10	6,742E-11	5,495E-03
A4	6267,68	6303,30	35,62	6,387E-11	1,419E-10	5,667E-03
A5	6262,91	6298,29	35,38	6,544E-11	1,273E-10	5,634E-03
A6	6264,22	6299,06	34,84	4,323E-11	1,245E-10	5,546E-03
A7	6267,76	6302,27	34,50	8,867E-11	1,873E-10	5,490E-03
A8	6268,65	6304,35	35,69	6,584E-11	1,526E-10	5,678E-03
A9	6259,24	6294,91	35,67	4,168E-11	7,412E-11	5,683E-03
B1	6271,98	6304,97	32,98	6,366E-11	5,643E-11	5,245E-03
B2	6277,25	6311,09	33,84	4,993E-11	1,344E-10	5,376E-03
B3	6276,64	6312,04	35,41	1,912E-10	7,122E-11	5,625E-03
B4	6267,82	6302,91	35,09	9,515E-11	1,376E-10	5,582E-03
B5	6265,17	6298,46	33,29	8,834E-09	9,542E-11	5,299E-03
B6	6262,49	6298,61	36,12	7,881E-11	1,414E-10	5,751E-03
B7	6268,73	6303,18	34,45	5,684E-11	1,426E-10	5,480E-03
B8	6269,70	6306,37	36,67	3,591E-11	1,261E-10	5,833E-03
B9	6265,81	6300,83	35,02	7,048E-11	7,691E-11	5,573E-03
C1	6270,14	6303,08	32,94	6,091E-11	2,552E-11	5,240E-03
C2	6269,17	6305,29	36,12	5,684E-11	4,253E-11	5,745E-03
C3	6270,04	6305,54	35,50	5,282E-11	5,200E-11	5,646E-03
C4	6262,13	6296,72	34,60	5,257E-11	3,024E-11	5,510E-03
C5	6253,78	6288,42	34,63	9,072E-11	5,405E-11	5,523E-03
C6	6255,14	6290,15	35,01	6,463E-11	8,256E-11	5,581E-03
C7	6267,43	6303,94	36,51	1,361E-10	8,675E-11	5,808E-03
C8	6264,40	6301,14	36,75	1,307E-10	9,358E-11	5,849E-03
C9	6262,50	6294,80	32,30	1,208E-10	7,652E-09	5,144E-03
D1	6270,18	6303,54	33,36	1,017E-10	2,032E-10	5,306E-03
D2	6270,94	6307,43	36,48	6,340E-11	9,244E-11	5,801E-03
D3	6267,86	6303,68	35,82	1,220E-10	2,262E-10	5,699E-03
D4	6257,21	6292,76	35,55	1,616E-10	2,711E-10	5,665E-03
D5	6257,18	6293,28	36,10	5,501E-11	7,860E-11	5,753E-03
D6	6259,20	6295,03	35,84	5,356E-11	6,129E-11	5,709E-03
D7	6263,39	6299,10	35,71	4,617E-11	1,577E-10	5,686E-03
D8	6258,84	6296,36	37,52	4,874E-10	2,354E-10	5,977E-03
D9	6256,90	6293,26	36,36	1,352E-10	4,918E-10	5,794E-03

## APÊNDICE E - ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DETERMINAR A HOMOGENEIDADE OU HETEROGENEIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DA ANISOTROPIA (BA0) AO LONGO DO MATERIAL COMO RECEBIDO

Na aplicação da técnica ultrassônica com ondas cisalhantes para avaliar as tensões residuais de soldagem, é importante que se faça uma análise estatística mais aprofundada, principalmente com relação às incertezas dos resultados. Nesse contexto, a partir dos valores de birrefringência acústica do material como recebido (BA0) obtidos dos tempos médios de propagação da onda nas direções longitudinal e transversal, realizou-se uma análise estatística, utilizando-se o ANOVA (Análise de Variância) para se ponderar sobre a distribuição da anisotropia do material, ou seja, se essa distribuição era homogênea ou heterogênea. Pois, dependendo desse resultado, os valores de tensões residuais poderiam apresentar maiores ou menores erros.

### 1 Análise de Variância

A análise de variância é um teste estatístico amplamente difundido entre os analistas e visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente.

Quanto menor é a variância, mais próximos os valores estão da média; mas quanto maior ela é, mais os valores estão distantes da média. Considerando-se que  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são os  $n$  elementos de uma amostra e que  $\bar{x}$  é a média aritmética desses elementos. Então, o cálculo da variância amostral é dado pela Equação E1.

$$\text{Variância Amostral} = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{E1})$$

Por outro lado, se for solicitado determinar a variância populacional, considera-se então todos os elementos da população, e não apenas de uma amostra. Nesse caso, o cálculo possui uma pequena diferença, conforme mostra a equação E2.

$$\text{Variância Populacional} = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n} \quad (\text{E2})$$

## 2 Cálculo de Variância através do ANOVA

Para o cálculo da variância foi utilizado a ferramenta ANOVA (*analyse of variance*) que está contido no programa de análise de dados Excel da Microsoft. O objetivo principal da ANOVA é apontar se um grupo é estatisticamente diferente do outro ou não, baseado na análise de comparação das médias oriundas desses grupos. Para isso, as hipóteses de nulidade e alternativa foram testadas. Essas hipóteses são mostradas abaixo:

H<sub>0</sub>: As médias são iguais ( $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$ )

H<sub>1</sub>: Existe pelo menos uma das médias diferentes.

Se a hipótese nula for verdadeira, todos os tratamentos terão uma média comum  $\mu$ . Caso contrário, a hipótese nula é rejeitada a um determinado nível de significância, então, existe pelo menos uma das médias de um tratamento que é diferente das demais.

Existem dois métodos para se calcular a variância, utilizando-se o ANOVA. A primeira é a **variância entre grupos (MQG)** e a segunda é a **variância das médias dentro do grupo ou residual (MQR)**. Em uma Anova, calcula-se esses dois componentes de variância. Se a variância calculada usando a média (MQG) for maior do que a calculada (MQR) usando os dados pertencentes a cada grupo individual, isso pode indicar que existe uma diferença significativa entre os grupos, ou seja, que as amostras possam ser diferentes. A Tabela E1 mostra a análise de variância

Tabela E.1 - Tabela da análise de variância.

Fonte de Variação	SQ	GDL	MQ	TESTE F
<b>Entre Grupos</b>	SQG	K-1	MQG	MQG / MQR
<b>Dentro dos Grupos</b>	SQR	N-K	MQR	-
<b>Total</b>	SQT	N-1	-	-

Em que:

$SQT = SQG + SQR$  (mede a variação geral de todas as observações).

SQT: é a soma dos quadrados totais;

SQG: é a soma dos quadrados dos grupos, associada exclusivamente a um efeito dos grupos;

SQR: é a soma dos quadrados dos resíduos, devidos exclusivamente ao erro aleatório, medida dentro dos grupos;

MQG: é a média quadrada entre os grupos;

MQR: é a média quadrada dos resíduos (dentro de cada grupo);

GDL: graus de Liberdade:

- $k - 1 = \text{número de grupos} - 1$ ;
- $N - k = \text{número de observações} - \text{número de grupos}$ .

