



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

**ANÁLISE DAS DISTORÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS EM
PAINÉIS ENRIJECIDOS SOLDADOS COM FCAW-ROBOTIZADO
E CW-FCAW**

LINO ALBERTO SOARES RODRIGUES

Belém
Abril/2022



ANÁLISE DAS DISTORÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS EM PAINÉIS NAVAIS SOLDADOS COM FCAW ROBOTIZADO E CW-FCAW

LINO ALBERTO SOARES RODRIGUES

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: Eduardo de Magalhães Braga

Belém
Abril/2022

"ANÁLISE DAS DISTORÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS EM PAINÉIS NAVAIS SOLDADOS COM FCAW ROBOTIZADO E CW-FCAW"

Lino Alberto Soares Rodrigues

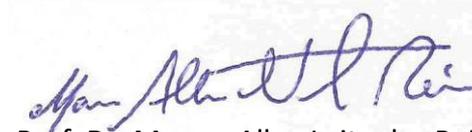
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA - PRODERNA/ITEC/UFPA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:

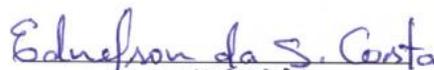


Prof. Dr. Eduardo Braga, Dr. Eng.
Mat. SIAPE: 2178124

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



Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis
(Membro Interno – PRODERNA/UFPA)



Prof. Ednelson da Silva Costa Dr. Eng.
Faculdade de Eng. Industrial
UFPA - Campus de Abaetetuba
Matricula SIAPE 3927607

Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
(Membro Externo ao Programa – FEI/UFPA)



UFPA), Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD
(Membro Externo à Instituição – DEMEC/UFMG)



Prof. Dr. Cassius Olívio Figueiredo Terra Ruchert
(Membro Externo à Instituição – DEMAR/USP)

Belém, PA - Brasil
Abril de 2022

R696a Rodrigues, Lino Alberto Soares.
ANÁLISE DAS DISTORÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS EM
PAINÉIS ENRIJECIDOS SOLDADOS COM FCAW-
ROBOTIZADO E CW-FCAW / Lino Alberto Soares Rodrigues. —
2022.
187 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Recursos Naturais na Amazônia, Belém, 2022.

1. painel enrijecido. 2. distorções. 3. tensões residuais. 4.
CW-FCAW. 5. Difração de raios X. I. Título.

CDD 671.52

“O coração do homem pode fazer planos, mas a resposta certa dos lábios vem do SENHOR.”.

1 Coríntios 1:27-29 - Bíblia

AGRADECIMENTOS

Àquele que é fiel para cumprir Suas promessas: ADONAY.

Ao professor, orientador e mestre de vida Eduardo Braga, por todas as oportunidades e portas abertas.

Ao PRODERNA, CAPES e CNPQ por todas as oportunidades e financiamento de bolsas.

A equipe do LCAM dos alunos de graduação aos doutorandos, aos que contribuíram direto e indiretamente em especial, aos parceiros de doutorado Ednelson, Tércio e Pedro Paulo.

Aos meus irmãos em Cristo pelas orações e apoio espiritual, ao Pr Marcos, Valéria etc.

À toda família Rodrigues, ao meu pai Antônio por todo apoio aos meus estudos, aos meus tios, a minha tia mãe Deusa e a minha avó mãe Maria (in memoriam).

À minha esposa Nadjy por todo apoio em tudo e a minha filha Ana Ester.

Aos demais, que cruzaram meu caminho com suas contribuições e críticas.

Dedico este trabalho de pesquisa Àquele que é fiel para cumprir suas promessas.

À minha esposa Nadjy e à minha filha, Ester.

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

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS EM PAINÉIS ENRIJECIDOS SOLDADOS COM FCAW-ROBOTIZADO E CW-FCAW

LINO ALBERTO SOARES RODRIGUES

Abril/2022

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Comprovada a influência das imperfeições de soldagem sob a forma de distorções e tensões residuais na resistência de painéis enrijecidos, o monitoramento dos níveis destas imperfeições torna-se um critério de segurança, tendo em vista a incerteza das perdas reais de resistência do painel, sem ter medido as magnitudes destas imperfeições de soldagem. Assim, este trabalho trata da medição dos níveis de distorções e tensões residuais por difração de raios X e birrefringência ultrassônica em painéis enrijecidos. Primeiramente, selecionou-se a melhor de três sequências de soldagem utilizando soldagem FCAW robotizado. A sequência 03 apresentou níveis de distorções até 10 vezes menos e um nível de tensões residuais mais próxima da neutralidade (± 100 MPa) comparada as sequências 01 e 02. Em seguida, utilizando a sequência 03 foram soldados painéis utilizando o processo CW-FCAW com 40% de arame frio e velocidades de soldagem de 100 m/min e 120 m/min. Os resultados mostraram que o percentual de arame frio com elevadas velocidades de soldagem não diminuíram as distorções, porém influenciam no nível de tensões residuais, levando a tensões mais próximas da linha neutra (± 100 MPa) em média.

Palavras-chave: Painel enrijecido, distorções, tensões residuais, Difração de raios X, birrefringência acústica, CW-FCAW, FCAW.

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

ANALYSIS OF DISTORTIONS AND RESIDUAL STRESSES IN STIFFENED PANELS WELDED WITH FCAW-ROBOTIZED AND CW-FCAW

Lino Alberto Soares Rodrigues

Abril/2022

Advisor: Eduardo de Magalhães Braga

Research Area: Process Engineering

Once the influence of welding imperfections in the form of distortions and residual stresses on the resistance of stiffened panels has been proven, monitoring the levels of these imperfections becomes a safety criterion, in view of the uncertainty of the real resistance losses of the panel, without having to measure the magnitudes of these welding imperfections. Thus, this work deals with the measurement of distortion levels and residual stresses by X-ray diffraction and ultrasonic birefringence in stiffened panels. First, the best of three welding sequences were selected using robotic FCAW welding. Sequence 03 showed distortion levels up to 10 times less and a residual stress level closer to neutrality (± 100 MPa) compared to sequences 01 and 02. Then, using sequence 03, panels were welded using the CW-FCAW process with 40% cold wire and welding speeds of 100 m/min and 120 m/min. The results showed that the percentage of cold wire with high welding speeds did not reduce distortions, but influenced the level of residual stresses, leading to stresses closer to the neutral line (± 100 MPa) on average.

Keywords: Stiffened panels, Distortions, Residual Stresses, X-ray diffraction, acoustic birefringence, FCAW-CW, FCAW.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	25
1.1 Considerações gerais	
1.2 Motivação	27
1.3 Objetivos	28
1.3.1 Objetivo Geral	
1.3.2 Objetivos Específicos	29
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1 Os painéis enrijecidos na indústria naval	30
2.2 Distorções de soldagem	32
2.3 As tensões residuais de soldagem	39
2.4 Técnicas de medição de tensões residuais	51
2.4.1 Difração de Raios X (DRX)	53
2.4.2 Técnicas Ultrassom por Birrefringência Acústica	60
2.5 Medição de distorções e tensões residuais em painéis navais	65
CAPÍTULO III - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	67
3.1 Planejamento	67
3.2 Painéis Enrijecidos	69
3.3 Soldagem dos painéis	71
3.3.1 Etapa 01: Soldagem FCAW robotizada	71
3.3.2 Etapa 02: Soldagem CW-FCAW	73
3.4 Medição	75
3.4.1 Sanidade das Soldas	75
3.4.2 Distorções antes e após a soldagem	76
3.4.3 Tensões Residuais	77
a) Difração de Raios X (Etapa 01)	77
b) Birrefringência Acústica (Etapa 02)	81
3.5 Caracterização	85
3.5.1 Análise geométrica	85
3.5.2 Análise Microestrutural	87
3.5.3 Análise Microdureza	88
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
4.1 Soldagens dos painéis	89
4.1.1 Soldagem FCAW robotizado	89
4.1.2 Soldagem CW-FCAW	92
4.2 Medições	94
4.2.1 Distorções	94
4.2.1.1 Distorções dos painéis soldados com FCAW robotizado	94
4.2.1.2 Distorções dos painéis soldados com CW-FCAW	98
4.2.1.3 Comparativo de distorções entre os processos de soldagem	102
4.2.2 Tensões Residuais	104
4.2.2.1 Etapa 01 - Calibração e medição na chapa de referência por DRX	105
a) Tensões residuais longitudinais (σ_y) nos painéis por DRX	108
b) Tensões residuais transversais (σ_x) nos painéis por DRX	116
4.2.2.2 Etapa 02 - Calibração e medição na chapa de referência por BA	123
4.2.2.3 Comparativo das tensões residuais da chapa de referência por DRX e BA	137
4.2.2.4 Comparativo das tensões residuais do painel soldado com FCAW usando a sequência 03 medido com DRX e BA	139

4.2.2.5 Comparativo das tensões residuais entre os painéis soldados com FCAW robotizado e CW-FCAW	142
4.3 Caracterização	145
4.3.1 Análise Macro - Geometria dos cordões de solda	146
4.3.2 Análise microestrutural	149
4.3.2.1 Microestruturas e Fração Volumétrica	150
4.3.3 Microdureza	156
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	159
CAPÍTULO VI - PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	161
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
ANEXOS	172
ANEXO I – Dados de medição das tensões residuais dos painéis soldados com FCAW robotizado. Considerando as 03 sequências de soldagem	172
ANEXO II - Dados obtidos pela medição com birrefringência acústica	182

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - A etapa inicial da construção de painéis e sub-blocos na construção naval. Fonte: STUPELLO, CARDOSO e ANDERSON (2007)	31
Figura 2.2 - Os diferentes tipos de seções laminadas padrões comumente usados em conjuntos de estruturas de navios como armações e enrijecedores. Onde b_f é a largura do flange; h é a profundidade de viga e t_w é a espessura do enrijecedor. (SHAMA, 2013) ...	31
Figura 2.3 – Representação esquemática da interação da geração das tensões residuais e distorções. Fonte: NITSCHKE-PAGEL E WOHLFAHRT, 2002.....	33
Figura 2.4 – Classificação das distorções de soldagem. Fonte: Adaptado de MASUBUSHI (2013)	35
Figura 2.5 - A contração transversal e longitudinal em solda de filete. Fonte: AWS (2001)	37
Figura 2.6 – Medição de distorções (a) Pelo desnível das bordas; (b) contração angular e (c) medida contínua de deflexão. Fonte: RADAJ, 1993.....	37
Figura 2.7 – Distorção angular em painel enrijecido não restringido. Fonte: Autor.....	38
Figura 2.8 - O plano das direções das tensões residuais. Fonte: Autor.....	41
Figura 2.9 – (a) Após a soldagem, um esforço de tração residual permanece ao longo da linha central de solda após a passagem da fonte de calor e tensões de compressão equilibrante a partir da zona de frente da solda. (b) o diagrama de tensões formados após a soldagem. Fonte: COLEGROVE et al. (2009)	43
Figura 2.10 – Os efeitos termomecânicos da solda. Fonte: (SŁUŽALEC, 2005)	45
Figura 2.11 – Grupos de parâmetros mais influentes no estudo das tensões residuais de soldagem a arco. (autor).....	48
Figura 2.12 - Fluxograma das técnicas de medição de tensões residuais. Fonte: Adaptado de ROSSINI et al. (2012)	53
Figura 2.13 – Ação do eletropolimento em uma superfície metálica. Fonte: http://www.ableelectropolishing.com/	54
Figura 2.14 - Princípios de medição de tensão por difração de raio X. (a): (a) $\psi = 0$. (b) $\psi = \psi$ (amostra rotacionada através de algum ângulo ψ conhecido). D, detector de raio X; S, fonte de raio X; N, normal à superfície. Fonte:(PREVÉY, 1986)	55

Figura 2.15 - Varredura da superfície da amostra. Fonte: (SOUSA, 2012)	56
Figura 2.16 - Definição da direção da inclinação de ψ e da direção da medição de tensões, \emptyset , usando o modelo plano de tensões elásticas. Fonte: RAJ et al., (2009)	58
Figura 2.17 - Gráfico de $d(211)$ versus $\sin 2\psi$ para aço ferrítico. Considerando 2 detectores. Fonte: Autor.....	59
Figura 2.18 - Princípio de funcionamento de um equipamento que usa o método $\sin 2\psi$, exemplificando o uso de medições em engrenagens. Fonte: Stresstech Group.....	60
Figura 2.19 - Representação da propagação de ondas acústicas em materiais tracionados. Fonte: Adaptado de BRAY e STANLEY, (1997)	62
Figura 2.20 – Sistema de coordenadas bidimensionais alinhado ao longo dos eixos da anisotropia de textura ortotrópica com as direções de tensão principais e a polarização das ondas cisalhantes. Fonte: HIRAO e OGI (2017)	64
Figura 2.21 - Distribuições idealizadas das tensões residuais de soldagem em painel enrijecido. Fonte PAIK (2018)	66
Figura 3.1 – Fluxograma da etapa 01: Seleção da melhor sequência de soldagem. Fonte: Autor.....	68
Figura 3.2 – Fluxograma da Etapa 02: soldagem dos painéis com CW-FCAW. Fonte Autor.....	69
Sistema de deslocamento da tocha CW-FCAW e o detalhe da tocha de soldagem. Fonte: Autor.....	69
Figura 3.3 – Corpo de prova na forma de painel através da junção chapa e perfil L pronta para soldagem dos enrijecedores. Fonte: Autor.....	72
Figura 3.4 – a) Célula de trabalho para soldagem dos painéis. Onde: 1) braço robótico; 2) fonte de soldagem; 3) alimentador de arame; 4) painel de controle do robô; 5) mesa de soldagem; 6) painel; 7) unidade de controle e programação do robô; 8) unidade de deslocamento linear. b) Painel padrão com detalhes para os componentes:1) chapa; 2) cantoneira (perfil L) e 3) suporte para posicionamento da chapa na mesa de soldagem. Fonte: Adaptado de FREITAS (2015)	72
Figura 3.5 – Sequências de soldagem e seus respectivos percursos executados. (os números 1, 2, 3 e 4 representam a posição do enrijecedor soldado). Fonte Autor.....	73
Figura 3.6 – (a) Divisão em quadrantes do painel (e da chapa, antes de soldar. No detalhe: Esquema da tomada da medida das distorções (mm) (c) Imagem da tomada da medida	

das distorções na prática (mm), onde: d_0 (distorção inicial), d (distorção após a soldagem), α (ângulo de distorção) Fonte: Autor.....	77
Figura 3.7 – Representação esquemática da medição das TR's no painel (a) Linhas de medição, distâncias admitidas. (b) Detalhe da distância medida entre os pontos de 1 a 7, indicando a redução da distância a fim de captar a variação das tensões residuais quanto mais se aproxima da solda. Fonte: Autor.....	79
Figura 3.8 - Mostra a imagem do equipamento, o enrijecedor e a direção de medição. Direção de medição: (a) Tensões Residuais Longitudinais - σ_y ; (b) Tensões Residuais Transversais - σ_x . Fonte: Autor.....	80
Figura 3.9 – Equipamento de difração de raios X portátil. Fonte: Stressestech Group.....	81
Figura 3.10 – Esquema representativo dos pontos de medição por Ultrassom com Birrefringência Acústica. Fonte: Autor.....	82
Figura 3.11 - Direção de polarização (movimento das partículas); Posição 1 - paralela à direção de laminação (longitudinal) e Posição 2 - transversal à direção de laminação. (COSTA, 2017)	83
Figura 3.12 - Sistema ultrassônico utilizado na captura do tempo de percurso da onda ultrassônica para determinação das TR's por Birrefringência. Fonte: RODRIGUES et al. (2020)	84
Figura 3.13 – Retirada dos corpos de prova para a caracterização geométrica, química e das propriedades mecânicas (DNVGL-RU-SHIP Pt.2 Ch.4:2018)	85
Figura 3.14 – Caracterização da geometria dos cordões de solda de filete duplo. Fonte: Autor.....	85
Figura 3.15 – Esquema da junta soldada, destacando-se as regiões que se relacionam na diluição. Fonte: Autor.....	87
Figura 3.16 – Distâncias padrões para a execução do ensaio de microdureza (DNVGL-RU-SHIP Pt.2 Ch.4:2018)	88
Figura 4.1 – a) Chapa limpa de óxido, pronta para montagem dos enrijecedores. b) Painel como soldado usando o braço robótico. Fonte: Autor.....	90

Figura 4.2 – (a) Painel como soldado. (b) Superfície do cordão de solda. Fonte: Autor...	90
Figura 4.3 – Imagem do ensaio de ultrassom nas soldas do painel. No detalhe, a aquisição dos picos de referência. Fonte: Autor.....	92
Figura 4.4 – (a) Painel montado para receber os passes de solda CW-FCAW. (b) Painel soldado. Fonte:Autor.....	93
Figura 4.5 – Perfis de um cordão de solda do painel soldado com CW-FCAW utilizando velocidade de soldagem 100 cm/min. Fonte: Autor.....	93
Figura 4.6 – Representação gráfica das distorções por quadrante dos painéis soldados. Fonte: Autor.....	95
Figura 4.7 - Representação gráfica das distorções médias por sequência de soldagem. Fonte: Autor.....	96
Figura 4.8 – Representação gráfica dos valores de distorções globais por sequência de soldagem. Fonte: Autor.....	97
Figura 4.9 – Representação gráfica das distorções por quadrante dos painéis soldados CW-FCAW. Fonte: Autor.....	99
Figura 4.10 – Representação gráfica das distorções médias por quadrante dos painéis soldados CW-FCAW. Fonte: Autor.....	100
Figura 4.11 – Representação gráfica das distorções globais dos painéis soldados CW-FCAW. Fonte: Autor.....	101
Figura 4.12 – Representação gráfica das distorções por quadrante dos painéis soldados com FCAW robotizado e CW-FCAW. Fonte: Autor.....	103
Figura 4.13 – Representação gráfica das distorções médias e globais dos painéis soldados FCAW robotizado e CW-FCAW. Fonte: Autor.....	104
Figura 4.14 – Interface do software do equipamento de medição de TR's por DRX. As áreas destacadas mostram os principais parâmetros de configuração. Fonte: Autor.....	106

Figura 4.15 - Interface do software do equipamento de medição de TR's por DRX. As áreas destacadas mostram os dados de calibração encontrados. Com destaque para área na cor verde, que mostra o valor da tensão residual medida e o erro. Fonte: Autor.....	107
Figura 4.16 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's médias na chapa de referência medida com DRX. Fonte: Autor.....	108
Figura 4.17 - Representação gráfica da superfície 3D das TR's na chapa de referência medida com DRX. Fonte: Autor.....	108
Figura 4.18 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Longitudinais (σ_y^{TR}) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor.....	110
Figura 4.19 – Representação gráfica da superfície 3D das TR's Longitudinais (σ_y^{TR}) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor.....	111
Figura 4.20 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor.....	112
Figura 4.21 – Representação gráfica da superfície 3D das TR's Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor.....	112
Figura 4.22 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor.....	113
Figura 4.23 – Representação gráfica da superfície 3D das TR's Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor.....	114
Figura 4.24 - Representação gráfica do perfil 2D das TR's Longitudinais Médias (σ_y) por sequência de soldagem. Fonte: Autor.....	115
Figura 4.25 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Longitudinais Médias (σ_y) de cada sequência de soldagem. Fonte: Autor.....	116
Figura 4.26 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor.....	117

Figura 4.27 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor.....	118
Figura 4.28 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor.....	119
Figura 4.29 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor.....	119
Figura 4.30 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor.....	120
Figura 4.31 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência03.....	120
Figura 4.32 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Transversais Médias (σ_x) de cada sequência de soldagem. Fonte: Autor.....	123
Figura 4.33 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Transversais Médias (σ_x) de cada sequência de soldagem. Fonte: Autor.....	124
Figura 4.34 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) da chapa de referência medidas por BA. Fonte: Autor.....	127
Figura 4.35 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) da chapa de referência medidas por BA. Fonte: Autor.....	128
Figura 4.36 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com FCAW robotizado (SEQ03) medidas por BA. Fonte: Autor.....	129
Figura 4.37 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com FCAW robotizado (SEQ03) medidas por BA. Fonte: Autor.....	130
Figura 4.38 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com CW-FCAW (100 cm/min) medidas por BA. Fonte: Autor.....	132

Figura 4.39 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com CW-FCAW (100 cm/min) medidas por BA. Fonte: Autor.....	133
Figura 4.40 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com CW-FCAW (120 cm/min) medidas por BA. Fonte: Autor.....	135
Figura 4.41 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com CW-FCAW (120 cm/min) medidas por BA. Fonte: Autor.....	136
Figura 4.42 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais médias ($\sigma_y - \sigma_x$) dos painéis soldados com FCAW e CW-FCAW medidas por BA. Fonte: Autor.....	137
Figura 4.43 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais médias ($\sigma_y - \sigma_x$) dos painéis soldados com FCAW e CW-FCAW medidas por BA. Fonte: Autor.....	137
Figura 4.44 – Representação gráfica do perfil 2D das tensões residuais médias da chapa de referência medidas por DRX e BA. Fonte: Autor.....	139
Figura 4.45 – Representação gráfica do perfil 3D das tensões residuais da chapa de referência medida por difração de raios X e medidas por birrefringência acústica. Fonte: Autor.....	140
Figura 4.46 – Representação gráfica do perfil 2D das tensões residuais médias do painel soldado com FCAW e SEQ03 medidas por DRX e BA. Fonte: Autor.....	142
Figura 4.47 – Representação gráfica do perfil 3D das tensões residuais da chapa do painel soldado com FCAW e Sequência03: (a) e (b) medidas por difração de raios X e (c) medida por birrefringência acústica. Fonte: Autor.....	142
Figura 4.48 – Representação gráfica do perfil 2D das tensões residuais médias do painel soldado com FCAW e CW-FCAW, considerando as TR's Longitudinais medidas por DRX. Fonte: Autor.....	145

- Figura 4.49** – Representação gráfica do perfil 2D das tensões residuais médias do painel soldado com FCAW e CW-FCAW, considerando as TR's Transversais medidas por DRX. Fonte: Autor.....145
- Figura 4.50** – Representação esquemática das regiões de captura de imagens macro e micro. (a) Macrografia. (b) Regiões da junta soldada. (c) Metal de solda (MS). (d) Metal de base e (e) ZTA. Fonte: Autor.146
- Figura 4.51** – Perfil geométrico dos cordões de solda utilizando as sequências de soldagem FCAW robotizado: (a) SEQ01 (b) SEQ02 e (c) SEQ03. Fonte: Autor.....148
- Figura 4.52** – Perfil geométrico dos cordões de solda utilizando o processo CW-FCAW com velocidades de soldagem: a) 100 cm/min b) 120 cm/min. Fonte: Autor.....150
- Figura 4.53** – Granulometria da ZTA (a) FCAW (b) CW-FCAW (100 cm/min). Ataque com Nital 2% + Picral 4% e aumento de 500X. MO. Fonte: Autor.....152
- Figura 4.54** – Micrografias do metal de solda (a) FCAW (b) CW-FCAW 100 cm/min e (c) CW-FCAW 120 cm/min. Ataque Nital 2% + Picral 4%. Aumento de 500X. MO. Fonte: Autor.....154
- Figura 4.55** – Micrografias realizadas por MEV utilizando a peça de CW-FCAW 120 cm/min. (a) Nucleação da AF a partir de uma inclusão não metálica. (b) Presença da PF(G) e WF. Fonte: Autor.155
- Figura 4.56** – Fração volumétrica das fases presentes no metal de solda (MS). Fonte: Autor.....157
- Figura 4.57** – Representação gráfica do perfil de microdureza da junta soldada das 03 sequências de soldagem dos painéis. Fonte: Autor.....158
- Figura 4.58** - Representação gráfica do perfil de microdureza da junta soldada dos painéis soldados com CW-FCAW nas velocidades de soldagem de 100 cm/min e 120 cm/min. Fonte: Autor.....159

LISTAS DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química do aço ASTM A-131 Grau E. Fonte Norma ASTM A131. Fonte: Autor.....	70
Tabela 3.2 – Dados de propriedades mecânicas do ensaio de tração. Fonte: Autor.....	71
Tabela 3.3 - Parâmetros de soldagem FCAW robotizado. Fonte: Autor.....	72
Tabela 3.4 – Parâmetros de soldagem CW-FCAW. Fonte: Autor.....	74
Tabela 3.5 – Parâmetros e configuração de medição das tensões residuais por DRX. Fonte: Autor.....	79
Tabela 4.1 – Medidas das distorções nos pontos dos quadrantes por sequência soldada. Fonte: Autor.....	95
Tabela 4.2 - Medidas das distorções nos quadrantes – CW-FCAW. Fonte: Autor.....	99
Tabela 4.3 –Valores de referência das TR's da chapa de referência, em MPa. Fonte: Autor.....	107
Tabela 4.4 – Dados de medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor.....	110
Tabela 4.5 – Dados de medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor	111
Tabela 4.6 – Dados de referência das medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor.....	113
Tabela 4.7 – Dados de medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor.	117
Tabela 4.8 – Dados de referência das medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor.....	118
Tabela 4.9 – Dados de medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x^{TR}) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor.....	119
Tabela 4.10 –Valores de referência das TR's da chapa de referência, em MPa. Fonte: Autor.....	126

Tabela 4.11 –Valores de referência da diferença de tensões residuais do painel soldado FCAW (SEQ03), em MPa. Fonte: Autor.....	129
Tabela 4.12 –Valores de referência da diferença das tensões residuais do painel soldado com CW-FCAW com velocidade de soldagem de 100 cm/min, em MPa. Fonte: Autor.....	132
Tabela 4.13 –Valores de referência da diferença das tensões residuais do painel soldado com CW-FCAW com velocidade de soldagem de 120 cm/min, em MPa. Fonte: Autor.....	134
Tabela 4.14 – Dimensões dos cordões de solda considerando as sequências de soldagem. Fonte: Autor.....	148
Tabela 4.15 – Dimensões dos cordões de solda utilizando o processo CW-FCAW.....	150
Tabela 4.16 – Fração Volumétrica das fases presentes no metal de solda.....	156

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

<i>AF</i>	Ferrita Acicular
<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>lo</i>	Comprimento inicial
<i>l</i>	Comprimento final
<i>AM</i>	Amostra
<i>CP</i>	Corpo de prova
<i>I</i>	Corrente (A)
$(\sigma_L - \sigma_T) / (\sigma_{yy} - \sigma_{xx})$	Diferença de tensões residuais nas direções paralela e transversal ao cordão de solda
<i>d</i>	Espaçamento interplanar
<i>d₀</i>	Espaçamento interplanar na ausência de tensão
<i>FCAW</i>	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
<i>FS</i>	<i>Ferrita de Segunda Fase</i>
<i>CW-FCAW</i>	<i>Flux Cored Arc Welding – Cold Wire</i>
<i>GMAW</i>	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
<i>GMAW-CW</i>	<i>Gas Metal Arc Welding - Cold Wire</i>
<i>hkl</i>	Índices de Miller
<i>HV</i>	Hardness Vickers (Dureza Vickers)
<i>IEN</i>	Instituto de Engenharia Nuclear
<i>IIW</i>	International Institute of Welding
<i>L.E</i>	Límite de escoamento
<i>L.A</i>	Linha A
<i>L.B</i>	Linha B
<i>L.C</i>	Linha C

L.D	Linha D
L.A-DL	Medição em pontos da linha A na direção longitudinal à solda
L.B-DL	Medição em pontos da linha B na direção longitudinal à solda
L.C-DL	Medição em pontos da linha C na direção longitudinal à solda
L.D-DL	Medição em pontos da linha D na direção longitudinal à solda
L.A-DT	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
MB	Metal de base
E	Módulos de elasticidade
L_{cr}	Onda longitudinal Criticamente Refratada
PTS	Pontos
PF(G)	Ferrita primária de contorno de grão
SAE	Society of Automotive Engineers
CW-FCAW(100)	Soldagem com velocidade de soldagem de 100 cm/min
CW-FCAW(120)	Soldagem com velocidade de soldagem de 120 cm/min
SEQ	Sequência de soldagem
St	Stiffener (enrijecedor)
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.
σ_L	Tensões residuais paralela ao cordão de solda
σ_T	Tensões residuais transversal ao cordão de solda
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
Δl	Variação de comprimento
ΔT	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)
WF	Ferrita de Widmanstätten
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZF	Zona fundida
θ	Ângulo de difração
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>
λ	Comprimento de onda
$\epsilon_{\phi\psi}$	Deformação do espaçamento interplanar da rede cristalina
ψ	Psi (ângulo que caracteriza a inclinação do feixe de raio X)
σ	Tensão (MPa)
σ^I	Tensões residuais Tipo I
σ^{II}	Tensões residuais Tipo II
σ^{III}	Tensões residuais Tipo III
σ_t	Tensão total
σ_r	Tensões residual
σ_s	Tensões de serviço ou aplicada
σ_\emptyset	Tensão medida

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A construção naval de hoje acompanhada pela indústria petrolífera (isto é, a indústria naval e offshore) constitui-se um dos setores mais imponentes da era atual em termos de volumes de matéria-prima consumidos e a quantidade de produtos elaborados. Apesar da grande crise do petróleo no mundo e a da Petrobras no cenário nacional, a construção naval ainda sobrevive e tenta reerguer-se através de alternativas caseiras, principalmente, suprir a necessidade de escoamento da produção da agrícola que a cada ano supera seus próprios recordes e se reestrutura utilizando as vias alternativas das hidrovias para escoamento interno da produção gerando demanda para a construção de embarcações de pequeno e médio porte. Além disso, outra opção caseira do momento para reaquecer a indústria naval constitui-se de perspectivas devido a nova lei dos portos de 2018 executada pelo governo daquele ano que prevê: a modernização e aumento da capacidade dos terminais portuários, conceder escala competitiva a esses terminais e reduzir os custos para atender a demanda por movimentação de carga, fomentando a cabotagem. Fatores estes que favorecerão para o aumento e renovação da frota de embarcações de todas as regiões do país.

No entanto, a construção naval com certeza precisará se reestruturar a fim de que tais perspectivas se consolidem ou se preciso for a alteração de planos a fim de que a economia seja retomada para o crescimento, mostrando que sempre haverá a necessidade de renovação e inovação para superar as dificuldades. Assim a proposta deste trabalho, acredita sempre que é possível melhorar o setor não só no aumento da sua produtividade como visa as melhores condições de trabalho, além da melhor qualidade de fabricação e reparo de embarcações de aço (de médio e pequeno porte) para os estaleiros da região Norte e o restante do país.

Longe estão os dias de métodos intensivos de trabalho com milhares de pessoas construindo uma embarcação. Hoje, a ênfase está na flexibilidade e automatização, com

um navio sendo projetado, planejado e construído em questão de semanas, não em anos, como no passado (ROOKS, 1997; MANDAL, 2017). Logo, com o aumento na concorrência da construção naval para determinados tipos de embarcações e a competitividade entre as empresas que dominam os nichos de mercado, tem estimulado alternativas para o aumento da produtividade, qualidade e redução dos tempos de fabricação, assim como uma equalização dos custos de produção (LAMEIRA, 2015; ROOKS, 1997). Segundo BOEKHOLT (1996), o método de construção naval mais utilizado atualmente, que é a montagem por blocos, resulta do desenvolvimento da tecnologia da soldagem. No entanto, mesmo sendo o processo de fabricação para união de metais mais utilizados na produção de peças ou produtos de elevadas proporções, como é o caso da sua inserção na construção naval, para que sejam implementadas melhorias ou inovações, é necessário que as características quantitativas e qualitativas sejam garantidas ou, de outra forma, serão descartadas ou precisarão de adaptação até que haja a possibilidade de serem empregadas.

Igualmente, nem só por produtividade foram implementadas melhorias nos processos de soldagem, outras foram absorvidas a fim de reduzir a introdução de imperfeições iniciais de fabricação nos painéis enrijecidos, fato este que gera preocupação, devido ao acúmulo na perda de resistência estrutural dos painéis até os blocos acabados, segundo afirma KHEDMATI et al. (2007) e GASPAR et al. (2011). Desta forma, a fabricação de embarcações por natureza é geralmente grande e precisa de muitas soldas corridas, grandes e pequenas em comprimento. Assim, sabe-se que, com a inserção de robôs na linha de produção promove-se aumento da velocidade de soldagem causando um efeito nos tempos e custos de produção, além de soldas mais precisas e de excelente qualidade, quase eliminando totalmente as condições de retrabalho. Portanto, buscando a automatização de uma célula de trabalho para a produção de painéis reduzidos (10% do tamanho real), similares aos empregados em um estaleiro local, foi empregada a soldagem FCAW-G robotizada. O uso do processo CW-FCAW visa, por outro lado, novas formas de inserção na construção naval objetivando menores problemas relacionados a metalurgia do processo, além da melhoria das propriedades da estrutura soldada.