Para testar a hipótese  $H_0$ , utiliza-se o teste  $F$ , mostrado na Tabela E1 e dado pela Equação E3. Este teste é a razão da variação entre os grupos e a variação dentro dos grupos. Este teste tem a finalidade de estimar as diferenças entre os dois componentes da variabilidade, que permite a comparação de mais de duas médias simultaneamente.

$$F = \frac{\text{VARIÂNCIA ENTRE GRUPOS} - \text{MQG} / (k-1)}{\text{VARIÂNCIA DENTRO DOS GRUPOS} - \text{MQR} / (n-k)} \quad (\text{E3})$$

Os valores de  $F$  obtidos pela ferramenta ANOVA para determinação do teste de significância são dados abaixo:

- $F$  próximo de 1,0: as duas estimativas da variância são semelhantes e aceita-se  $H_0$ ;
- $F$  muito maior que 1,0: existe alguma força atribuível para as diferenças dos grupos e rejeita-se  $H_0$ ;
- $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}} = H_0$  verdadeira;
- $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}} = H_0$  recusada.

Se  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ , rejeitamos a hipótese de nulidade  $H_0$ , ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível  $\alpha$  de significância escolhido. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade  $H_0$ , ou seja, não há evidências de diferença significativa entre tratamentos, ao nível  $\alpha$  de significância escolhido.

Outra maneira de avaliar a significância da estatística  $F$  é utilizando o p-valor. Se o p-valor  $< \alpha$ , rejeita-se a hipótese de nulidade  $H_0$ . Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade  $H_0$ , ou seja, não há evidências de diferenças significativas entre os tratamentos, ao nível  $\alpha$  de significância escolhido.

A análise estatística utilizando a análise de variância para determinar a homogeneidade ou heterogeneidade da distribuição da anisotropia do material como recebido consistiu a partir dos valores de  $BAO$ , mostrados na Tabela E4, obtidos a partir dos tempos médios de percurso da onda capturados nas direções longitudinal e transversal, mostrados nas Tabelas E2 e E3, respectivamente, e estes obtidos a partir das tabelas do Apêndice D.

Tabela E2 - Variação dos tempos médios (ns) de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal antes da soldagem.

Tempos Médios na Direção Longitudinal (ns)				
Pontos	Linha A	Linha B	Linha C	Linha D
1	6250,22	6252,61	6251,45	6251,17
2	6250,74	6252,80	6251,00	6251,81
3	6252,27	6254,24	6252,14	6253,05
4	6251,72	6253,55	6252,64	6252,41
5	6248,98	6249,48	6248,16	6247,37
6	6253,24	6253,22	6253,66	6252,30
7	6254,95	6256,02	6256,36	6254,29
8	6251,74	6253,94	6253,32	6252,42
9	6249,29	6251,58	6251,69	6249,77
<b>Média</b>	<b>6251,46</b>	<b>6253,05</b>	<b>6252,34</b>	<b>6251,62</b>
<b>D. Padrão</b>	<b>1,91</b>	<b>1,82</b>	<b>2,22</b>	<b>2,02</b>

Tabela E3 - Variação dos tempos médios (ns) de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção transversal antes da soldagem.

Tempos Médios na Direção Transversal (ns)				
Pontos	Linha A	Linha B	Linha C	Linha D
1	6287,66	6289,74	6288,77	6287,99
2	6288,84	6290,92	6289,01	6289,73
3	6289,13	6291,68	6289,21	6290,20
4	6288,62	6290,56	6289,70	6289,37
5	6286,51	6287,46	6285,47	6284,57
6	6289,89	6290,68	6290,48	6289,45
7	6291,88	6293,42	6293,73	6291,69
8	6289,56	6292,33	6291,40	6290,82
9	6286,84	6289,04	6288,61	6287,32

<b>Media</b>	<b>6288,77</b>	<b>6290,65</b>	<b>6289,60</b>	<b>6289,02</b>
<b>D. Padrão</b>	<b>1,65</b>	<b>1,78</b>	<b>2,24</b>	<b>2,13</b>

Tabela E4 - Birrefringências acústicas distribuídas ao longo do material como recebido (BA0)

<b>Pontos</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
1	5,973E-03	5,921E-03	5,952E-03	5,872E-03
2	6,077E-03	6,078E-03	6,062E-03	6,047E-03
3	5,878E-03	5,967E-03	5,912E-03	5,923E-03
4	5,884E-03	5,901E-03	5,909E-03	5,895E-03
5	5,988E-03	6,059E-03	5,954E-03	5,936E-03
6	5,843E-03	5,972E-03	5,871E-03	5,925E-03
7	5,886E-03	5,960E-03	5,956E-03	5,962E-03
8	6,031E-03	6,121E-03	6,072E-03	6,124E-03
9	5,991E-03	5,974E-03	5,888E-03	5,991E-03
<b>Desvio Padrão</b>		7,507E-05	<b>BA0Médio</b>	5,965E-03

De posse dos valores de  $BA_0$ , (Tabela E4), a ferramenta ANOVA: FATOR ÚNICO realizou a análise de variância desses valores em duas direções, na vertical, indicada pelas linhas de A a D e na horizontal, indicada pelos pontos de 1 (um) a 9 (nove). Essas análises foram realizadas dentro de um grau de confiança de 95% ou de incerteza de 5%.

Utilizando-se o programa Microsoft Excel, através do ícone “ferramentas”, escolhe-se a análise de dados, onde se solicita ANOVA: FATOR ÚNICO, abre-se a janela, conforme mostrado na Figura E1. Nesta janela, selecionam-se as duas direções analisadas e se adiciona o grau de incerteza do teste.

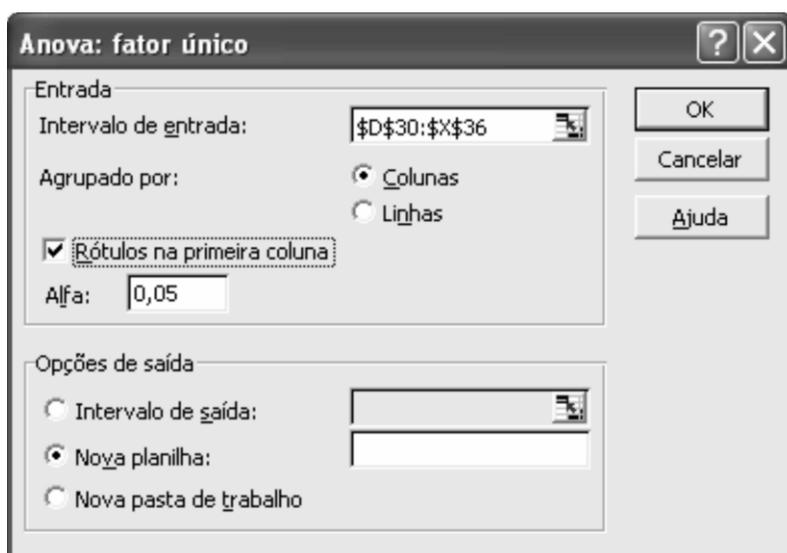


Figura E1 - Imagem da tela do ANOVA.

Com a análise de todos os pontos, obteve-se os resultados para as duas direções, conforme mostram as Tabelas E5 e E6.

Tabela E5 - Resultados das análises estatísticas das linhas A, B, C e D do material como recebido.