1.2 Motivação

Com o olhar focado não apenas nos volumes da produção, mas no controle de qualidade da construção naval, nasce o escopo deste trabalho. Através das diversas visitas ao maior estaleiro do estado e um dos maiores da região amazônica e a projetos de pesquisa anteriores surgiu a ideia do monitoramento da qualidade com que as unidades básicas da construção de uma embarcação – os painéis – são produzidos. Em um contexto global, a maioria dos trabalhos relacionados a fabricação de painéis navais buscam o entendimento enfatizando os métodos de produção e os processos de fabricação envolvendo a soldagem.

Entretanto, mesmo considerando as formas de produção utilizadas no Brasil, pouco se fala da robotização dos processos de soldagem considerando a construção naval. Se comparado aos grandes centros asiáticos, líderes mundiais do setor, nosso país está muito defasado quanto às tecnologias empregadas para produção. Neste quesito, surge a primeira contribuição tecnológica desta proposta, o emprego da sequência de soldagem utilizando o processo FCAW robotizado. A segunda ocorre variando o modo de funcionamento e a técnica em si, resultando na aplicação do CW-FCAW.

Por outro lado, quando se trata da inspeção dos produtos fabricados a realidade não é diferente. Principalmente, quando se refere às tensões residuais, poucos profissionais conhecem na prática o que representam e como se medem. Assim, este trabalho combina técnicas de soldagem e a medição de tensões residuais, uma vez que, tais tensões podem diminuir a produtividade gerando elevadas taxas de retrabalho, manutenção não programada e falhas catastróficas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho busca implementar o processo CW-FCAW como uma técnica alternativa na produção de painéis enrijecidos visando a redução de distorções e tensões residuais provocadas pelo processo de fabricação com sequência de soldagem compatível com a fabricação em estaleiro.

1.3.2 Objetivos específicos

Visando o alcance do objetivo geral o trabalho foi subdividido em duas etapas e assim cada uma possui objetivos diferentes:

Etapa 01

- Soldar painéis enrijecidos com 03 sequências diferentes utilizando FCAW robotizado;
- Medir e analisar o nível das distorções dos painéis;
- Medir e analisar as tensões residuais nas direções transversais e longitudinais ao cordão de solda por difração de raios X;
- Caracterizar a geometria dos cordões de solda;
- Caracterizar a microestrutura das fases presentes da junta soldada;
- Caracterizar as propriedades mecânicas de microdureza da junta soldada;
- Definir a melhor sequência comparando os níveis de distorções e tensões residuais para a próxima etapa.

Etapa 02

- Soldar painéis enrijecidos com a melhor sequência da etapa 01 utilizando o CW-FCAW com as velocidades de soldagem de 100 m/min e 120 m/min;
- Medir e analisar o nível das distorções dos painéis;
- Medir e analisar as tensões residuais por birrefringência acústica utilizando a diferença de tensões longitudinais e transversais ao cordão de solda;
- Avaliar a influência da velocidade de soldagem com percentual de arame frio (CW-FCAW) de 40% nas distorções e tensões residuais de soldagem;
- Caracterizar a geometria dos cordões de solda;
- Caracterizar a microestrutura das fases presentes da junta soldada;
- Caracterizar as propriedades mecânicas de microdureza da junta soldada;
- Comparar o perfil geométrico (largura, reforço, penetração), fases presentes e as propriedades mecânicas (microdureza) entre as soldas FCAW e CW-FCAW;

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os painéis enrijecidos na indústria naval

Painéis reforçados ou enrijecidos são tradicionalmente utilizados na construção naval, plataformas offshore, estruturas civis, na indústria aeronáutica, assim como em veículos espaciais. Na construção naval, os painéis reforçados representam os principais elementos estruturais usados na construção da viga de casco do navio e seus conjuntos estruturais internos e são geralmente submetidos a cargas laterais e no plano, podendo ser inicialmente planos ou curvos. Assim, a indústria naval é essencialmente uma indústria de montagem (MANDAL, 2017). A etapa inicial da construção de sub-blocos é constituída de uma série de etapas iniciais desde a seleção e corte dos materiais até os sub-blocos, o esquema de STUPELLO, CARDOSO E ANDERSON (2007) representa perfeitamente estas etapas.

Os painéis enrijecidos utilizados nas estruturas do casco do navio são constituídos por chapas e reforços longitudinais, usualmente instalados igualmente espaçados, perpendiculares a base do painel na direção dominante da carga, apoiados por elementos estruturais de maior rigidez como, por exemplo, as longarinas transversais (SHAMA, 2012). A Figura 2.1, mostra os diferentes tipos de seções laminadas padrões comumente usados em conjuntos de estruturas de navios como armações e enrijecedores (CHUJUTALLI, 2010; SHAMA, 2012). Os parâmetros do chapeamento unido são a largura e a espessura. A largura do revestimento fixado é a largura efetiva que depende principalmente da espessura do revestimento e do espaçamento entre os membros estruturais adjacentes (Figura 2.2).

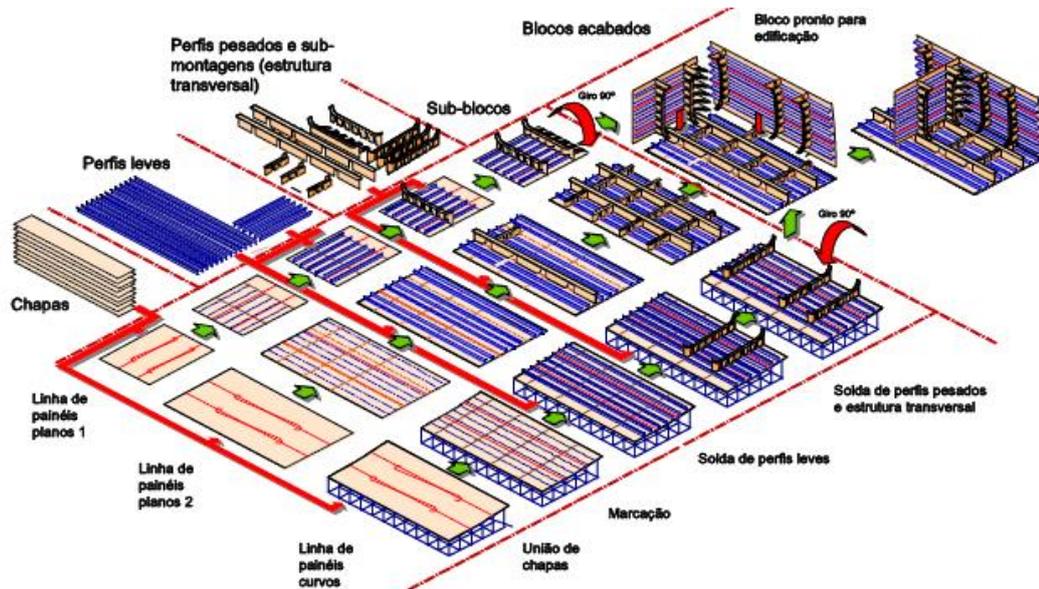


Figura 2.1 - A etapa inicial da construção de painéis e sub-blocos na construção naval. Fonte: STUPELLO, CARDOSO e ANDERSON (2007)

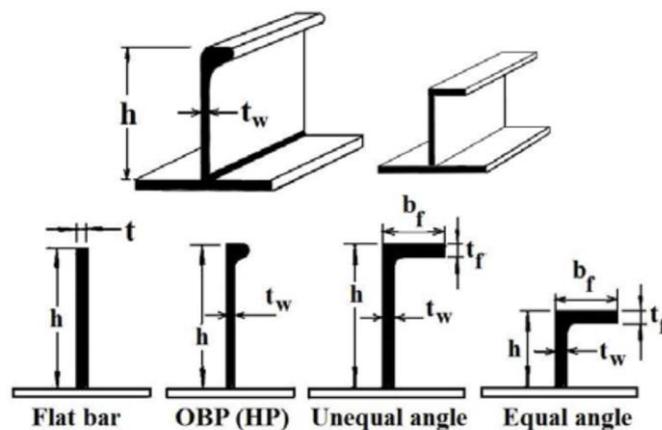


Figura 2.2 - Os diferentes tipos de seções laminadas padrões comumente usados em conjuntos de estruturas de navios como armações e enrijecedores. Onde b_f é a largura do flange; h é a profundidade de viga e t_w é a espessura do enrijecedor. (SHAMA, 2012)

Portanto, os painéis enrijecidos são fabricados a partir de procedimentos de conformação e soldagem, gerando distorções iniciais e tensões residuais que apresentam efeitos depreciativos para a estrutura dos painéis. De acordo com ESTEFEN (2009), os fatores que governam o comportamento de painéis enrijecidos são: condição de contorno, carregamento, geometria e propriedades do material. Já os parâmetros de geometria que determinam o comportamento de painéis enrijecidos são as dimensões do

enrijecedor, razão de aspecto da chapa entre enrijecedores, razão entre largura e espessura do chapeamento e magnitude da imperfeição inicial. Conforme PAIK (2018), para melhorar a rigidez e resistência dos painéis de placas, aumentar as dimensões do enrijecedor é geralmente mais eficiente do que simplesmente aumentar a espessura da chapa, e assim o painel é geralmente reforçado por elementos de viga (reforços) na parte longitudinal ou direção transversal.

2.2 Distorções de soldagem

A complexidade da soldagem a arco já é bastante conhecida pela interação de fatores de difícil controle como as elevadas temperaturas, formação de tensões térmicas e mudanças microestruturais. Estas tensões podem causar distorções e produzir altos níveis de tensões residuais. Estes tendem a reduzir a resistência da estrutura, que pode se tornar vulnerável a fraturas, flambagem e fadiga, além da susceptibilidade a corrosão. A distorção é um dos maiores problemas da soldagem (MANDAL, 2017). Segundo AWS (2001), as tensões residuais em soldas podem gerar dois efeitos principais. Pode produzir distorção ou causar falha prematura ou ambos. A distorção é causada quando a região de solda aquecida se contrai de maneira não uniforme, causando retração em uma parte da solda para exercer forças excêntricas na seção transversal da solda. As tensões de solda elasticamente em resposta a essas tensões. Distorção detectável ocorre como resultado desta tensão não uniforme.

De outra maneira, imperfeições de soldagem, ou também, imperfeições iniciais, são os termos mais utilizados à área da construção naval, em relação, as tensões residuais e distorções produzidas em peças ou componentes soldados, conforme GUEDES SOARES e SOREID (1981), PAIK e THAYAMBALLI (2004), MICHALERIS (2011) e GASPAR et al. (2011). Entretanto, quando se usa o termo definido anteriormente, atribui-se que junto com as tensões residuais de soldagem, também ocorrem (temporária ou permanentemente) as deformações de soldagem (deslocamentos e rotações), denominadas por encolhimento (*shrinkage*), distorção (*distortion*) ou empenamento (*warpage*). RADAJ (1992) e NITSCHKE-PAGEL e DILGER (2014) afirmam que tensão (*stress*) e deformação (*deformation*) são em grande parte opostos. Altas tensões ocorrem,

onde a deformação é restringida (isto é, baixa), baixas tensões onde a deformação é desenfreada (isto é, alta). A Figura 2.3 representa a interação entre as tensões residuais e as distorções produzidas pela soldagem.

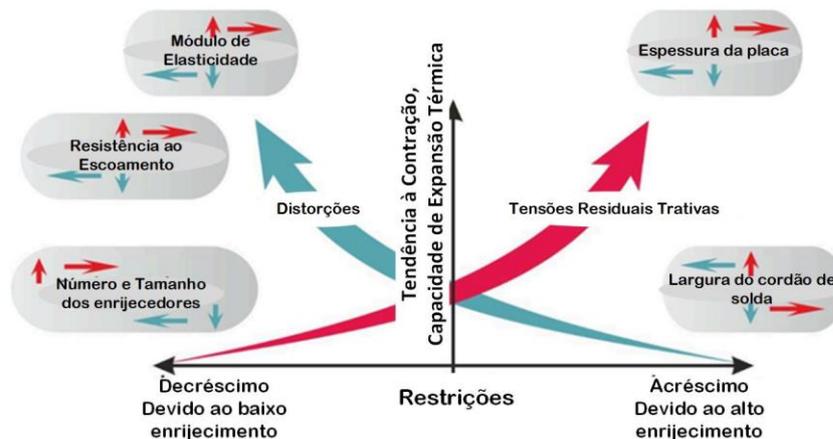


Figura 2.3 – Representação esquemática da interação da geração das tensões residuais e distorções. Fonte: Adaptado de NITSCHKE-PAGEL E WOHLFAHRT (2002)

Frequentemente, a distorção de um componente soldado, devido à soldagem é uma consequência de mudanças graves e visíveis da forma de uma construção. As distorções são uma evidência para os processos de contração e dilatação que são afetados pela entrada de calor local, e estas sempre estão acompanhadas das tensões residuais. Assim, o maior desafio da indústria é alcançar alta precisão dimensional combinada com baixas tensões residuais de soldagem. (NITSCHKE-PAGEL e DILGER, 2014).

Segundo MASUBUSHI (2013), existem muitos fatores que contribuem para a distorção total em uma soldagem. A distorção em uma estrutura soldada é uma função dos parâmetros estruturais, dos parâmetros do material e dos parâmetros de fabricação. Os parâmetros estruturais incluem a geometria da estrutura (se é um painel reforçado com estruturas, um cilindro, uma estrutura esférica etc.), espessura da chapa e tipo de junta (se é uma junta de topo, junta de filete etc.). Os parâmetros do material incluem tipos e condições da placa de base e materiais de enchimento-metal. Entre os parâmetros de

fabricação estão os processos de soldagem, incluindo SMAW, arco submerso, GMAW, GTAW e outros; os parâmetros do procedimento: corrente de soldagem, tensão, velocidade de deslocamento do arco, temperatura de pré-aquecimento e interpasses etc., e os parâmetros de montagem: sequência de soldagem e grau de restrição, entre outros.

Nestes aspectos sobre distorções, COLEGROVE et al. (2009) verificaram o impacto do processo através do calor imposto nas distorções e tensões residuais na soldagem de aço estrutural A36. YANG et al. (2017), constataram que a contração e as distorções de diferentes aços aumentam quando soldados com maiores energias de soldagem e diminuem com o aumento da espessura da placa. Porém também, concluíram que aços de alta resistência (HSLA 80) geram menores imperfeições que aços menos nobres como o DH-36. Assim como CABRAL et al. (2013) estudaram o procedimento e a transferência do processo MAG para diminuição de distorções, como também, OKANO, TSUJI e MOCHIZUKI (2017) estudaram a distorção usando dois diferentes processos de soldagem. DAVIES et al. (2015) analisaram a influência das condições de deformação e tensões residuais pré-existentes e após a soldagem GMAW.

Além disso, a grande maioria das pesquisas, atualmente usam análises computacionais combinadas com medições experimentais, desde TENG et al. (2001) e prosseguindo com DENG et al. (2007) que estudaram a influência da espessura do flange nas distorções de soldagem, e concluíram que flanges finos tendem a deformar mais dependendo do pico de temperatura. Porém, TENG et al. (2001) foram mais profundo em suas análises, observando ainda os efeitos da penetração e das restrições. FU et al. (2014), também avaliaram as condições de restrição em soldas e suas interferências nas tensões residuais e distorções de soldagem. VANLI e MICHALERIS (2001) simularam condições de solda SAW e GMAW na soldagem de enrijecedores analisando as distorções angulares, por flambagem e dobramento longitudinal em diferentes tamanhos de flange e abas dos enrijecedores. Por outro lado, estruturas compostas por painéis de seção fina em relação ao seu tamanho são geralmente propensas a distorção de flambagem. Quando soldadas resultam em distorção de encurvamento, a magnitude da distorção é muito grande e métodos de controle de distorção devem ser implementados para remover a fonte de flambagem. Estruturas com seções espessas são mais resistentes à flambagem e geralmente distorcem nos modos fora de plano angular e dobramento longitudinal (DEO, MICHALERIS e SUN, 2003).

Entretanto, MICHALERIS (2011), afirma que a aplicação de soldagem na fabricação de grandes estruturas oferece várias vantagens em relação aos métodos de união mecânica, como melhor desempenho estrutural, redução de peso e custo, além da flexibilidade do projeto. No entanto, a soldagem induz tensões residuais e distorção, o que pode resultar em perda de controle dimensional visível pela má aparência, retrabalho dispendioso e atrasos na produção, gerando custos extras (MOORE, 2009), uma vez que o tratamento das distorções de soldagem são correção e prevenção por métodos mecânicos ou térmicos. Atualmente, a previsão e o controle altamente precisos da distorção de solda estão se tornando cada vez mais importantes para melhorar a eficiência e a produtividade na fabricação (OKANO et al. 2017). Segundo DO AMARAL e ESTEFEN (2004), as distorções de fabricação são o principal obstáculo para a implantação de novos procedimentos na moderna construção naval e offshore baseados na automatização e robótica, assim sua redução é extremamente necessária.