<b>Anova: fator único</b>						
<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>		
<b>Linha A</b>	9	5,36E-02	5,95E-03	6,41E-09		
<b>Linha B</b>	9	5,40E-02	5,99E-03	5,45E-09		
<b>Linha C</b>	9	5,36E-02	5,94E-03	5,07E-09		
<b>Linha D</b>	9	5,37E-02	5,97E-03	6,29E-09		
<b>Anova</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos (MQG)</b>	1,12E-08	3	3,73E-09	6,42E-01	5,94E-01	2,90
<b>Dentro dos grupos (MQR)</b>	1,86E-07	32	5,81E-09			
<b>Total</b>	1,97E-07	35				

Tabela E6 - Resultados das análises estatísticas dos pontos de 1 a 9.

<b>Anova: fator único</b>						
<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>		
<b>Ponto 1</b>	4	0,0237	0,0059	1,91E-09		
<b>Ponto 2</b>	4	0,0243	0,0060	2,05E-10		
<b>Ponto 3</b>	4	0,0237	0,0059	1,35E-09		
<b>Ponto 4</b>	4	0,0235	0,0059	1,11E-10		
<b>Ponto 5</b>	4	0,0239	0,0059	2,93E-09		
<b>Ponto 6</b>	4	0,0236	0,0059	3,27E-09		
<b>Ponto 7</b>	4	0,0238	0,0059	1,33E-09		
<b>Ponto 8</b>	4	0,0243	0,0061	1,94E-09		
<b>Ponto 9</b>	4	0,0238	0,0059	2,43E-09		
<b>Anova</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos (MQG)</b>	1,51E-07	8	1,89E-08	10,97	9,71E-07	2,31
<b>Dentro dos grupos (MQR)</b>	4,64E-08	27	1,72E-09			
<b>Total</b>	1,97E-07	35				

**APÊNDICE F - TEMPO DE PERCURSO DA ONDA ULTRASSÔNICA E  
BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA APÓS A SOLDAGEM**

**PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW**

Tabela F1 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-7 após a soldagem GMAW.

Pontos	Tempo médio (s)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6271,14	6306,04	34,89	1,744E-10	1,268E-10	5,549E-03
A2	6271,67	6307,99	36,32	7,122E-11	4,552E-11	5,774E-03
A3	6286,02	6318,83	32,81	8,315E-11	9,072E-11	5,207E-03
A4	6285,42	6318,36	32,93	6,155E-11	5,104E-11	5,226E-03
A6	6282,43	6313,49	31,06	5,447E-11	4,167E-11	4,931E-03
A7	6281,90	6314,46	32,55	1,175E-10	9,017E-11	5,169E-03
A8	6280,97	6316,70	35,73	1,127E-10	1,302E-10	5,672E-03
A9	6283,80	6320,11	36,32	1,255E-10	1,212E-10	5,763E-03
B1	6276,75	6310,73	33,97	5,495E-11	1,032E-10	5,398E-03
B2	6275,08	6308,33	33,25	5,954E-11	1,043E-10	5,285E-03
B3	6287,70	6315,53	27,83	7,158E-11	8,777E-11	4,416E-03
B4	6291,98	6310,20	18,22	6,589E-11	4,127E-11	2,892E-03
B6	6285,37	6306,73	21,36	7,081E-11	4,552E-11	3,392E-03
B7	6285,06	6312,69	27,63	1,115E-10	7,181E-11	4,387E-03
B8	6281,59	6315,31	33,72	7,122E-11	8,626E-11	5,353E-03
B9	6284,14	6318,52	34,38	8,750E-11	6,340E-11	5,456E-03
C1	6277,58	6312,84	35,26	1,186E-10	8,522E-11	5,601E-03
C2	6278,05	6311,53	33,47	9,733E-11	9,104E-11	5,318E-03
C3	6290,95	6317,79	26,84	8,735E-11	8,777E-11	4,258E-03
C4	6301,27	6321,49	20,22	1,881E-10	1,115E-10	3,204E-03
C6	6288,10	6311,51	23,41	1,163E-10	5,525E-11	3,716E-03
C7	6287,26	6316,13	28,88	1,549E-10	7,122E-11	4,582E-03
C8	6286,07	6322,03	35,96	2,040E-10	1,118E-10	5,704E-03
C9	6287,35	6323,38	36,03	9,176E-11	9,090E-11	5,714E-03
D1	6273,86	6308,52	34,66	1,168E-10	1,151E-10	5,509E-03
D2	6274,71	6309,64	34,93	1,296E-10	6,340E-11	5,551E-03
D3	6286,58	6318,56	31,97	1,757E-10	9,304E-11	5,073E-03
D4	6291,20	6322,36	31,16	1,297E-10	6,609E-11	4,941E-03
D6	6281,28	6318,16	36,88	1,032E-10	6,048E-11	5,854E-03
D7	6279,40	6316,02	36,62	1,229E-10	1,239E-10	5,814E-03
D8	6283,83	6320,49	36,66	8,777E-11	1,340E-10	5,817E-03
D9	6285,45	6320,40	34,95	7,517E-11	6,069E-11	5,545E-03

Tabela F2 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-8 após a soldagem GMAW.

Pontos	Tempo médio (s)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6252,78	6294,45	41,67	5,712E-11	1,874E-10	6,642E-03
A2	6250,16	6286,84	36,68	4,940E-11	6,091E-11	5,851E-03
A3	6254,03	6291,44	37,41	9,244E-11	8,208E-11	5,964E-03
A4	6245,14	6283,81	38,67	8,252E-11	6,935E-11	6,173E-03
A6	6253,02	6287,15	34,13	1,150E-10	7,763E-11	5,443E-03
A7	6265,32	6301,99	36,67	1,029E-10	9,333E-11	5,835E-03
A8	6264,19	6300,37	36,18	1,555E-10	8,443E-09	5,759E-03
A9	6257,94	6293,33	35,39	5,982E-11	6,977E-11	5,638E-03
B1	6254,57	6292,43	37,86	8,176E-11	1,032E-10	6,034E-03
B2	6259,38	6295,26	35,88	1,272E-10	6,129E-11	5,716E-03
B3	6258,40	6291,85	33,46	8,503E-11	6,172E-11	5,331E-03
B4	6256,64	6282,87	26,23	1,150E-10	1,094E-10	4,184E-03
B6	6261,26	6283,86	22,60	1,022E-10	1,768E-10	3,603E-03
B7	6266,40	6299,18	32,78	8,347E-11	1,115E-10	5,218E-03
B8	6265,25	6301,42	36,18	1,037E-10	6,366E-11	5,757E-03
B9	6262,06	6297,56	35,50	1,079E-10	7,237E-11	5,653E-03
C1	6259,12	6295,96	36,84	5,643E-11	7,363E-11	5,869E-03
C2	6260,69	6297,22	36,53	4,552E-11	7,159E-11	5,819E-03
C3	6258,38	6289,78	31,40	6,382E-11	1,400E-10	5,004E-03
C4	6260,43	6284,41	23,97	1,092E-10	7,482E-11	3,822E-03
C6	6262,10	6286,91	24,81	8,955E-11	1,353E-10	3,954E-03
C7	6268,94	6301,67	32,73	1,531E-10	9,072E-11	5,208E-03
C8	6268,60	6307,13	38,53	8,429E-11	6,786E-11	6,127E-03
C9	6267,90	6302,97	35,07	1,405E-10	1,001E-10	5,579E-03
D1	6262,35	6298,15	35,80	1,556E-10	1,225E-10	5,700E-03
D2	6263,11	6300,62	37,50	4,552E-11	6,902E-11	5,970E-03
D3	6263,87	6299,37	35,50	7,145E-11	7,656E-11	5,651E-03
D4	6258,46	6291,77	33,31	1,029E-10	1,125E-10	5,308E-03
D6	6260,12	6297,36	37,24	8,626E-11	1,087E-10	5,931E-03
D7	6271,54	6310,68	39,14	2,339E-10	9,072E-11	6,222E-03
D8	6273,65	6311,98	38,33	1,419E-10	9,248E-11	6,091E-03
D9	6273,86	6306,99	33,13	1,450E-10	1,363E-10	5,266E-03

Tabela F3 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-9 após a soldagem GMAW.

Pontos	Tempo médio (s)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6276,48	6308,43	31,95	6,972E-11	3,402E-11	5,078E-03
A2	6279,46	6313,68	34,22	4,832E-11	5,231E-11	5,434E-03
A3	6275,09	6310,39	35,29	6,934E-11	3,663E-11	5,608E-03
A4	6265,72	6301,82	36,10	1,206E-10	5,954E-11	5,746E-03
A6	6263,73	6295,80	32,07	5E-11	4,435E-11	5,107E-03
A7	6267,38	6302,01	34,63	7,656E-11	5,281E-11	5,510E-03
A8	6268,56	6304,36	35,80	8,626E-11	5,525E-11	5,695E-03
A9	6262,63	6298,35	35,72	5,231E-11	5,250E-11	5,687E-03
B1	6273,31	6305,23	31,92	5,758E-11	3,355E-11	5,076E-03
B2	6279,14	6312,62	33,48	5,199E-11	6,584E-11	5,318E-03
B3	6280,77	6310,98	30,21	6,155E-11	4,375E-11	4,799E-03
B4	6272,82	6295,40	22,58	6,901E-11	6,781E-11	3,594E-03
B6	6269,68	6292,72	23,04	7,873E-11	1,060E-10	3,668E-03
B7	6271,52	6302,25	30,72	5,954E-11	5,104E-11	4,887E-03
B8	6272,23	6307,08	34,85	4,666E-11	7,327E-11	5,540E-03
B9	6268,34	6303,56	35,22	6,463E-11	5,447E-11	5,603E-03
C1	6274,67	6306,55	31,88	8,503E-11	8,584E-11	5,067E-03
C2	6274,90	6308,99	34,09	6,781E-11	6,256E-11	5,418E-03
C3	6275,82	6305,51	29,69	9,190E-11	1,588E-10	4,720E-03
C4	6270,79	6291,08	20,29	5,820E-11	3,769E-11	3,231E-03
C6	6259,88	6282,82	22,94	6,569E-11	7,963E-11	3,657E-03
C7	6271,58	6302,18	30,60	5,954E-11	4,993E-11	4,867E-03
C8	6266,19	6300,50	34,32	8,900E-11	5,495E-11	5,462E-03
C9	6263,42	6298,53	35,11	6,366E-11	7,521E-11	5,589E-03
D1	6271,75	6305,04	33,29	3,974E-11	5,200E-11	5,294E-03
D2	6273,30	6308,69	35,38	8,626E-11	5,250E-11	5,624E-03
D3	6269,67	6304,67	35,00	1,075E-10	5,712E-11	5,566E-03
D4	6256,79	6288,64	31,85	7,771E-10	5,910E-11	5,078E-03
D6	6256,07	6290,50	34,43	6,584E-11	7,779E-11	5,488E-03
D7	6261,50	6297,32	35,82	3,973E-11	5,199E-11	5,704E-03
D8	6262,84	6298,85	36,01	8,626E-11	5,250E-11	5,733E-03
D9	6260,40	6295,68	35,29	1,074E-10	5,712E-11	5,620E-03

## PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-CW(20%)

Tabela F4 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-1 após a soldagem CW (20%).

Pontos	Tempo médio (ns)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
<b>A1</b>	6253,39	6290,78	37,39	1,071E-10	1,093E-10	5,961E-03
<b>A2</b>	6253,15	6292,48	39,32	1,141E-10	8,959E-11	6,269E-03
<b>A3</b>	6248,64	6288,91	40,27	1,772E-10	1,004E-10	6,423E-03
<b>A4</b>	6240,24	6278,48	38,24	8,926E-11	7,826E-11	6,109E-03
<b>A6</b>	6242,23	6275,94	33,70	1,081E-10	8,900E-11	5,385E-03
<b>A7</b>	6247,54	6284,83	37,29	8,156E-11	5,231E-11	5,951E-03
<b>A8</b>	6245,94	6285,22	39,28	6,609E-11	8,955E-11	6,270E-03
<b>A9</b>	6246,18	6284,61	38,43	1,005E-10	8,926E-11	6,133E-03
<b>B1</b>	6249,68	6286,16	36,47	8,926E-11	1,189E-10	5,819E-03
<b>B2</b>	6256,59	6294,24	37,65	1,387E-10	8,252E-11	6,000E-03
<b>B3</b>	6255,44	6290,06	34,62	1,083E-10	6,544E-11	5,519E-03
<b>B4</b>	6245,71	6272,57	26,86	8,522E-11	9,515E-11	4,291E-03
<b>B6</b>	6241,72	6267,53	25,81	7,512E-11	1,768E-10	4,127E-03
<b>B7</b>	6247,55	6280,88	33,33	7,340E-11	7,145E-11	5,321E-03
<b>B8</b>	6247,66	6285,29	37,63	7,826E-11	7,964E-11	6,005E-03
<b>B9</b>	6241,90	6280,92	39,02	1,658E-10	9,090E-11	6,231E-03
<b>C1</b>	6243,08	6278,67	35,59	1,195E-10	1,219E-10	5,685E-03
<b>C2</b>	6249,58	6287,35	37,77	6,172E-11	7,434E-11	6,026E-03
<b>C3</b>	6247,76	6281,06	33,30	1,266E-10	7,826E-11	5,316E-03
<b>C4</b>	6242,25	6267,84	25,60	8,414E-11	6,544E-11	4,092E-03
<b>C6</b>	6240,72	6266,98	26,26	7,482E-11	7,522E-11	4,199E-03
<b>C7</b>	6244,60	6279,02	34,42	1,371E-10	1,415E-10	5,496E-03
<b>C8</b>	6241,88	6280,11	38,23	7,864E-11	1,079E-10	6,106E-03
<b>C9</b>	6239,46	6278,50	39,05	1,202E-10	9,597E-11	6,238E-03
<b>D1</b>	6243,73	6279,68	35,95	1,082E-10	1,473E-10	5,742E-03
<b>D2</b>	6244,85	6284,30	39,45	6,973E-11	6,689E-11	6,298E-03
<b>D3</b>	6241,62	6279,18	37,56	8,288E-11	7,847E-11	6,000E-03
<b>D4</b>	6234,98	6269,22	34,23	6,742E-11	1,004E-10	5,476E-03
<b>D6</b>	6229,71	6269,95	40,25	1,589E-10	1,323E-10	6,440E-03
<b>D7</b>	6239,26	6278,91	39,64	1,168E-10	1,589E-10	6,334E-03
<b>D8</b>	6235,61	6275,64	40,03	7,048E-11	1,592E-10	6,399E-03
<b>D9</b>	6232,72	6273,47	40,75	1,262E-10	1,117E-10	6,516E-03

Tabela F5 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-2 após a soldagem CW(20%).