Apesar de MANDAL (2017) classificar apenas em cinco os modos de distorções produzidas por soldagem, MASUBUCHI (2013) e (GRAY, CAMILLERI e MCPHERSON, 2014), classificam as distorções de soldagem em seis tipos (modos), conforme ilustrado na Figura 2.4, considerando que geralmente ocorrem em soldas de topo e soldas de filete: contração longitudinal, contração transversal, distorção rotacional, flambagem, distorção angular e dobramento longitudinal.

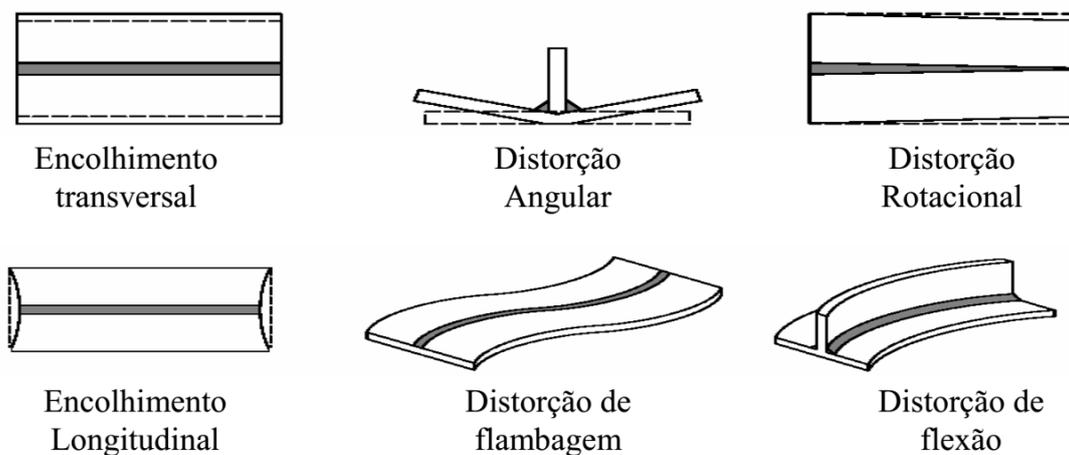


Figura 2.4 - Classificação das distorções de soldagem. Fonte: Adaptado de MASUBUSHI, 2013

De uma forma simplificada, os modos de distorção de soldagem podem ser classificados em modos dentro e fora do plano. A contração transversal, a contração

longitudinal e a distorção rotacional são modos no plano. Flambagem, dobramento longitudinal e a distorção angular são modos fora do plano. Em geral, a distorção no plano é insignificante em pequenas partes e recebe pouca atenção. Em grandes componentes, tais como na construção naval, no avião a distorção pode ser significativa e os fabricantes compensar começando com partes maiores. De outra forma, os modos de distorção fora do plano são muito comuns e às vezes difíceis de controlar. Assim, este trabalho tratará com mais profundidade as distorções fora do plano nas chapas dos painéis e não nos enrijecedores.

Assim, a distorção nas soldas de filete é semelhante àquela que ocorre nas soldas de topo, porém em menor intensidade. A contração transversal e longitudinal (Figura 2.5) e a distorção angular resultam da natureza desequilibrada da tensão presente nestas soldas. Como as soldas em ângulo são frequentemente usadas em combinação com outras soldas em estruturas soldadas, a distorção específica resultante pode ser muito complexa (AWS, 2001).

Com relação, às medições das distorções após a soldagem, atualmente existem métodos convencionais utilizando equipamentos de medição lineares e angulares (como paquímetros, relógio comparador, micrômetro, *strainingage*, goniômetros etc.) que foram e ainda são muito utilizados na área da construção naval e offshore. Porém, devido ao avanço tecnológico, já é possível trabalhar com instrumentos digitais baseados em sensores laser e câmeras inteligentes de milésimos de precisão. De qualquer forma, a determinação da amplitude, assim como, a forma de distribuição das distorções, usando equipamentos de medição, é essencial para determinar a capacidade real de resistência ao colapso de estruturas navais e offshore (RADAJ, 1993; DO AMARAL e ESTEFEN, 2004).

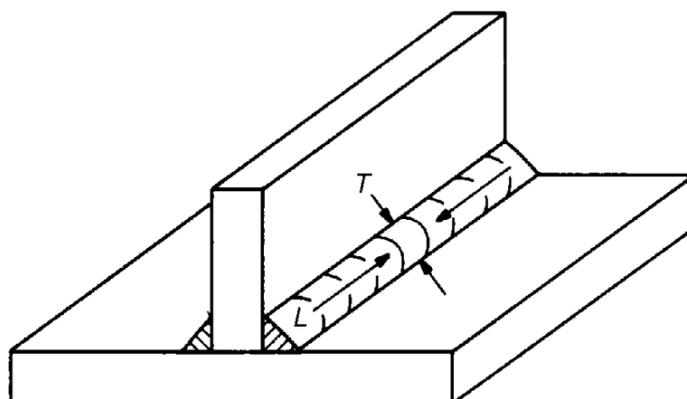


Figura 2.5 - A contração transversal (T) e longitudinal (L) em solda de filete. Fonte: AWS (2001)

No caso de contração angular, existem duas possibilidades, tanto a medição das variações das distorções em ângulos, como também a medida da distância entre uma superfície de referência e o ponto da distorção final. Quando as distorções ocorrem nas bordas, pode-se medir conforme a Figura 2.6(a). No caso de medir a deflexão da seção mediana, mede-se a distância, conforme a Figura 2.6(b) e (c). Para os exemplos da Figura 2.6(a) e (c), estes serão as medidas realizadas em painéis de acordo com o padrão admitido neste trabalho. Sendo que, com mais profundidade, segundo AWS (2001) se uma junta estiver livre de restrições externas durante a soldagem de filete, a contração do metal de solda causa distorção angular em torno do eixo da junta, conforme mostrado na Figura 2.6(a). No entanto, se os membros são restringidos por alguns meios, a distorção depende do grau de restrição. Por exemplo, quando o movimento de enrijecedores soldados a uma placa é impedido, a placa se distorce em um padrão de onda, como mostra a Figura 2.6(b).

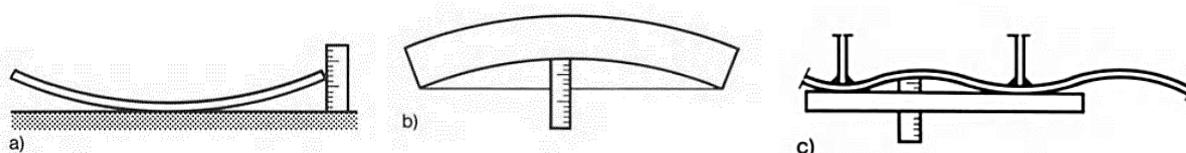


Figura 2.6 – Medição de distorções (a) Pelo desnível das bordas; (b) contração angular e (c) medida contínua de deflexão. Fonte: RADAJ, 1993.

No caso de painéis enrijecidos, a distorção angular pode ser global ou local. A distorção angular global acontece através das múltiplas contrações angulares envolvendo, diversos fatores, principalmente o tipo de passe de solda de filete (contínuo, alternado, engastado), espessura da placa, geometria, espessura e a distância entre os enrijecedores. Pode ser medida em valor de ângulo ou a distância do desnível (mm) da superfície de referência e a borda do painel. Onde a diferença entre d (distância após a soldagem) e d_0 (a distância antes da solda) é o valor da distorção de soldagem do painel, como mostra a Figura 2.7(a). Geralmente medida nos quatro cantos do painel, similar às medições de CABRAL et al. (2013), Figura 2.7(b). As distorções são fortemente influenciadas pela sequência de soldagem, independentemente de onde aplicada, seja em chapas, barras, tubos etc. até perfis mais complexos como painéis enrijecidos, chassis de carros, entre outros. SATTARI-FAR e JAVADI (2008) observaram como a sequência de soldagem influenciam nas distorções de tubos, onde dependendo do percurso adotado o aumento das distorções pode ser significativo.

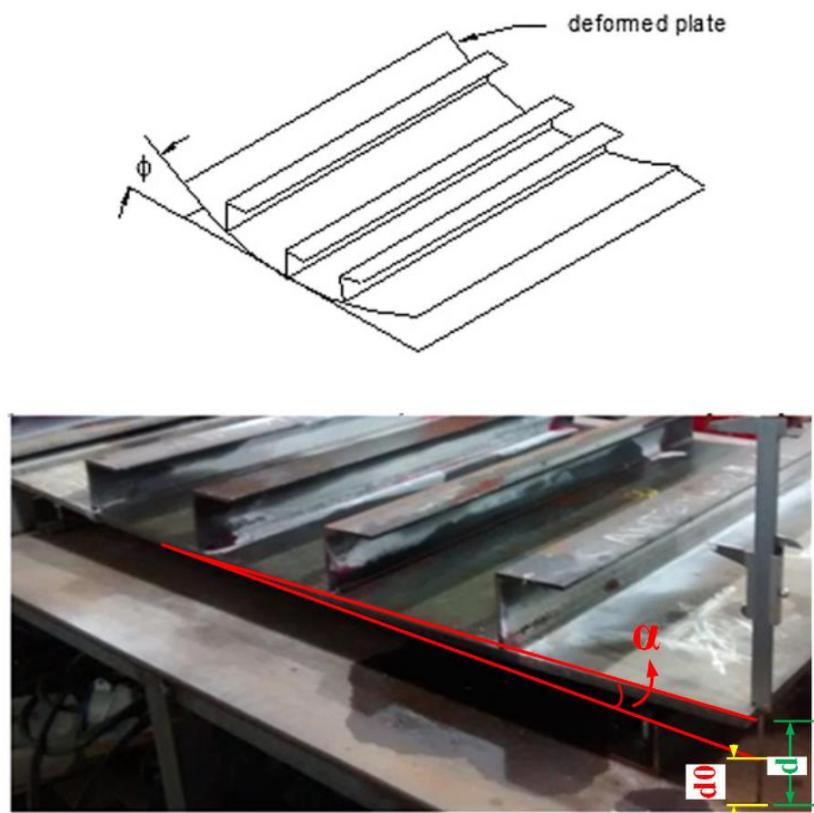


Figura 2.7 – Distorção angular em painel enrijecido não restringido. (a) Esquema (b) Imagem da medição de distorções. Fonte: Autor

2.3 As tensões residuais de soldagem

O conceito mais simples de tensões residuais refere-se a tensões que permanecem no componente ainda que retiradas as forças externas aplicadas sobre o corpo, de acordo com MACHERAUCH (1987), MASUBUSHI (2013), NOYAN e COHEN (2013), HAUK (1997), WITHERS e BHADESHIA (2001), TOTTEN (2002), SCHAJER (2013) e HASHMI (2014). Este estado de tensões é auto equilibrante e, portanto, a resultante das forças e de momentos que produzem é zero conforme as equações 3.10 e 3.11. Uma outra forma de expressar o que são tensões residuais são aquelas que não são necessárias para manter o equilíbrio entre o corpo e o seu meio (WITHERS e BHADESHIA, 2001). Segundo MASUBUSHI (2013) vários termos técnicos têm sido usados para se referir as tensões residuais, como: tensões internas, tensões iniciais, tensões inerentes, tensões de reação e tensões presas internamente.

As tensões residuais são sempre produzidas, se as regiões de material não são homogeneamente elásticas ou se foram deformadas plasticamente de forma tão permanente que incompatibilidades do estado de deformação venham ocorrer, após atingir temperatura homogênea final. Está bem estabelecido que, virtualmente, nenhum material, nenhum componente e nenhuma estrutura de importância técnica existe livre de tensões residuais (HAUK, 1997; WITHERS, 2007; MASUBUSHI, 2013; NOYAN E COHEN, 2013 e HASHMI, 2014). As equações a seguir descrevem o estado das tensões residuais considerando um volume genérico do material e o momento das forças atuantes em material em repouso que possui tensões residuais:

$$\int \sigma \cdot dV = 0 \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\int dM = 0 \quad \text{Equação 2.2}$$

Devido ao seu carácter auto equilibrante, a presença de tensões residuais pode não ser facilmente perceptível e assim estas podem ser negligenciadas ou ignoradas durante o projeto de engenharia. No entanto, estas devem ser consideradas da mesma forma como

as tensões aplicadas, devido ao carregamento externo a qual o componente está sujeito, como afirma WITHERS (2007). Em termos de resistência do material, o principal efeito das tensões residuais é como uma adição ao carregamento aplicado que reduz significativamente a resistência causando a falha prematura. Porém, a contribuição das tensões residuais pode ser benéfica ou prejudicial, dependendo da natureza (que podem ser trativas “+” ou compressivas “-“) e da localização de tais tensões.

Assim também, WITHERS E BHADESHIA (2001) afirmam que as tensões residuais de soldagem ocorrem devido ao desajuste entre diferentes partes, diferentes fases ou diferentes regiões dentro da mesma parte, decorrentes de tensão térmica não uniforme e deformações decorrentes de transformações de solidificação e de fase sólida. De tal modo, que a região ao redor da poça de fusão da solda é inevitavelmente associada a tensões residuais de tração na direção da soldagem e as tensões de tração são equilibradas por esforços de compressão a partir da linha de fusão da solda. Assim sendo, a tensão residual de tração induzida pela soldagem promove a fratura frágil, a deformação por flambagem e a corrosão sobtensão reduzem a vida de fadiga de estruturas soldadas em serviço (DE e DEBROY, 2011).

Sistematicamente, as tensões residuais podem ser classificadas através de três fatores:

a) Pelas causas geradoras. Ou seja, as tensões residuais podem ser produzidas por incompatibilidade estrutural e/ou por tensões produzidas por uma distribuição desigual de deformações não elásticas, incluindo as deformações plásticas e térmicas (ASM, 2011).

b) Pela escala sobre as quais se auto equilibram;

c) Ou de acordo com os métodos pelas quais são medidas.

Dessa forma, usando o termo “homogêneo” para “constante em magnitude e direção”, a literatura estabelece que existe três tipos de tensões residuais: tensões do tipo I, II e III. Considerando as tensões conforme a relação das dimensões e as magnitudes as quais os materiais estão sujeitos em uma determinada região, uma outra classificação é a divisão em macro e micro tensões residuais. O que, simplificado, é o reflexo da subdivisão dos três tipos de tensões residuais em duas classes, onde as tensões do tipo I são macro e as tensões do tipo II e III são micro (NIKU-LARI, 2013).

A avaliação dos estados de tensão residual é frequentemente controversa e a razão para isto está relacionada a vários aspectos específicos que devem ser levados em consideração na medição de tensão residual, uma vez que as análises às vezes são problemáticas e duvidosas e que a notação de tensão residual nem sempre é usada de forma adequada por alguns autores (HAUK, 1997). Por não existir um sistema de padronização que convencie e oriente a distribuição das tensões residuais, cada autor usa o que lhe convém. Porém, este ponto é primordial para o entendimento adequado e conhecer os possíveis efeitos que podem causar em uma peça ou estrutura soldada. Assim, considerando que não exista uma maneira certa ou errada, o critério utilizado baseia-se no mais referenciado pela comunidade acadêmica especializada, de acordo com o modelo da Figura 2.8. Geralmente, as análises são realizadas bidimensionalmente, considerando as direções longitudinais (σ_y) e transversais (σ_x), tendo sempre como referência o cordão de solda. As tensões do plano normal (σ_z) são menos mensuradas, porém não devem ser descartadas em nenhuma hipótese, mesmo estando condicionada a espessura da chapa. Finalmente, vale ressaltar que, na prática, a componente mais significativa é composta por tensões longitudinais, e geralmente equivalem, em média, ao triplo das tensões transversais ao cordão de solda, onde se considera soldas de um único passe e que não exista gradientes de temperatura no eixo z (NITSCHKE-PAGEL e WOHLFAHRT, 2002 e GUROVA, QUARANTA E ESTEFEN, 2006).