Pontos	Tempo médio (s)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6189,00	6227,70	38,71	1,063E-10	1,318E-10	6,234E-03
A2	6192,98	6231,50	38,53	8,811E-11	6,973E-11	6,202E-03
A3	6190,94	6229,28	38,34	1,314E-10	9,072E-11	6,174E-03
A4	6187,20	6224,89	37,69	7,159E-11	1,021E-10	6,074E-03
A6	6193,10	6227,18	34,08	8,111E-11	4,667E-11	5,488E-03
A7	6197,64	6235,34	37,70	1,157E-10	6,935E-11	6,065E-03
A8	6202,04	6241,51	39,47	1,195E-10	7,539E-11	6,343E-03
A9	6199,21	6236,39	37,18	1,389E-10	1,053E-10	5,979E-03
B1	6200,66	6239,46	38,80	8,569E-11	1,280E-10	6,238E-03
B2	6201,38	6240,18	38,80	1,250E-10	1,042E-10	6,238E-03
B3	6202,88	6236,63	33,75	1,262E-10	9,921E-11	5,427E-03
B4	6204,68	6232,75	28,07	8,188E-11	5,495E-11	4,514E-03
B6	6208,00	6234,40	26,40	6,781E-11	3,536E-11	4,243E-03
B7	6214,84	6248,19	33,35	8,777E-11	1,104E-10	5,352E-03
B8	6212,79	6250,41	37,62	6,407E-11	1,529E-10	6,037E-03
B9	6208,65	6244,12	35,47	1,057E-10	1,045E-10	5,697E-03
C1	6211,64	6250,14	38,50	5,821E-11	4,168E-11	6,179E-03
C2	6211,69	6249,65	37,97	8,751E-11	4,867E-11	6,093E-03
C3	6213,23	6247,67	34,44	2,296E-10	1,162E-10	5,527E-03
C4	6213,40	6239,93	26,53	6,973E-11	4,940E-11	4,261E-03
C6	6219,10	6246,12	27,02	7,340E-11	8,315E-11	4,335E-03
C7	6222,39	6255,70	33,31	8,867E-11	1,000E-10	5,339E-03
C8	6226,21	6264,93	38,73	9,018E-11	8,315E-11	6,201E-03
C9	6217,97	6254,47	36,50	1,280E-10	6,742E-11	5,853E-03
D1	6221,27	6258,83	37,56	9,244E-11	1,490E-10	6,019E-03
D2	6218,33	6257,34	39,01	8,645E-11	5,155E-11	6,253E-03
D3	6219,28	6255,91	36,63	7,327E-11	6,129E-11	5,872E-03
D4	6218,05	6252,34	34,29	5,356E-11	1,255E-10	5,500E-03
D6	6218,69	6256,15	37,46	1,122E-10	1,070E-10	6,006E-03
D7	6226,41	6266,32	39,91	6,609E-11	1,186E-10	6,390E-03
D8	6227,12	6264,82	37,69	6,973E-11	2,300E-10	6,035E-03
D9	6221,57	6258,68	37,10	1,251E-10	1,209E-10	5,946E-03

Tabela F6 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-6 após a soldagem CW (20%).

Pontos	Tempo médio (s)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6260,33	6298,01	37,68	1,139E-10	1,127E-10	6,000E-03
A2	6257,72	6296,41	38,69	9,101E-11	9,442E-11	6,164E-03
A3	6256,58	6295,21	38,63	9,072E-11	5,684E-11	6,155E-03
A4	6252,76	6291,16	38,40	6,806E-11	4,833E-11	6,123E-03
A6	6264,66	6297,59	32,93	1,119E-10	9,333E-11	5,242E-03
A7	6263,19	6300,03	36,84	1,115E-10	7,678E-11	5,864E-03
A8	6251,79	6290,08	38,29	8,091E-11	9,386E-11	6,106E-03
A9	6246,85	6285,84	38,99	9,032E-11	7,048E-11	6,222E-03
B1	6261,57	6299,99	38,42	6,935E-11	1,024E-10	6,117E-03
B2	6256,31	6295,15	38,84	1,024E-10	8,429E-11	6,189E-03
B3	6255,36	6295,53	40,18	9,305E-11	9,333E-11	6,402E-03
B4	6253,49	6284,79	31,31	8,127E-11	7,122E-11	4,994E-03
B6	6264,24	6288,18	23,94	1,340E-10	2,121E-10	3,814E-03
B7	6257,87	6290,25	32,38	1,193E-10	6,584E-11	5,161E-03
B8	6253,60	6290,32	36,72	1,381E-10	1,322E-10	5,855E-03
B9	6243,71	6282,55	38,83	1,477E-10	1,141E-10	6,201E-03
C1	6255,34	6294,29	38,95	1,107E-10	1,024E-10	6,207E-03
C2	6248,77	6287,79	39,02	1,089E-10	8,288E-11	6,225E-03
C3	6251,83	6283,53	31,70	1,250E-10	6,382E-11	5,057E-03
C4	6251,94	6278,44	26,50	1,034E-10	6,304E-11	4,229E-03
C6	6260,11	6287,02	26,91	9,635E-11	1,312E-10	4,290E-03
C7	6258,15	6292,31	34,16	1,391E-10	8,414E-11	5,443E-03
C8	6243,61	6281,48	37,87	6,469E-11	6,569E-11	6,048E-03
C9	6240,99	6278,47	37,48	8,675E-11	8,472E-11	5,987E-03
D1	6252,29	6291,94	39,65	7,626E-11	7,926E-11	6,322E-03
D2	6249,85	6289,03	39,18	8,955E-11	9,921E-11	6,250E-03
D3	6248,51	6285,11	36,60	1,115E-10	8,870E-11	5,840E-03
D4	6249,21	6283,92	34,72	9,720E-11	9,090E-11	5,540E-03
D6	6251,98	6291,23	39,25	8,192E-11	1,618E-10	6,259E-03
D7	6251,20	6289,09	37,89	1,919E-10	2,411E-10	6,043E-03
D8	6245,81	6285,30	39,49	7,232E-11	8,188E-11	6,302E-03
D9	6237,99	6276,82	38,83	1,280E-10	1,195E-10	6,205E-03

## PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-CW(40%)

Tabela F7 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-3 após a soldagem CW(40%).

Pontos	Tempo médio (s)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6278,75	6315,09	36,34	7,691E-11	2,111E-10	5,771E-03
A2	6274,95	6314,27	39,32	1,666E-10	1,162E-10	6,246E-03
A3	6272,30	6309,84	37,54	2,179E-10	1,417E-10	5,967E-03
A4	6273,03	6310,18	37,14	7,122E-11	6,177E-11	5,904E-03
A6	6289,41	6318,18	28,77	7,237E-11	2,452E-10	4,564E-03
A7	6280,19	6314,07	33,88	1,683E-10	9,921E-11	5,380E-03
A8	6265,82	6303,87	38,05	1,658E-10	9,635E-11	6,054E-03
A9	6265,20	6301,51	36,31	2,288E-10	1,569E-10	5,780E-03
B1	6277,10	6315,15	38,05	1,923E-10	1,006E-10	6,043E-03
B2	6272,81	6309,69	36,88	1,162E-10	2,933E-10	5,862E-03
B3	6271,44	6302,29	30,85	1,150E-10	9,262E-11	4,907E-03
B4	6273,50	6300,15	26,65	3,301E-10	1,864E-10	4,239E-03
B6	6285,07	6305,25	20,18	1,453E-10	1,057E-10	3,206E-03
B7	6274,77	6306,78	32,00	3,844E-10	9,665E-11	5,088E-03
B8	6264,35	6301,55	37,19	2,854E-10	1,441E-10	5,920E-03
B9	6263,83	6300,47	36,63	7,493E-11	8,900E-11	5,831E-03
C1	6270,67	6310,94	40,26	2,420E-10	2,433E-10	6,401E-03
C2	6265,11	6301,20	36,08	1,651E-10	1,157E-10	5,743E-03
C3	6265,42	6296,49	31,07	1,399E-10	1,319E-10	4,946E-03
C4	6275,46	6298,64	23,18	1,092E-10	1,270E-10	3,688E-03
C6	6280,63	6302,90	22,26	1,042E-10	1,234E-10	3,538E-03
C7	6270,67	6302,40	31,74	1,541E-10	1,323E-10	5,048E-03
C8	6262,09	6298,10	36,01	1,127E-10	1,618E-10	5,734E-03
C9	6259,07	6296,83	37,77	2,015E-10	1,184E-10	6,015E-03
D1	6269,07	6306,95	37,88	8,599E-11	1,705E-10	6,025E-03
D2	6268,01	6306,18	38,17	1,635E-10	1,092E-10	6,072E-03
D3	6268,02	6303,39	35,38	1,800E-10	1,507E-10	5,628E-03
D4	6266,57	6300,44	33,87	1,599E-10	1,961E-10	5,390E-03
D6	6267,99	6304,75	36,76	3,411E-10	6,206E-10	5,848E-03
D7	6269,04	6306,65	37,61	1,621E-10	1,618E-10	5,982E-03
D8	6262,23	6300,06	37,82	8,315E-11	7,931E-11	6,022E-03
D9	6259,18	6296,11	36,93	1,517E-10	1,322E-10	5,882E-03

Tabela F8 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-4 após a soldagem CW(40%).

Pontos	Tempo médio (s)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6266,97	6304,01	37,04	2,233E-10	1,037E-10	5,893E-03
A2	6268,50	6304,21	35,71	7,609E-11	8,095E-11	5,680E-03
A3	6276,13	6311,58	35,45	8,013E-11	8,472E-11	5,633E-03
A4	6280,59	6314,45	33,86	8,565E-11	7,434E-11	5,377E-03
A6	6277,45	6309,08	31,63	6,973E-11	4,723E-11	5,025E-03
A7	6273,28	6307,97	34,69	1,057E-10	6,156E-11	5,515E-03
A8	6271,60	6309,18	37,58	1,864E-10	1,462E-10	5,975E-03
A9	6274,05	6314,08	40,03	5,183E-10	1,764E-10	6,360E-03
B1	6267,20	6303,43	36,23	1,087E-10	5,730E-11	5,765E-03
B2	6268,70	6304,18	35,48	9,597E-11	9,662E-11	5,643E-03
B3	6283,13	6312,59	29,46	6,767E-11	7,964E-11	4,677E-03
B4	6289,82	6310,26	20,44	7,304E-11	5,447E-11	3,244E-03
B6	6283,09	6305,47	22,38	6,091E-11	6,935E-11	3,556E-03
B7	6280,15	6310,31	30,17	8,188E-11	6,664E-11	4,792E-03
B8	6276,56	6311,58	35,02	6,340E-11	9,628E-11	5,564E-03
B9	6279,68	6316,56	36,88	4,443E-11	5,447E-11	5,856E-03
C1	6266,00	6301,52	35,52	5,826E-11	6,544E-11	5,653E-03
C2	6272,40	6307,01	34,61	9,244E-11	9,442E-11	5,503E-03
C3	6282,96	6311,14	28,18	6,129E-11	4,757E-11	4,476E-03
C4	6294,64	6313,53	18,88	8,472E-11	5,000E-11	2,995E-03
C6	6284,75	6307,43	22,68	8,955E-11	6,767E-11	3,602E-03
C7	6278,63	6308,78	30,14	9,770E-11	5,735E-11	4,789E-03
C8	6274,83	6310,80	35,97	6,589E-11	9,987E-11	5,716E-03
C9	6284,52	6320,61	36,10	7,656E-11	8,091E-11	5,727E-03
D1	6269,95	6305,37	35,41	1,045E-10	8,156E-11	5,632E-03
D2	6272,14	6306,21	34,07	8,252E-11	7,122E-11	5,417E-03
D3	6279,74	6312,00	32,26	8,472E-11	7,518E-11	5,124E-03
D4	6293,26	6321,54	28,28	1,706E-10	8,777E-11	4,484E-03
D6	6276,26	6311,70	35,44	6,511E-11	8,188E-11	5,632E-03
D7	6276,10	6312,02	35,92	7,691E-11	7,504E-11	5,707E-03
D8	6280,15	6316,68	36,53	6,781E-11	8,176E-11	5,799E-03
D9	6282,31	6318,94	36,63	1,017E-10	1,055E-10	5,815E-03

Tabela F9 - Tempos médios e birrefringências acústicas obtidos na AM-5 após a soldagem CW(40%).

Pontos	Tempo médio (s)		Var. do tempo (ns)	Desvio padrão		Birrefringência
	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	
A1	6234,91	6273,90	38,99	1,083E-10	1,026E-10	6,234E-03
A2	6228,90	6268,19	39,28	4,153E-10	3,678E-10	6,287E-03
A3	6227,98	6266,04	38,06	2,386E-10	2,296E-10	6,093E-03
A4	6234,91	6273,90	38,99	1,083E-10	1,026E-10	6,234E-03
A6	6233,70	6267,71	34,01	1,356E-10	1,840E-10	5,442E-03
A7	6234,29	6271,43	37,14	2,267E-10	1,680E-10	5,940E-03
A8	6225,23	6264,56	39,33	2,080E-10	9,014E-11	6,298E-03
A9	6222,20	6264,03	41,83	4,922E-10	1,473E-10	6,700E-03
B1	6230,16	6269,36	39,20	2,083E-10	2,469E-10	6,273E-03
B2	6228,01	6267,27	39,26	7,182E-11	8,335E-11	6,284E-03
B3	6228,99	6262,60	33,61	2,012E-10	1,433E-10	5,382E-03
B4	6229,91	6257,49	27,58	1,407E-10	1,627E-10	4,418E-03
B6	6238,87	6263,25	24,38	1,491E-10	5,303E-10	3,900E-03
B7	6235,11	6266,86	31,76	1,104E-10	8,091E-11	5,080E-03
B8	6227,14	6264,90	37,76	9,881E-11	8,347E-11	6,046E-03
B9	6223,48	6263,78	40,30	1,955E-10	1,802E-10	6,454E-03
C1	6219,04	6259,03	39,99	1,435E-10	8,491E-11	6,409E-03
C2	6216,91	6255,05	38,14	1,382E-10	1,468E-10	6,115E-03
C3	6216,21	6247,16	30,95	1,882E-10	1,417E-10	4,966E-03
C4	6222,10	6247,92	25,82	1,482E-10	8,176E-11	4,141E-03
C6	6223,85	6252,47	28,61	1,534E-10	9,047E-11	4,587E-03
C7	6222,64	6255,27	32,63	2,530E-10	1,696E-10	5,229E-03
C8	6215,47	6254,50	39,03	2,111E-10	1,423E-10	6,260E-03
C9	6211,63	6250,07	38,44	7,656E-11	1,301E-10	6,169E-03
D1	6210,03	6249,24	39,20	9,635E-11	2,114E-10	6,293E-03
D2	6209,29	6249,49	40,20	1,822E-10	8,046E-11	6,454E-03
D3	6205,98	6243,12	37,14	1,240E-10	1,396E-10	5,966E-03
D4	6200,65	6236,62	35,97	6,973E-11	6,742E-11	5,783E-03
D6	6205,41	6247,26	41,85	1,134E-10	1,578E-10	6,721E-03
D7	6210,10	6250,04	39,94	1,181E-10	1,046E-10	6,411E-03
D8	6206,15	6243,82	37,67	3,177E-10	4,769E-10	6,051E-03
D9	6200,19	6239,36	39,18	1,299E-10	1,276E-10	6,299E-03