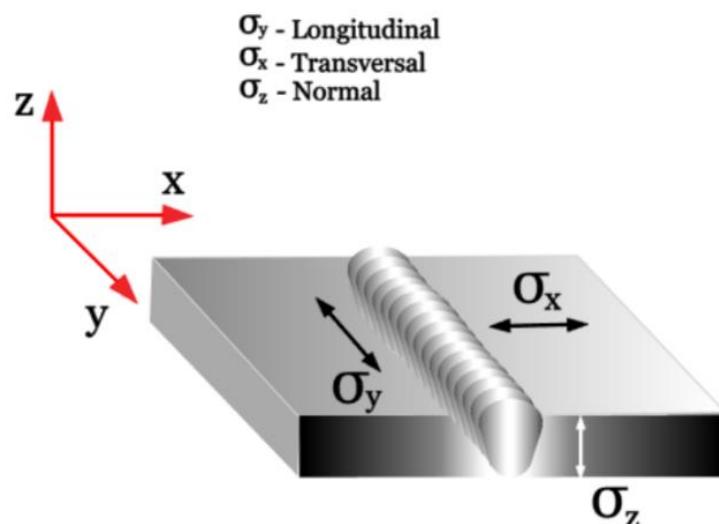


Figura 2.8 – O plano das direções das tensões residuais. Fonte: autor.

HASHMI (2014) afirma que as tensões residuais compressivas em um subvolume de uma peça de trabalho devem ser sempre compensadas por tensões residuais trativas em um outro subvolume adjacente. Por exemplo, uma alteração na tensão residual devido a transformação de fases ou o carregamento por fadiga em um subvolume afetará a tensão residual em outro subvolume. Ou seja, as tensões residuais atuantes dentro de um determinado material possuem caráter compensativo. E ainda, se um componente contendo tensões residuais é cortada, de alguma forma, as tensões com as componentes da força que atuam na superfície de corte serão aliviadas e as tensões no interior do material restante serão redistribuídos para manter o equilíbrio (WITHERS, 2007 e SCHAJER, 2013). Segundo SHARPE (2008), o efeito das tensões residuais é comparável ao efeito da concentração de tensão.

Em abordagens práticas mais recentes, NITSCHKE-PAGEL e DILGER (2014) tentam distinguir entre as chamadas tensões residuais locais e globais. Descrevendo que, as tensões residuais locais são a parte da condição de tensão residual do componente que é resultante dos processos locais de aquecimento e resfriamento no metal de solda e na zona adjacente afetada pelo calor (ZAC). Por outro lado, devem existir tensões residuais globais em todo o componente que são resultantes de processos de contração que ocorrem em toda a construção. Essas tensões residuais globais devem ser afetadas pela rigidez do componente em combinação com os processos locais de contração. Finalmente, FLEWITT (2008) afirma que são as tensões residuais macro fornecem energia elástica armazenada em um corpo e este libera uma força motriz para a criação ou evolução de danos. Entretanto, a energia armazenada esteja relacionada a essa escala particular de tensões, ela não exclui contribuições potenciais das macros e microtensões relacionadas. Por outro lado, o conhecimento das condições iniciais de tensões da chapa antes da soldagem serve como parâmetro de comparação às medições obtidas após o processo de soldagem. Considerando esta condição, PARK e LEE (2007) realizam estudos e concluíram que, os valores de tensões residuais obtidos na chapa antes da soldagem giram em torno de ± 50 MPa.

Segundo COLEGROVE *et al.* (2009) as tensões residuais de soldagem são primeiramente causadas pelo escoamento compressivo que ocorre na vizinhança da zona fundida com o aquecimento e expansão do material durante a soldagem. Quando o metal de solda esfria, este se contrai causando tensões residuais trativas adjacentes ao longo de todo o cordão de solda. Estas tensões são mostradas na Figura 2.9a, onde após a

soldagem, um esforço de tração residual permanece ao longo da linha central de solda e provoca uma tensão de compressão equilibrante a partir da zona de solda como mostrado na Fig. 2.9b. Os autores ainda afirmam que as tensões residuais de tração na linha de solda reduzem a resistência à fadiga e a dureza, particularmente quando combinados com entalhes ou defeitos associados ao cordão de solda.

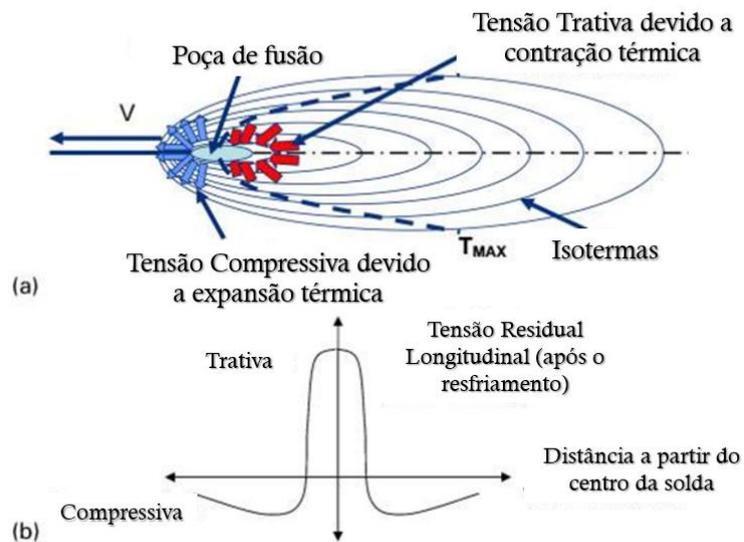


Figura 2.9 – (a) Após a soldagem, um esforço de tração residual permanece ao longo da linha central de solda após a passagem da fonte de calor e tensões de compressão equilibrante a partir da zona de frente da solda. (b) o diagrama de tensões formados após a soldagem. Fonte: Adaptado de COLEGROVE *et al.* (2009)

Retomando o assunto das tensões térmicas, muitos autores trabalham estritamente a relação entre tensões residuais de soldagem com tensões térmicas, porém não definem claramente onde surgem e onde cessam suas ações. MASUBUSHI (2013) usa o termo tensões térmicas transientes, onde implicitamente pode-se definir que tais tensões possuem um período para formação e atuação durante a soldagem. Entretanto, MISHCHENKO *et al.* (2018), ressaltam a importância de diferenciar as tensões residuais (TR) das tensões térmicas (TT). Estas tensões são produzidas durante a distribuição não uniforme da temperatura do ciclo térmico no metal de solda e nas regiões mais próximas pela fonte de calor e muda à medida que a soldagem avança. Produzindo durante a solidificação e o resfriamento, a contração (*shrinkage*) e a deformação plástica do metal fundido. Ao final do resfriamento da junta soldada SCOTTI (2014) afirma que estas

tensões formadas pelo elevado gradiente de temperatura podem se manifestar de três formas isoladas ou conjuntamente:

- (1) Como distorções;
- (2) Como tensões residuais;
- (3) Como falha (na forma de colapso, total ou parcial, como uma trinca propagada e estagnada).

Para RADAJ (1993), até a temperatura se estabilizar existem tensões residuais temporárias e permanentes, onde estas influenciam na resistência da estrutura e aquelas na soldabilidade do material. Assim, o exemplo clássico da fenomenologia da geração das tensões produzidas antes, durante e após a soldagem a arco está representada na Figura WW, mostra a distribuição de temperatura ao longo da seção transversal ao cordão indicando as isotermas em cada seção 1-1, 2-2, 3-3 e 4-4, conforme proposto por SŁUŻALEC (2005). A partir de uma solda de simples deposição (eixo X) sobre uma chapa fina, onde mostra-se o efeito do gradiente de temperatura e as tensões resultantes. A seção 1-1 está ausente de transformações, devido a não existência do gradiente térmico. O arco elétrico move-se a uma velocidade x , e encontra-se na origem O, seção 2-2 próximo a fonte de calor, onde as tensões são zero, devido ao metal estar líquido. As tensões, a uma curta distância da fonte de calor são compressivas, porque a expansão dessas áreas é restringida pelo metal circundante, onde as temperaturas são mais baixas. Uma vez que as temperaturas destas áreas são elevadas e a resistência ao escoamento do material é baixa, as tensões nestas áreas são tão elevadas quanto a resistência ao escoamento do material a temperaturas correspondentes.

Entretanto, a magnitude da tensão compressiva passa por uma distância de aumento máxima da solda ou com uma temperatura decrescente. As tensões em regiões afastadas da solda são de tração e equilíbrio com tensões de compressão em áreas próximas à solda (conforme Figura 2.10). Destacando para a seção 3-3, onde as tensões residuais estão todas formadas após o término da solidificação do metal de solda, ocorre contração, então, o metal de solda apresenta tensões trativas. À medida que a distância da solda aumenta, as primeiras tensões mudam para compressão. Na seção transversal 4-4, são produzidos altos esforços de tração nas regiões próximas da solda, enquanto as tensões de compressão são produzidas em regiões afastadas da solda. Esta é a distribuição usual de tensões residuais que permanecem após a conclusão da soldagem. A região fora da seção cruzada permanece elástica durante todo o processo térmico de soldagem.

Assim, conforme SCOTTI (2014) afirma que as tensões residuais próximas da região soldada são governadas pelo calor de soldagem, enquanto aquelas longe da solda (no metal de base) são coerentes com a tensão pré-existente.

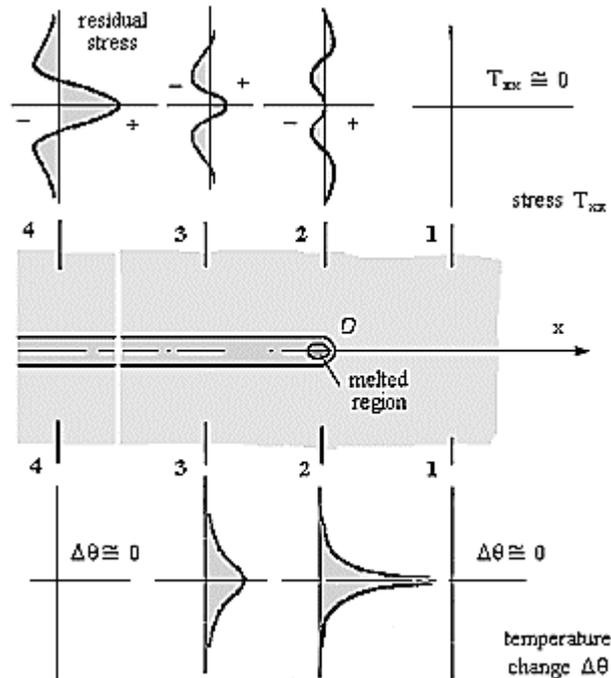


Figura 2.10 – Os efeitos termomecânicos da solda. Fonte: SLUŽALEC (2005)

Sendo assim, tensões térmicas transientes são inerentes ao processo que envolve aquecimento gerando tensões residuais e distorções em ações combinadas em que muitas vezes causam trincas ou desajustes nas juntas soldadas. Principalmente, quanto ao caso de ter se formado tensões residuais com elevado perfil trativo em áreas próximas ao cordão de solda que são os maiores causadores de falhas prematuras de estruturas soldadas sob certas condições de trabalho (ASM, 2011).

Conforme LEGGATT (2008) os fatores determinantes presentes em uma estrutura soldada são:

- As tensões residuais presentes nas peças soldadas antes da soldagem, oriundas dos processos de fabricação;
- As propriedades dos materiais da solda e do metal de base, incluindo composição química, microestrutura e propriedades termomecânicas;

- A geometria das peças soldadas;
- As restrições aplicadas às partes que estão sendo unidas através de acessórios externos, tais como gabaritos de soldagem ou fixação a outras partes componentes da estrutura;
- O processo de soldagem, incluindo a preparação da solda, as condições de soldagem e a sequência em caso de soldagem multipasses;
- Tensões residuais geradas ou relaxadas por operações de fabricação após a soldagem ou por carregamento mecânico ou térmico durante a vida útil.

Uma forma de estudar o mecanismo de geração das tensões residuais em estruturas soldadas além da experimentação e medição, baseia-se nos processos termomecânicos associados com a matemática computacional e a simulação com softwares específicos. Sendo possível obter resultados satisfatórios que ajudam na previsão, controle e alívio do estado real das tensões residuais provocadas na estrutura após a soldagem de maneira qualificada, ou seja, perceber o efeito que cada fator ou parâmetro isoladamente possui sobre a magnitude de tais tensões. O base de partida destes estudos fundamenta-se nos modelos de ROSENTHAL (1946) e GOLDAK et al. (1984) referentes aos efeitos da distribuição de temperatura da fonte de calor durante a soldagem e através destes modelos diversos trabalhos consideram os possíveis efeitos nas tensões residuais de soldagem como proposto por RADAJ (1993); GERY, CHAKRAVARTI e BIBBY (2005), LAWRENCE e MICHALERIS (2011), TEKGOZ et al. (2011) e KNOEDEL et al. (2017), entre outros.

No entanto, a grande predominância dos estudos e pesquisas atualmente consolidaram-se com as tensões residuais sendo influenciadas por quatro grupos de parâmetros da tecnologia da soldagem interrelacionados (Figura 2.11).

- ***Parâmetros de projeto do componente soldado:*** a espessura da placa ou de tubulações (fina, média ou grossa), geometria da junta (solda plana, filete, duplo filete etc.) e tipo de chanfro (V, X, K, U etc.), números de passes, composição química do metal de base e do consumível (arame ou vareta);
- ***Parâmetros de escolha disponíveis:*** Processos de soldagem (Processo autógeno, como GTAW ou com deposição metálica como GMAW, FCAW, SAW, SMAW, PAW); o modo utilizado para soldar (manual, mecanizado, automatizado);

- **Parâmetros de aplicação das técnicas operacionais:** sequência de soldagem, passes de solda (contínuo, intermitente, alternados, passe à ré, tecimento), pré e pós aquecimento, estrutura com ou sem restrições;
- **Parâmetros operacionais primários,** como: I (corrente), U (tensão), velocidade de soldagem (mm/s). Sendo estes, porém os mais utilizados, por constituírem a energia envolvida e utilizada para fusão dos metais, sua fórmula é descrita conforme a equação (3.3). Conhecida como calor imposto ou aporte térmico, termo genérico da energia de soldagem, geralmente em KJ/mm. Que também interferem na forma e volume do cordão de solda.

$$Hp = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \quad \text{Equação 2.3}$$

Primeiramente, devido às maiores restrições motivados pelos critérios de segurança, a concepção do projeto de uma estrutura soldada consciente envolve atualmente habilidades dos engenheiros de soldagem e dos projetistas, pela consideração não só da estrutura em si, mas também pelo conhecimento prévio de complexas interações entre os fenômenos metalúrgicos, os aspectos relativos aos mecanismos das conexões e o comportamento mecânico de todos os materiais envolvidos (MACHADO, 2012). Onde percebe-se que as tensões residuais, as distorções e as falhas são fenômenos de controle onerosos e complexos. Assim, tendo em vista que, algumas áreas de produção industrial, por exemplo, a construção naval nem todos os projetos quantificam as imperfeições iniciais de soldagem explicitamente (GASPAR et al. 2011), mas estas imperfeições diminuem a resistência da estrutura, além de serem acumulativas (KHEDMATI et al. 2007) e perigosas no caso das embarcações quando em operação.

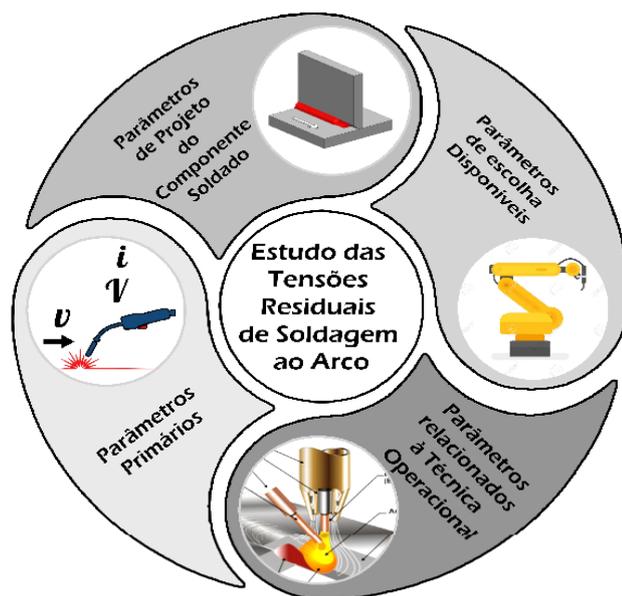


Figura 2.11 – Grupos de parâmetros mais influentes no estudo das tensões residuais de soldagem a arco. Fonte: Autor

De outra forma, o controle das tensões residuais de soldagem iniciam desde a escolha do tipo de material a ser soldado, ou seja, o aço carbono, por apresentar uma composição basicamente formada por Fe e C e poucos elementos de liga que interferem nas transformações de fase (WITHERS E BHADSHIA, 2001 e NITSCHKE-PAGE e DILGER, 2014) considera-se na prática que este mecanismo possui participação desprezível na geração das tensões residuais no metal de solda deste tipo de material. Diferente dos aços média e alta liga, aço inox, monel, stellite, etc. estes terão seus níveis de tensões inerentes afetados pela composição química (CHO e KIM, 2002; LEGGATT, 2008 e MURAKAWA et al. 2008). Assim, foram desenvolvidos processos de soldagem, através da formulação e fabricação de consumíveis especiais produzidos com este objetivo baseando-se no princípio das transformações de fase em baixas temperaturas (LTTW - Low Temperature Transformation Welding), onde são induzidas as formações de tensões residuais compressivas e redução das distorções (MIKAMI et al 2009 e THOMAS e LIU, 2014).