**APÊNDICE G - TENSÕES RESIDUAIS DE CADA AMOSTRA POR  
BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA**

**PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW**

TABELA G1 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-7.

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	57,85	71,32	47,82	49,60
<b>-120</b>	41,22	108,14	101,47	67,68
<b>-80</b>	91,60	211,57	225,73	115,96
<b>-40</b>	89,77	410,49	369,10	130,14
<b>0</b>				
<b>40</b>	124,41	351,88	294,01	9,71
<b>80</b>	97,93	214,63	187,41	20,09
<b>120</b>	48,92	104,73	50,23	41,81
<b>160</b>	31,18	70,65	23,75	60,79

TABELA G2 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-8.

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	-91,23	-15,48	11,28	23,47
<b>-120</b>	30,76	49,33	33,15	10,57
<b>-80</b>	-11,75	86,73	123,88	37,15
<b>-40</b>	-39,39	234,28	284,72	80,05
<b>0</b>				
<b>40</b>	54,62	323,11	261,52	-0,78
<b>80</b>	6,96	101,22	102,05	-35,55
<b>120</b>	37,06	49,56	-7,47	4,48
<b>160</b>	48,15	43,88	42,22	98,87

TABELA G3 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-9.

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	122,12	115,26	120,67	78,93
<b>-120</b>	87,62	103,69	87,80	57,72
<b>-80</b>	36,80	159,39	162,71	48,68
<b>-40</b>	18,89	314,77	365,41	111,42
<b>0</b>				
<b>40</b>	100,41	314,31	301,98	59,63
<b>80</b>	51,38	146,44	148,50	35,16
<b>120</b>	45,83	79,14	83,28	53,35
<b>160</b>	41,52	50,66	40,81	50,56

**PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-CW(20%)**TABELA G4 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-1

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	1,59	13,90	36,49	17,79
<b>-120</b>	-26,21	10,61	4,89	-34,15
<b>-80</b>	-74,34	61,17	81,34	-10,52
<b>-40</b>	-30,70	219,58	247,88	57,15
<b>0</b>				
<b>40</b>	62,52	251,70	228,11	-70,23
<b>80</b>	-8,75	87,18	62,67	-50,74
<b>120</b>	-32,54	15,82	-4,69	-37,59
<b>160</b>	-19,35	-35,08	-47,74	-71,67

TABELA G5 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-2

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	-35,65	-43,31	-31,01	-19,96
<b>-120</b>	-17,09	-21,79	-4,31	-28,04
<b>-80</b>	-40,33	73,73	52,53	6,99
<b>-40</b>	-25,83	189,23	224,91	53,86
<b>0</b>				
<b>40</b>	48,44	235,88	209,47	-11,01
<b>80</b>	-24,41	82,99	84,10	-58,40
<b>120</b>	-42,61	11,35	-17,56	12,12
<b>160</b>	1,67	37,87	4,82	6,17

TABELA G6 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-6

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	-3,68	-26,83	-34,78	-61,34
<b>-120</b>	-11,89	-15,10	-22,29	-27,61
<b>-80</b>	-37,70	-59,32	116,65	11,38
<b>-40</b>	-32,56	123,73	229,24	48,42
<b>0</b>				
<b>40</b>	82,04	294,37	215,66	-45,53
<b>80</b>	3,01	108,98	69,93	-11,03
<b>120</b>	-10,21	36,22	3,31	-24,34
<b>160</b>	-31,42	-30,87	-13,48	-29,14

**PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-CW(40%)**TABELA G7 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-3

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	27,55	-16,72	-61,20	-20,75
<b>-120</b>	-23,09	29,43	43,45	-3,29
<b>-80</b>	-12,14	144,67	131,85	40,26
<b>-40</b>	-2,63	226,71	303,07	68,81
<b>0</b>				
<b>40</b>	174,48	377,37	318,18	10,51
<b>80</b>	69,06	119,04	123,83	-2,74
<b>120</b>	-3,11	27,42	46,13	13,91
<b>160</b>	28,90	19,50	-17,36	14,87

TABELA G8 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-4

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	10,87	21,31	40,78	32,74
<b>-120</b>	54,14	59,25	76,26	85,97
<b>-80</b>	33,47	176,00	196,02	109,05
<b>-40</b>	69,18	362,40	397,54	192,45
<b>0</b>				
<b>40</b>	111,60	329,57	309,52	40,04
<b>80</b>	50,68	159,40	159,14	34,69
<b>120</b>	7,71	75,96	48,57	44,21
<b>160</b>	-50,33	16,12	22,00	24,08

TABELA G9 - Valores de tensões residuais ( $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ ) da AM-5

<b>PONTOS</b>	<b>Linha A</b>	<b>Linha B</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha D</b>
<b>-160</b>	-35,61	-48,05	-62,38	-57,42
<b>-120</b>	-28,66	-28,13	-7,32	-55,48
<b>-80</b>	-29,30	79,87	129,09	-5,81
<b>-40</b>	-47,72	202,34	241,27	15,17
<b>0</b>				
<b>40</b>	54,77	282,67	175,17	-108,60
<b>80</b>	-7,27	120,08	99,12	-61,28
<b>120</b>	-36,46	10,19	-25,67	9,84
<b>160</b>	-96,64	-65,47	-38,23	-42,00

**APÊNDICE H - TENSÕES RESIDUAIS DE CADA AMOSTRA POR DIFRAÇÃO  
DE RAIOS X**

**PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW**

TABELA G1 - Valores de tensões residuais da AM-7

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-252,7	19,9	-286,4	14,3
<b>-120</b>	-252,1	23,5	-252,8	18,3
<b>-80</b>	-293,2	15,9	-301,5	15,1
<b>-40</b>	-313,5	20	-290	25
-20	<b>414,3</b>	<b>15,4</b>	<b>424,8</b>	<b>25,1</b>
0	<b>211,1</b>	<b>16</b>	<b>183,4</b>	<b>25,1</b>
20	<b>411,7</b>	<b>25,1</b>	<b>421,4</b>	<b>22</b>
<b>40</b>	-304,2	18,9	-272,5	22,4
<b>80</b>	-257,2	19,3	-287,5	21,9
<b>120</b>	-227,3	14,5	-205,6	17,7
<b>160</b>	-203,5	17,5	-233,3	24,6

TABELA G2 - Valores de tensões residuais da AM-8

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-244,9	14,7	-281,7	20
<b>-120</b>	-284,5	12,4	-264,5	20
<b>-80</b>	-283,8	20	-307	16,4
<b>-40</b>	-274,5	12,7	-302,6	18,4
-20	<b>416,4</b>	<b>13,7</b>	<b>431,8</b>	<b>20</b>
0	<b>216,2</b>	<b>2,8</b>	<b>190,6</b>	<b>19,6</b>
20	<b>405,4</b>	<b>24</b>	<b>430,3</b>	<b>22,1</b>
<b>40</b>	-339	16,2	-294,8	19,9
<b>80</b>	-262,4	20,7	-296,8	11,2
<b>120</b>	-257,3	19	-210	14,7
<b>160</b>	-206,5	5,5	-220,7	17,1

TABELA G3 - Valores de tensões residuais da AM-9

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-225	12,5	-252,3	18,4
<b>-120</b>	-293,9	16,3	-266,4	20,4
<b>-80</b>	-318	20,1	-324,8	12,8
<b>-40</b>	-317,4	19,7	-304,1	16,8
-20	<b>417,6</b>	<b>24,4</b>	<b>434,9</b>	<b>18,3</b>
0	<b>218,3</b>	<b>16,2</b>	<b>212,2</b>	<b>24</b>
20	<b>407,2</b>	<b>23</b>	<b>427,8</b>	<b>24</b>
<b>40</b>	-304,6	22,6	-351,6	18,9
<b>80</b>	-287,4	12,6	-274	15,7
<b>120</b>	-269,1	20,3	-283,9	13,9
<b>160</b>	-275,6	19	-308,6	18,5

**PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-CW(20%)**

TABELA G4 - Valores de tensões residuais da AM-1

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-232,1	22,6	-257,1	16,7
<b>-120</b>	-239,4	18,3	-228,2	21,5
<b>-80</b>	-156,7	12,7	-264	23
<b>-40</b>	-297	17,3	-301,9	18,4
-20	<b>274,1</b>	<b>23,6</b>	<b>152,6</b>	<b>19,4</b>
0	<b>65,9</b>	<b>9,8</b>	<b>71,3</b>	<b>11,5</b>
20	<b>221,4</b>	<b>15,3</b>	<b>161,9</b>	<b>16,7</b>
<b>40</b>	-297,5	25	-292,1	19,4
<b>80</b>	-277,6	20,9	-275,8	21,5
<b>120</b>	-196	15,8	-213	15,9
<b>160</b>	-250,4	16,3	-211,8	16,9

TABELA G5 - Valores de tensões residuais da AM-2

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-247,5	18,6	-143	19,8
<b>-120</b>	-80,9	13,5	-227,4	22,4
<b>-80</b>	-226,3	22,4	-217,8	19,7
<b>-40</b>	-132,2	23,1	-216,2	19,4
-20	<b>321,3</b>	<b>19,4</b>	<b>301,8</b>	<b>23,2</b>
0	<b>57,1</b>	<b>25</b>	<b>61,2</b>	<b>23,2</b>
20	<b>304,8</b>	<b>18,2</b>	<b>330,9</b>	<b>23</b>
<b>40</b>	39,7	15,6	-126,5	21,7
<b>80</b>	-158,9	20,1	31,4	20,7
<b>120</b>	93,7	11,5	45,9	20,8
<b>160</b>	61,6	15,1	219,3	14,7

TABELA G6 - Valores de tensões residuais da AM-6

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-170	16	-236	18,8
<b>-120</b>	-196,7	21,8	-264,3	15,3
<b>-80</b>	-136	20,5	-237,1	18
<b>-40</b>	-241,2	11,4	-288,7	20
-20	<b>327,4</b>	<b>21,1</b>	<b>327</b>	<b>18,2</b>
0	<b>13,4</b>	<b>7,3</b>	<b>33,6</b>	<b>15,9</b>
20	<b>417,9</b>	<b>19,8</b>	<b>366,3</b>	<b>16,2</b>
<b>40</b>	-301,4	18,3	-298,3	12,6
<b>80</b>	-248,4	16,2	-261,5	16,3
<b>120</b>	-111,7	13,1	-240,1	18,2
<b>160</b>	-266,8	16,6	-252,1	16,1

### PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-CW(40%)

TABELA G7 - Valores de tensões residuais da AM-3

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-166	16,5	-233,9	21,4
<b>-120</b>	-246,8	18	-249,7	19,9
<b>-80</b>	-285,8	12,9	-272	20,5
<b>-40</b>	-217,3	20,7	-258,6	17,3
-20	<b>152,6</b>	<b>18,7</b>	<b>135,3</b>	<b>23,1</b>
0	<b>54,9</b>	<b>25</b>	<b>57,6</b>	<b>18,6</b>
20	<b>138,9</b>	<b>19,4</b>	<b>103,2</b>	<b>21,6</b>
<b>40</b>	-273,3	13,4	-284,6	15,6
<b>80</b>	-265,8	16,7	-238,9	17,9

<b>120</b>	-268,1	17,4	-288,6	16,9
<b>160</b>	-271,8	13,9	-227	16,7

TABELA G8 - Valores de tensões residuais da AM-4

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-275,8	12	-238,7	19,9
<b>-120</b>	-284,8	16,3	-232,2	17,9
<b>-80</b>	-282,7	15,7	-266,6	20,3
<b>-40</b>	-262,9	20,6	-285,1	21,6
-20	<b>95,2</b>	<b>23,8</b>	<b>136</b>	<b>21,9</b>
0	<b>47,3</b>	<b>12</b>	<b>18,8</b>	<b>22,6</b>
20	<b>98,8</b>	<b>21,1</b>	<b>139,3</b>	<b>23</b>
<b>40</b>	-259,6	15,9	-288,8	4,7
<b>80</b>	-251,2	17,7	-248,8	13,3
<b>120</b>	-268,8	17,2	-263,1	23,8
<b>160</b>	-210,3	6	-269,7	11,8

TABELA G9 - Valores de tensões residuais da AM-5

<b>MEDIÇÃO PARALELA AO CORDÃO - <math>\sigma_{yy}</math></b>				
<b>Pontos</b>	<b>Linha-B</b>	<b>Erro (+/-)</b>	<b>Linha-C</b>	<b>Erro (+/-)</b>
<b>-160</b>	-221,6	15,4	-245,4	16,6
<b>-120</b>	-254,1	20,6	-268,1	19
<b>-80</b>	-291,3	13,2	-275,4	20,3
<b>-40</b>	-300,8	19,7	-274	21,5
-20	<b>357,1</b>	<b>21,7</b>	<b>259,8</b>	<b>15,1</b>
0	<b>-57,8</b>	<b>13,8</b>	<b>11,7</b>	<b>21,5</b>
20	<b>279,2</b>	<b>16,3</b>	<b>280,3</b>	<b>24,5</b>
<b>40</b>	-293,3	20	-283,1	21,9
<b>80</b>	-292	11,8	-290,5	19,8
<b>120</b>	-225,6	20,5	-266,5	20,3
<b>160</b>	-269,6	15,8	-291	20,4