Outras características intrínsecas ao material como propriedades físico-químicas (condutividade térmica, expansão térmica, densidade, calor específico etc.), podem favorecer para a geração ou necessitar de pré-aquecimento para alívio de tensões residuais, como o cobre e o alumínio e suas ligas, por serem bons condutores de calor, o

dissipam rapidamente, necessitando na maioria das vezes de fontes localizadas mais intensas, devido a dificuldade para fusão local da solda.

Outros fatores, muito relevantes que são correlacionados à formação ou aumento das tensões residuais em componentes soldados, referem-se aos parâmetros de geometria da junta como espessura (chapa, dutos, flanges etc.), tipo e ângulo de chanfro. O gradiente de temperatura é o que diferencia a origem das tensões residuais em componente de espessura fina e grossa. Onde, em espessuras finas, a poça de fusão pode ser considerada 2D e em espessuras grossas, 3D, alterando o processo de transferência de calor da peça e, conseqüentemente, a distribuição da temperatura que influencia diretamente no processo de formação das tensões (ASIFA et al. 2011). A geometria da junta na forma de solda de topo, solda de filete, sobreposta, entre outras também afeta esta distribuição, pela maneira como o calor é distribuído, sendo a junta em T é a que possui maior coeficiente de remoção de calor (TUSEK et al. 2003).

Usando modelos através da aplicação de métodos de elementos finitos (FEM) aplicados a solda de topo, com a diminuição da espessura as tensões residuais aumentam (TENG e LIN, 1998). Um possível argumento para descrever o fato é que a energia de absorção por unidade de volume em chapas finas é maior que nas grossas, ocasionando a relação inversa entre a espessura da chapa e as tensões residuais. Porém, em soldas de juntas T, com o aumento da espessura da chapa, a não uniformidade da temperatura altera a expansão térmica e a contração durante o resfriamento, conseqüentemente, aumenta as tensões residuais.

Neste mesmo tipo de junta, o aumento da espessura do flange fortalece a restrição interna elevando estas tensões em juntas T (TENG, 2001). No caso de flange de tubulações de paredes grossas, o aumento da espessura aumenta a zona de influência, conforme visto em trabalho de simulação utilizando FEM e o processo MIG (ABID, SIDDIQUE e MUFTI, 2005). O número de passes também influencia a distribuição das tensões residuais, em solda de filete em junta T, um único passe em um lado gera mais tensões do que quando se solda ambos os lados (FU et al. 2015). A medição das tensões a cada passe de solda foi simulada em uma junta contendo seis passes em chapas de 16 mm de espessura de aço de alta resistência temperado, onde observou-se que os 3 primeiros passes tendem a gerar mais tensões compressivas e os passes seguintes 4, 5 e 6 mostraram a tendência às tensões trativas. Porém as tensões abaixo da superfície ao final do processo mostraram-se compressivas (GAO et al. 2014).

A escolha do processo, também afeta a magnitude das tensões residuais de soldagem ao arco elétrico, um dos estudos que mais envolve processos com este tipo de fonte local, utilizou quatro destes processos (SAW, DC GMAW, GMAW pulsado e CMT Fronius) e mais dois a laser (um autógeno e outro híbrido) aplicando no aço carbono naval (ASTM A131), onde observou-se que os processos apresentaram picos bem parecidos (próximo de 400 MPa) proporcionais aos picos de temperatura, diferenciando-se pela largura dos picos, onde o SAW possui picos mais largos (COLEGROVE et al. 2009). Assim, como a mudança nas técnicas de soldagem pressupõe diminuição das tensões de soldagem, como a soldagem CW-GMAW, mostrou uma redução de 40% em soldas de topo de aço naval (COSTA et al. 2017). Por outro lado, o processo e as tensões residuais podem apresentar resultados inesperados, utilizando os processos SMAW, FCAW e GTAW em soldas de topo em aço balístico observou-se que a ZTA quando submetida a ensaio de penetração com projéteis, o processo SMAW com maiores tensões residuais, resistiu ao teste, e os outros mesmo com menores níveis de tensões foram penetrados (REDDY e MOHANDAS, 1996).

Com relação aos parâmetros de aplicação das técnicas, os dois mais pesquisados são as restrições da estrutura soldada e a sequência de soldagem. O grau de restrição refere-se à resistência da junta soldada à contração e expansão térmica livre do material aquecido (LEGGATT, 2007). A imobilização da junta soldada possui forte influência no nível das tensões residuais (SHIRZADI e BHADESHIA, 2010; JAVADI, 2015 e SCHROEPFER, KROMM e KANNENGIESSER, 2017), tanto que se considera a existência de dois tipos de tensões residuais produzidas: as tensões residuais inerentes originadas naturalmente pelo desajuste e auto equilíbrio interno e as tensões de reação que são uma consequência das peças soldadas presas geralmente por mecanismos mecânicos. Entretanto, o princípio básico para boas práticas de soldagem revela que restrições longitudinais diminuem mais eficientemente as tensões residuais de soldagem (GUROVA, QUARANTA e ESTEFEN, 2006).

De outra forma, a sequência de deposição dos cordões também possui impacto direto na distribuição das tensões residuais e distorções nas mais variadas formas e geometrias soldadas. Em trabalhos envolvendo a simulação em soldas de topo em chapas e soldas circunferenciais em tubos, ficou notória esta influência (TENG et al. 2003). Utilizando FCAW robotizado na soldagem de painéis enrijecidos foi observado uma redução de até 86% das tensões residuais entre 3 sequências utilizadas (RODRIGUES, et al. 2019). Simulando a sequência de deposição em chanfro J em juntas de tubo-bloco de

aço inox austenítico (SUS304), os resultados indicaram que esta sequência possui não somente influência significativa no gradiente de tensões residuais como o último passe possui gradiente mais significativo ao final (DENG, 2013).

Finalmente, nenhuma classe de fatores é mais estudada que os parâmetros primários da soldagem ao arco elétrico (tensão U , corrente I e velocidade de soldagem v_s), a interação entre estes parâmetros gera a energia (equação 2.3) necessária para abertura do arco, produzindo os ciclos térmicos e os picos de temperatura que geram as tensões térmicas e são a força motriz das transformações de fases durante o resfriamento da poça de fusão. Desta energia do arco apenas parte dela participa efetivamente da fusão que gera o metal de solda. Assim, qualquer mudança nos parâmetros primários mudará as configurações de formação das tensões residuais. Ou seja, um efeito muito provável, é quando a velocidade de soldagem aumenta, o calor fornecido decresce e as tensões residuais aumentam por produzir uma isoterma mais estreita (TENG e LIN, 1998 e GERY, LONG e MAROPOULOS, 2005). Além disso, o aumento da energia de soldagem é diretamente proporcional ao acréscimo das tensões residuais presentes na junta soldada, provocando também a largura do pico destas tensões trativas (COLEGROVE, et al. 2009; FRANCIS et al. 2009 e SCHROEPFER, KROMM e KANNENGIESSER, 2017). De outra forma, a energia de soldagem é tão importante por controlar a temperatura de transformação de fases da poça de fusão que é possível combinar a microestrutura com a resistência e a tenacidade aceitáveis com baixas tensões residuais trativas ou mesmo compressivas. Estas transformações são regidas quase que totalmente pela transformação austenítica no caso das ligas ferrosas (WITHERS e BHADESHIA, 2001; NITSCHKE-PAGEL e DILGER, 2014).

2.4 Técnicas de medição de tensões residuais

Uma vez que as tensões residuais muitas vezes desempenham um papel no comportamento do material, conhecer seu estado é essencial na previsão do desempenho de muitos componentes de engenharia. Logo, como acontece com outras formas de "medição" de tensão, na realidade, o que realmente é medido é a variação de tensão, deslocamento ou comprimento (HASHMI, 2014). Métodos de medição tais como

difração e espectroscopia requerem uma amostra de referência ou estado para comparação, calibração e/ou normalização. Métodos de medição como furo cego mede a resposta de relaxamento da amostra após uma parte dela ter sido removida ou seccionada. Em ambas as categorias, uma variação de comprimento ou diferença é medida e normalizada para tensão. A tensão residual é então determinada ou calculada dessa forma. O sucesso de qualquer método de medição de tensão residual escolhido depende da composição, tamanho, ligação/cristalinidade e/ou da sua capacidade de ser alterada (isto é, cortada, seccionada, polida, reduzida etc.). Cada técnica possui vantagens e desvantagens e se adequa a análise de medição. Porém a classificação mais utilizada refere-se ao tipo de método dividido em destrutivo e não destrutivo. Entretanto ROSSINI et al. (2012) acrescenta a lacuna dos métodos semi-destrutivos, como pode ser visto na Figura 2.12.

Segundo ROSSINI et al. (2012), os métodos não destrutivos para medição de tensões ganharam atenção dos usuários, não apenas por deixar o material intacto, mas também por causa da mobilidade do equipamento e rapidez de medição. Como justificam MISHCHENKO et al. (2018) dentre essas técnicas, a medição de tensões residuais por difração de raios X (DRX) está sendo bastante utilizada, tanto em pesquisa como no meio industrial. Entretanto, ainda não há procedimentos bem fundamentados para sua aplicação, especialmente quando se trata de preparação da peça para medição. Assim, o trabalho se resume ao uso de duas técnicas não destrutivas bastante utilizadas em laboratório e campo industrial.

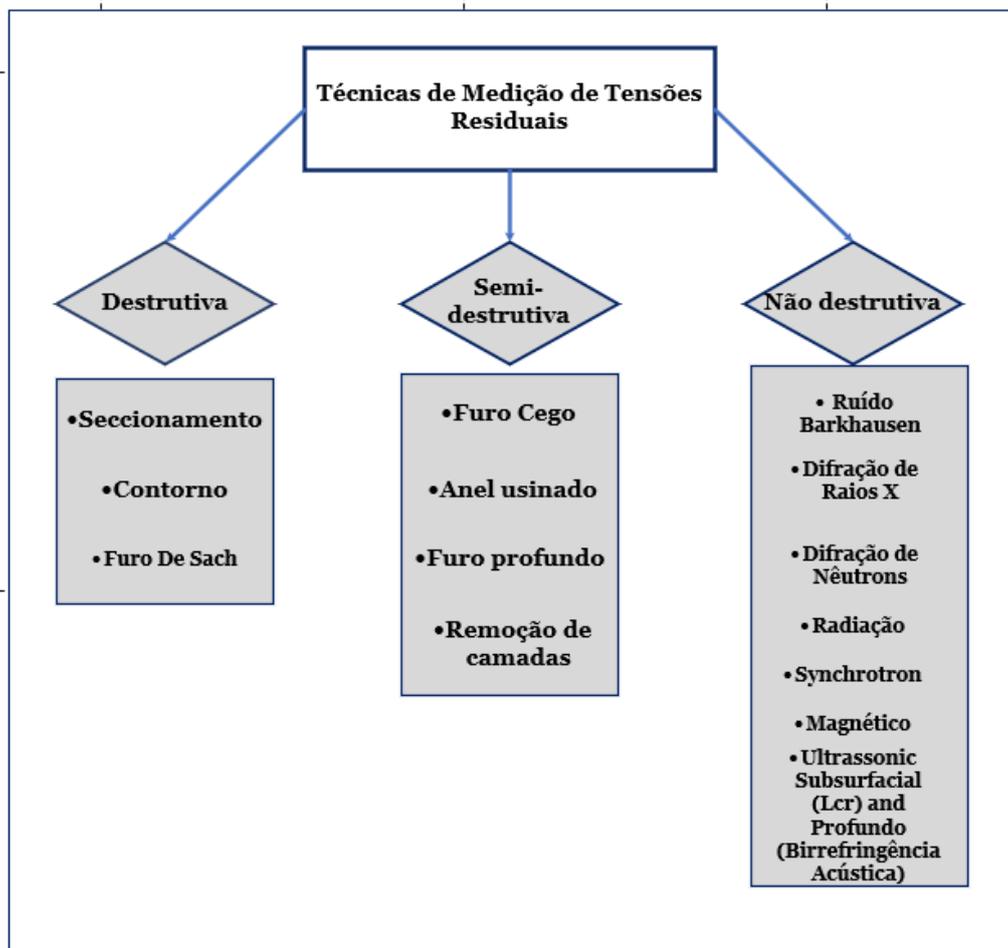


Figura 2.12- Fluxograma das técnicas de medição de tensões residuais. Fonte: Adaptada de Rossini et al. 2012.

Portanto, SHARPE (2008) resume bem a principal demanda e a necessidade de medição das tensões residuais: novos problemas industriais, novas complexidades geométricas e materiais relacionadas a eles, combinados com uma necessidade geral de medições de tensão residual rápidas e econômicas, criam uma forte demanda por técnicas e dispositivos novos e eficazes.

2.4.1 Difração de Raios X (DRX)

A técnica de DRX exige uma preparação especial da superfície da peça para que os resultados de medição não estejam mascarados por tensões devido aos processos prévios de fabricação. CULLITY (1956) determina rugosidade e tensões residuais devido a processos prévios de fabricação como dois principais parâmetros da superfície da peça

que podem afetar a qualidade de medição. LI et al. (1995) avaliaram o efeito da rugosidade da superfície de uma peça de aço inoxidável sobre os resultados da medição das tensões residuais por difração de raio X. Segundo seus resultados, há pouca influência da rugosidade sobre os resultados de medição quando o valor da rugosidade Ra não supera a profundidade da penetração do raio X.

Alguns autores afirmam que uma rugosidade superior a 10 μm interfere nos resultados de medição, dependendo da potência dos raios X utilizados. OTT e LOHE (2003) e FITZPATRICK et al. (2005) estudaram o efeito de rugosidade da superfície sobre o deslocamento do pico de Bragg, que é diretamente relacionado com o resultado de medição das tensões residuais. Foi observado que quanto maior o grau de rugosidade da peça, maior o deslocamento do pico e, por consequência, maior erro de medição.

Segundo MISHCHENKO, DE OLIVEIRA e SCOTTI (2016) percebe-se uma falta de procedimento padrão ou confiável para preparação da superfície. Não foram encontradas recomendações sistemáticas para remoção de camada superficial, como, por exemplo, a solução eletrolítica, parâmetros de remoção e dados da influência da espessura removida sobre a medição. Entretanto, antes de se estudar o efeito da espessura removida sobre a qualidade da medição, é necessário se desenvolver um método de remoção que seja rápido, seguro e econômico. Dessa forma, a relação corrente-voltagem é a principal variável do eletropolimento e varia de acordo com o eletrólito utilizado e o metal. A amostra metálica atua como o anodo da célula eletrolítica, e a superfície é polida pela solução anódica quando a combinação correta de voltagem, densidade de corrente, temperatura do banho e tempo é aplicada (COFIÑO, 2010). A Figura 2.13, representa esquematicamente o acabamento superficial como efeito do eletropolimento.

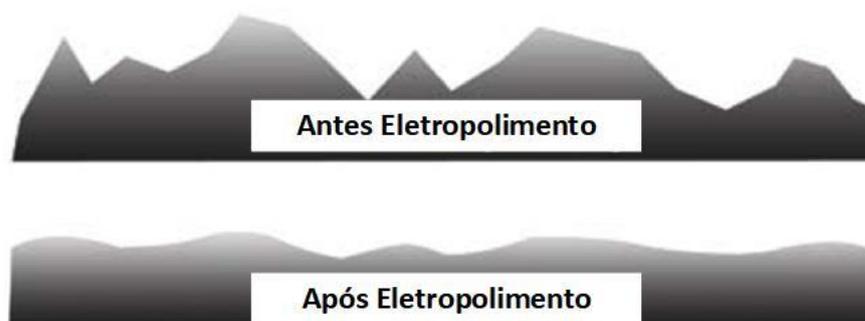


Figura 2.13 – Ação do eletropolimento em uma superfície metálica. Adaptado do Site: ablelectropolishing.com

De acordo com WITHERS et al. (2008), os métodos não destrutivos têm o potencial de monitorar a evolução da tensão residual por meio de processamento, vida útil e reparo, seja em planta ou peças de teste. Dessa forma, a difração talvez seja a técnica mais importante para determinar a tensão residual em materiais cristalinos e componentes de engenharia (WITHERS, 2007). Logo, a difração de raios X pode ser usada para obter tensões macro e micro residual em materiais dúcteis (ROSSINI et al. 2012).

O princípio básico de utilização da DRX na medição de tensões residuais, conforme mostra a Figura 2.14, consiste na difração de um feixe monocromático de raio X, com um ângulo elevado de difração (2θ) a partir da superfície de uma amostra tensionada para duas orientações da amostra em relação ao feixe de raio X. O ângulo ψ , 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).

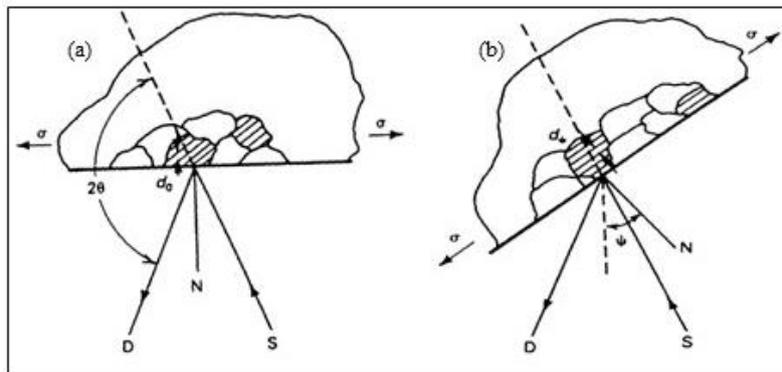


Figura 2.14 - Princípios de medição de tensão por difração de raio X. (a): $\psi = 0$. (b) $\psi \neq 0$ (amostra rotacionada através de algum ângulo ψ conhecido). D, detector de raio X; S, fonte de raio X; N, normal à superfície. Fonte:(PREVÉY, 1986).

O uso de métodos de difração é de grande importância na análise de sólidos cristalinos. Não só podem revelar as principais características da estrutura, isto é, o parâmetro de rede e o tipo de estrutura, mas também outros detalhes tais como a disposição de tipos diferentes de átomos em cristais, a presença de imperfeições, a orientação, subgrão e tamanho de grão, tamanho e densidade de precipitados. A difração

ocorre para o ângulo 2θ definido pela Lei de Bragg mostrada na Equação 2.4. 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 2θ (PREVÉY, 1986).

$$2d \cdot \text{sen}\theta = n \lambda \quad \text{Equação 2.4}$$

Na equação 2.4, λ 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); θ 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.

Na medição de tensão residual usando difração de raios X (XRD), a tensão na rede cristalina é medida e a tensão residual associada é determinada a partir das constantes elásticas assumindo uma distorção elástica linear do plano de rede cristalina apropriado. Para WITHERS (2007) a difração funciona como se fosse um strainage atômico. Uma vez que os raios X incidem sobre uma área da amostra, muitos grãos e cristais contribuirão para a medição (Figura 2.15). O número exato depende do tamanho do grão e da geometria do feixe. Embora a medição seja considerada próxima da superfície, os raios-X penetram alguma distância no material: a profundidade de penetração depende do ânodo, do material e do ângulo de incidência. Assim, a deformação medida é essencialmente a média de alguns microns de profundidade sob a superfície da amostra.

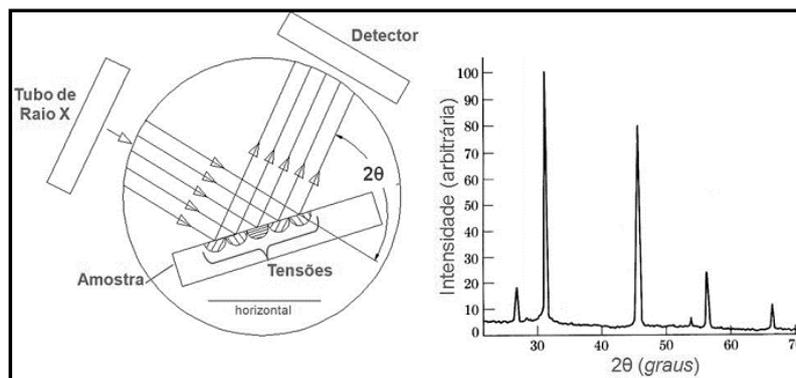


Figura 2.15 - Varredura da superfície da amostra. Fonte: SOUSA (2012).

Para a medição de tensões residuais através de DRX, existem três técnicas básicas (PREVÉY, 1986; TOTTEN, 2002). Técnicas, de dupla exposição, simples exposição e de múltiplas exposições ou $\sin^2\psi$. 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 $\sin^2\psi$, é uma das mais clássicas (MACHERAUCH e MULLER, 1961). Esta técnica e sua história de desenvolvimento são descritas em CULLITY (1956); HAUK (1997) e NOYAN e COHEN (2013).

Baseado na lei de Bragg, em que uma radiação de comprimento de onda λ é difratada em ângulos θ quando o espaçamento interplanar é d e assumindo um estado plano de tensões, onde somente as tensões principais σ_1 e σ_2 são diferentes de zero e $\sigma_3 = 0$ haverá uma deformação nesta direção de tensão principal, devido à razão de Poisson e devido a ação de σ_1 e σ_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 2.5 (CULLITY, 1956).

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} \sin^2\psi \right] - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{hkl} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad \text{Equação 2.5}$$

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, ϕ denota o ângulo entre um dos eixos das tensões principais e a projeção da direção da tensão medida na superfície da amostra; ψ representa o ângulo entre a direção da tensão medida e um vetor normal à superfície da amostra; σ_{ϕ} é a tensão correspondente no plano para $\psi = 90^\circ$ (WITHERS, 2007). Um esquema da configuração desses ângulos pode ser visto na Figura 2.16 (RAJ *et al.*, 2009).

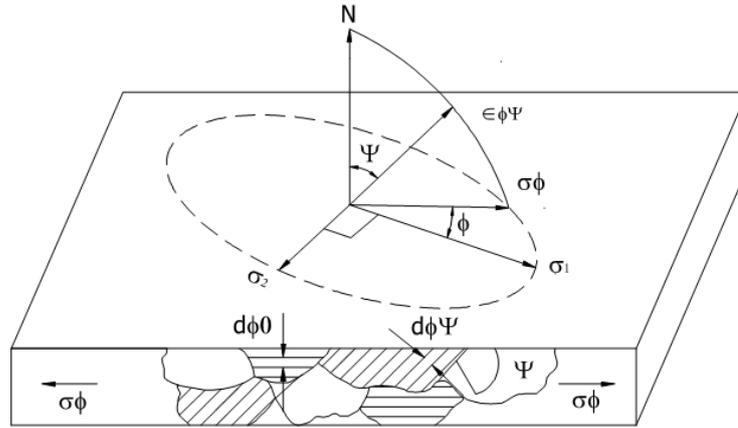


Figura 2.16 - Definição da direção da inclinação de ψ e da direção da medição de tensões, ϕ , usando o modelo plano de tensões elásticas. Fonte: RAJ *et al.*, (2009).

Reorganizando a Equação 2.5, o espaçamento de rede pode ser dado pela Equação 2.6.

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \right] \sin^2 \psi - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{hkl} d_0 (\sigma_1 + \sigma_2) + d_0 \right] \quad \text{Equação 2.6}$$

A equação 2.6 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 σ_{ϕ} , portanto, dando a tensão no plano para o ponto, conforme mostra a Equação 2.7.

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_0} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \right) \quad \text{Equação 2.7}$$

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 2.17.

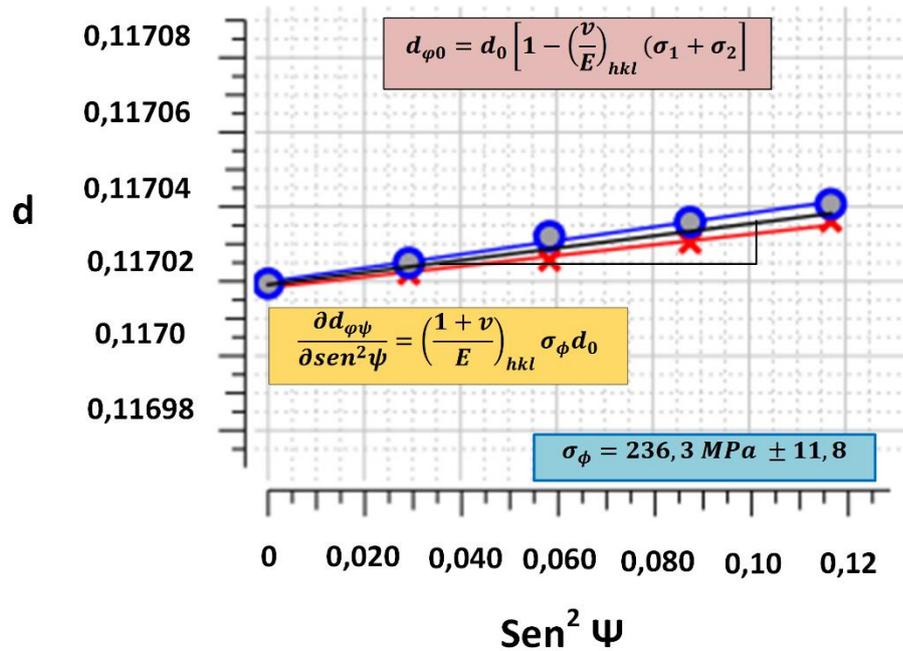


Figura 2.17 - Gráfico de $d(211)$ versus $\text{sen}^2\psi$ para aço ferrítico. Considerando 2 detectores. Fonte: Autor

O método descrito é conhecido como a metodologia $\text{sin}^2\psi$, muito utilizado e originalmente introduzido por LESTER e ABORN (1925). Essa metodologia apresenta uma grande vantagem de não requerer necessariamente o valor de d_0 , 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_0 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 ± 20 MPa, com uma profundidade de penetração na ordem de microns sob a superfície da amostra (WITHERS e BHADSHIA, 2001; WITHERS, 2007). A Figura 2.18 representa o princípio de funcionamento de um equipamento que usa o método $\text{sin}^2\psi$, exemplificando o uso de medições em engrenagens.

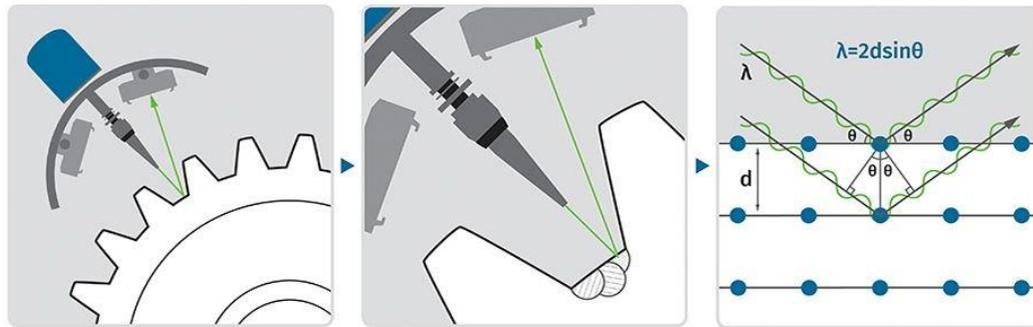


Figura 2.18 - Princípio de funcionamento de um equipamento que usa o método $\sin^2\psi$, exemplificando o uso de medições em engrenagens. Fonte: Stresstech Group

Atualmente, o grande avanço da área de difração de raios X possibilitou o desenvolvimento de equipamentos portáteis de boa resolução e precisão de medição possibilitando o uso destes na área industrial para uma maior quantidade de materiais (LEE et al. 2017). Apesar da sua desvantagem da profundidade de medição, muitos pesquisadores têm utilizado a difração de raios X para medir tensões residuais em componentes soldados, devido a técnica ser não destrutiva e apresentar valores confiáveis. Dessa forma, CHUVAS, CASTELLO e CINDRA (2016) comprovaram o alívio de tensões residuais por vibrações em soldas PAW (Plasm Arc Welding) utilizando difratômetro de raios X portátil. Assim como, PAMNANI et al. (2015) e COSTA et al. (2017) verificaram a diferença de tensões residuais em soldas comparando os valores medidos por DRX e por diferentes técnicas de ultrassom, como L_{cr} e birrefringência, respectivamente.

2.4.2 Técnicas Ultrassom por Birrefringência Acústica (BA)

Primeiramente, a medição de tensões residuais por ultrassom funciona basicamente como um método indireto, onde a tensão é medida pela indução de uma onda sonora na frequência de vários mega-hertz (MHz) na amostra de metal e pela medição do tempo de voo ou de algum outro parâmetro relacionado à velocidade. Assim, a presença de tensão dentro de um material altera levemente a velocidade das ondas acústicas que viajam através do material. Isso é chamado de efeito acústico-elástico ou acustoelástico. Logo, a medição precisa da velocidade da onda acústica pode fornecer uma avaliação das

tensões presentes. Tais medições geralmente são feitas usando ondas ultrassônicas e fornecem um método prático para avaliar tensões residuais (SCHAJER, 2013).

O efeito acustoelástico ajudou a verificar que a velocidade de ondas ultrassônicas ao passar no interior de um sólido elástico tensionado, não era constante como num sólido isotrópico. Logo, notou-se que esta variação da velocidade da onda ultrassônica dependia do estado de tensão do material, da direção de propagação da onda ultrassônica em relação aos planos cristalinos e da direção da movimentação das partículas do meio pela passagem da onda (SZELAZEK, 1992; NIKITINA e OSTROVSKY, 1998). Por outro lado, a fenomenologia do efeito acustoelástico é melhor descrita através da relação atômica dos materiais a nível microscópico, considerando que a resposta elástica macroscópica dos sólidos é determinada pela média das forças interatômicas (LU, 1996). Quando um material não está tensionado, os átomos do material permanecem em posição de equilíbrio correspondendo a energia atômica mínima e força interatômica zero. Entretanto, 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.

Uma demonstração prática do que foi descrito acima, corresponde a Figura 2.19, onde considerou-se a amostra de um material na forma cúbica sob a ação de um carregamento trativo e uniaxial na direção longitudinal do corpo, onde foram incididas ondas propagadas nas três direções perpendiculares, conforme os trabalhos de BRAY e STANLEY (1997), HUGHES e KELLY, (1953).

Na Figura 2.19, a descrição dos índices corresponde: o primeiro índice relacionado à velocidade representa a direção de propagação da onda e o segundo índice está relacionado com a direção de movimento das partículas. Na Figura 2.19a, 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 2.20b e 2.2c as ondas se propagam em direções ortogonais em relação às tensões atuantes. Conforme CARVAJAL et al. (2017), em geral, a velocidade ultrassônica decresce assim que a deformação plástica ocorre.

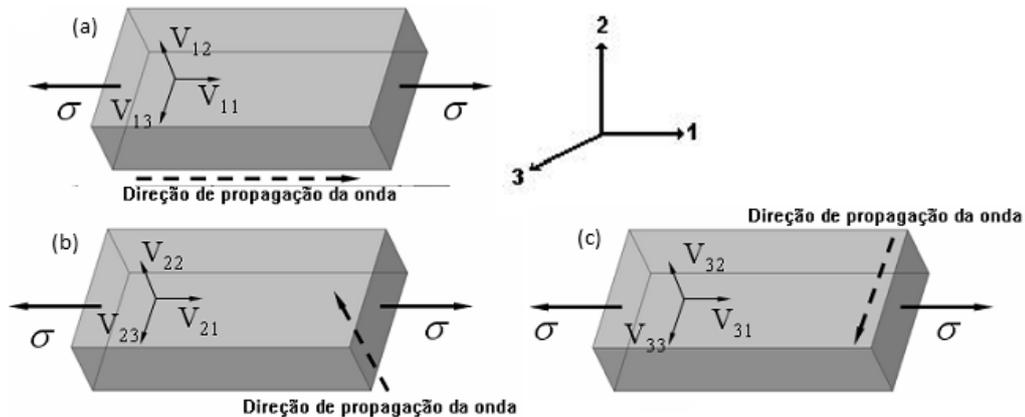


Figura 2.19 - Representação da propagação de ondas acústicas em materiais tracionados e suas direções. (a) No mesmo sentido da força aplicada. (b) e (c) No sentido ortogonal da força. Fonte: Adaptado de BRAY e STANLEY, (1997).

Assim, surge a possibilidade de avaliar o estado de tensões da região percorrida pela onda ultrassônica medindo a sua velocidade de propagação. Isto se deve ao estudo analítico de que quando uma onda ultrassônica se move numa determinada direção através de um meio elástico, a sua velocidade de propagação depende, essencialmente, das constantes elásticas de segunda ordem do meio (conhecidas como constantes de LAMÉ) e, também, da sua simetria estrutural. Logo, a presença de um estado de tensões elásticas produz pequenas mudanças nesta velocidade de propagação (fenômeno conhecido como efeito acustoelástico), sendo que, agora, a velocidade de propagação da onda ultrassônica depende também das constantes elásticas de terceira ordem (conhecidas como constante de MURNAGHAN). Não serão mostradas neste trabalho a dedução das equações que originaram a teoria ultrassônica aplicada a medição das tensões residuais, uma vez que os trabalhos de HUGHES E KELLY (1953); IWASHIMIZU e KUOBOMURA (1973) e THOMPSON, LU E CLARK (1996) demonstrando todas estas análises.

Considerando-se a técnica da birrefringência acústica, a propagação da onda cisalhante dá-se 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. Assim, ALLEN e SAYERS (1984) consideraram a aplicação da onda ultrassônica cisalhante para a medida da tensão volumétrica 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.

Portanto, abreviando as considerações matemáticas citadas, a birrefringência pode ser determinada de acordo com a equação ZZ, através da 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, conforme os trabalhos de SCHNEIDER, HOLLER e GROEBBELS (1985); BITTENCOURT (2000), ORTEGA (2011), COSTA (2017), JAVADI et al. (2017), KUMDU (2018) e ALBUQUERQUE (2019). A equação 2.8 é utilizada para determinar o nível de tensão em um material, após um processo de fabricação de um componente, por exemplo.

$$B = B_0 + k(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde B é a birrefringência, B_0 é a birrefringência inicial (induzida pela textura e sem carga), k é um parâmetro do material (constante acústica de tensão) relacionada à constante acustoelástica, σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{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 à direção de laminação do material, respectivamente. Porém é válido lembrar que, a birrefringência atua no estado plano de tensões, ou seja, a tensão cisalhante é condicionada a zero ($\sigma_{xy} = 0$), o que significa que as direções das tensões principais coincidem com as direções de simetria ortotrópica do material.

Para MATOS et al. (2005), a vantagem técnica da birrefringência acústica é que ela não é influenciada nem pela temperatura nem pela espessura do meio, uma vez, que para obter as tensões é necessário conhecer somente a diferença entre as velocidades de propagação (ou o tempo de propagação) de duas ondas cisalhantes polarizadas em duas direções perpendiculares entre si, conforme Figura 2.20, onde os ângulos θ e φ são ortogonais às direções de propagação da onda e σ_1 e σ_2 , são as tensões principais. Logo, como essas velocidades de propagação das ondas ultrassônicas são medidas no mesmo ponto da peça e, praticamente, ao mesmo tempo, elas são influenciadas da mesma forma pela temperatura e/ou espessura. Entretanto, observam-se que a anisotropia resultante dos efeitos de textura e tensão divide a onda de cisalhamento em dois componentes polarizados ortogonalmente de diferentes velocidades. O que, devido à anisotropia da

textura, as velocidades das ondas de cisalhamento nem sempre são proporcionais às tensões (HIRAO e OGI, 2017).

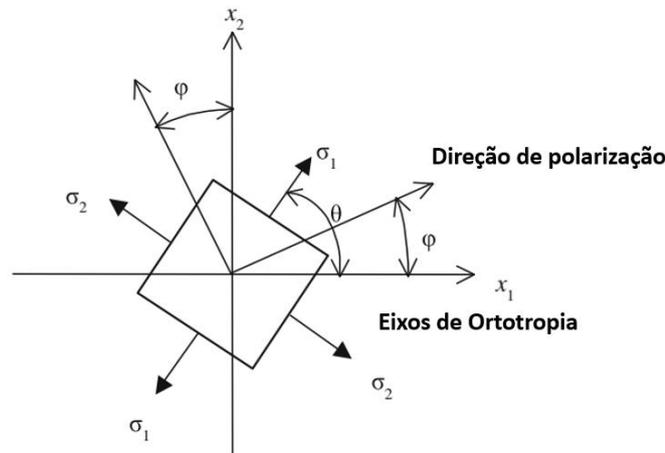


Figura 2.20 - Sistema de coordenadas bidimensionais alinhado ao longo dos eixos da anisotropia de textura ortotrópica com as direções de tensão principais e a polarização das ondas cisalhantes. Fonte: HIRAO e OGI (2017).

Vale ainda ressaltar que variações microestruturais pontuais, como as que ocorrem em grãos, interfaces, segundas fases, precipitados, interstícios, lacunas e discordâncias alteram as constantes elásticas de terceira ordem, o que, sendo assim, modificaram as constantes acustoelásticas, influenciando a velocidade de propagação da onda ultrassônica na mesma magnitude que as tensões. No caso da utilização de ondas cisalhantes de incidência normal, isto se traduz na existência de birrefringência acústica (B_0) associada a leves diferenças nos módulos de cisalhamento nas direções mutuamente perpendiculares. LINDGREN, JONES e BERGER (1994) e CARVAJAL et al. (2017) observaram também que a anisotropia do material era possível verificar relacionando o coeficiente de Poisson com as deformações no material com e sem tratamento térmico no aço A36, utilizando medições por birrefringência.

Por outro lado, COSTA (2017) ressalta que é importante explicar que a determinação de tensões através da Equação 2.8 pode ser usada em materiais isotrópicos e anisotrópicos. Onde, para os materiais anisotrópicos, ou seja, materiais policristalinos, que apresentam variadas formas de grãos, tomam uma determinada orientação preferencial, característico de materiais fabricados pelo processo de laminação gerando a anisotropia do metal. Assim, 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 estudadas neste trabalho. Portanto, é necessário conhecer a direção de polarização do transdutor ultrassônico e estabelecer a direção de laminação do material analisado.

2.5 Medição de distorções e tensões residuais em painéis navais

Já está bem estabelecido neste trabalho que o estado das tensões residuais representa um fator de grande importância na determinação da capacidade de carga e vida útil da construção, não apenas para a indústria naval, mas para todo o setor produtivo, principalmente onde são utilizados os processos que utilizam fonte de calor intensa, como é o caso da soldagem. Esta informação, obtida ainda durante as etapas de fabricação, permite corrigir possíveis falhas durante a execução do projeto, facilitando o posterior controle da integridade contribuindo para o planejamento de programas de manutenção.

De outro modo, PAIK, THAYAMBALLI e LEE (2004); PODDER, DAS e MANDAL (2019) ressaltam que a magnitude e o formato de cada tipo de distorção inicial desempenham papéis importantes no comportamento de colapso da flambagem e, portanto, é necessário um melhor entendimento das configurações reais de imperfeição nas estruturas desejadas. Além disso, na etapa final de projeto muitas vezes existe a necessidade de soldas de reparo que também se enquadra no mesmo aspecto anteriormente exposto e que na maioria das vezes são ignorados no projeto de construção. Segundo GUROVA, QUARANTA e ESTEFEN (2006), esta situação possui relação direta com a ausência das técnicas e equipamentos para medição das tensões residuais *in situ*, além da falta de experiência prática em análise experimental destas tensões nos parques navais do país. Indicando assim que, a construção naval e offshore, representam algumas das áreas onde tal monitoramento deve ser realizado preferencialmente por métodos não destrutivos. Entre os poucos trabalhos, destacam-se RODRIGUES et al. (2019) e YANG et al. (2019) que estudaram a aplicação de um equipamento portátil de

difração de raios X para medição de tensões residuais em ambiente de estaleiro, mostrando a possibilidade de medir com difração de raios X em painéis navais.

Entretanto, antes de adentrar propriamente nas pesquisas que envolvem medições de tensões residuais em painéis, atualmente através do uso da simulação é possível prever o perfil de tensões apenas com o uso de programas computacionais que ainda estão sendo aprimorados, pois necessitam de muitas aproximações para funcionar próximo das condições reais. No entanto, PAIK (2018) prevê, para propósitos práticos, as distribuições idealizadas de tensão residual de soldagem de uma placa entre os elementos enrijecedores para os quais a soldagem foi realizada ao longo de todas as quatro bordas. Indicando gráficos compostos por blocos de tração e compressão, como os mostrados na Figura 2.21.

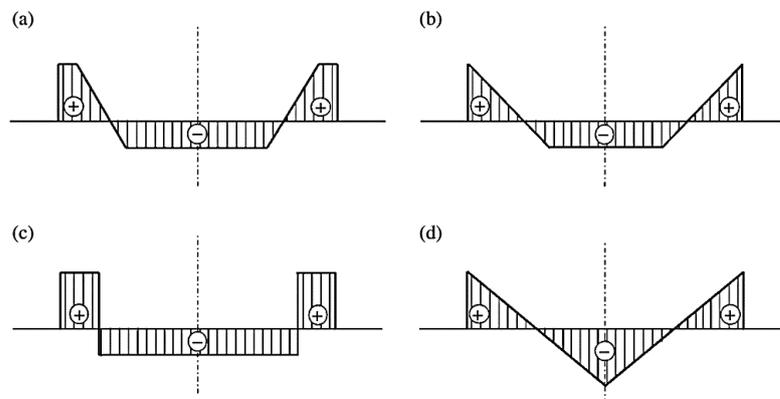


Figura 2.21 – Perfis das tensões residuais de soldagem em painel enrijecido. Fonte PAIK (2018)

CAPÍTULO III

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Planejamento

A descrição deste planejamento, tem como objetivo mostrar de forma sistematizada as etapas e tarefas realizadas para conclusão do trabalho. A ideia do percurso de execução da tese proposta obedece uma linha geral de produção da amostra que é o painel soldado. As etapas de medição e caracterização se repetem de maneira sistêmica conforme as normas utilizadas. Justificando a separação em Etapas 01 e 02, isto acontece para dar continuidade e fundamentação ao trabalho. Uma vez que a Etapa 01 vai ajudar na escolha da melhor sequência para executar a Etapa 02, assim o trabalho pode ser dividido em:

- a) Etapa 01 - A soldagem FCAW robotizada para escolha de uma sequência otimizada, medição e caracterização
- b) Etapa 02 - A soldagem dos painéis com a soldagem CW-FCAW, medição e caracterização.

Simplificando, após a obtenção dos painéis soldados as tarefas se repetem, os fluxogramas a seguir mostram o percurso de execução do trabalho, conforme Figura 3.1 e Figura 3.2. Na etapa 01 (Figura 3.1), há de se atentar para a seleção de 03 sequências, sendo a primeira baseada conforme as praticadas em um estaleiro da região. As outras duas, segunda e terceira sequências, se basearam em movimentos balanceados e distribuídos para facilitar a distribuição do calor na peça, uma vez que parte-se desta premissa para encontrar as melhores sequências definindo como critério menores distorções e tensões residuais, conforme alguns trabalhos já publicados, como FU et al. (2016), CHEN e GUEDES SOARES (2016) e SIRISATIEN, MAHABUNPHACHAI e SOJIPHAN (2018).

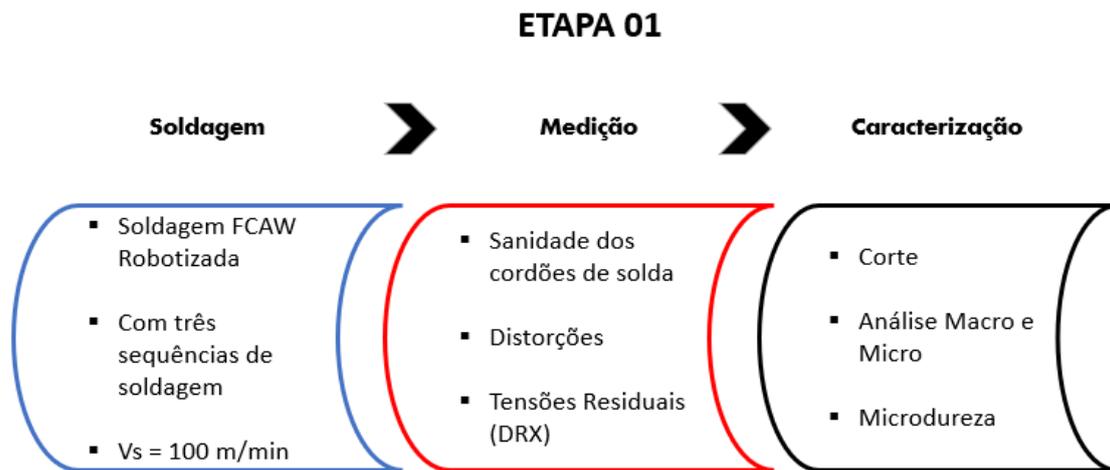


Figura 3.1 - Fluxograma da etapa 01: Seleção da melhor sequência de soldagem. Fonte: Autor

Para a Etapa 02 (Figura 3.2), ressalta-se que foi utilizada apenas a melhor sequência soldada da etapa anterior, porém como a técnica de soldagem era diferente, a soldagem CW-FCAW foi realizada utilizando um único percentual de arame frio de 40% (por ser o melhor parâmetro já testado e verificado em laboratório) com duas velocidades de soldagem distintas, 100 m/min e 120 m/min. Uma outra modificação aparente entre as Etapas 1 e 2 foi o modo de soldagem, na Etapa 1, sendo robotizado, enquanto que, na Etapa 2, mecanizado, esta diferença justifica-se por duas razões: a primeira pela disposição do robô que não permite inserir um sistema de alimentação extra necessário para inserção do arame frio e a segunda, pelo processo CW-FCAW ter sido somente testado e calibrado em sistema mecanizado, a troca do modo tornaria a soldagem trabalhosa e dispendiosa de tempo naquele momento, já que o foco não é comparar modos de soldagem, já que isto, é muito bem utilizado e aprimorado pelas grandes empresas fabricantes de máquinas e sistemas de soldagem. Ou seja, o principal objetivo é observar se o processo CW-FCAW gera menos distorções e tensões residuais em painéis navais comparado a um processo convencional aplicado com robô, levando em consideração uma elevada velocidade de soldagem.

Ressalto ainda que, por razões de quebra de equipamento, foram utilizados dois métodos de medição de tensões residuais, na Etapa 01 foi utilizado o método por difração de raios X, enquanto, para Etapa 02 as tensões residuais foram medidas por birrefringência acústica que utiliza princípios do Ultrassom. Apesar da resolução espacial

e profundidade de medição serem diferentes, ambos os métodos são bem mais consolidados, não destrutivos e geram menores erros de medição quando comparados a outros métodos, como o furo cego que possui todos estes quesitos negativos.

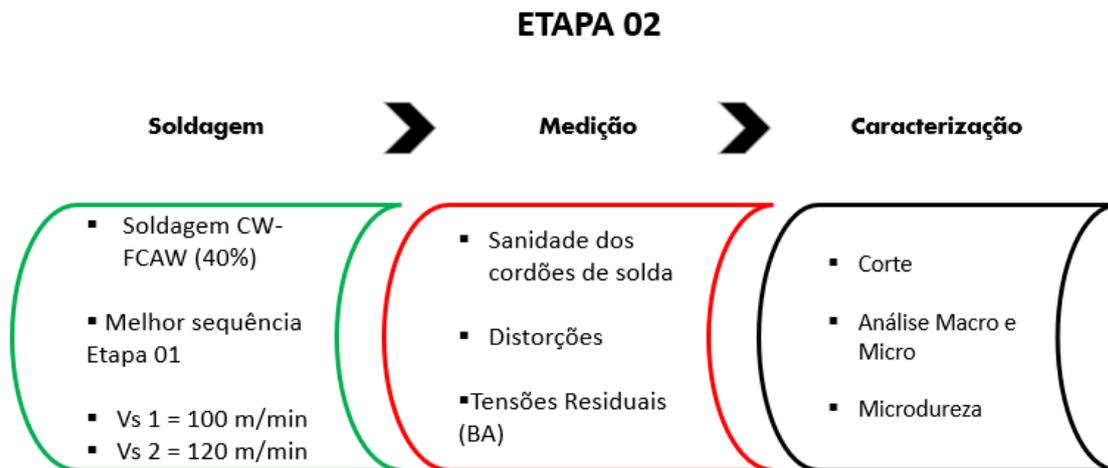


Figura 3.2 – Fluxograma da Etapa 02: soldagem dos painéis com CW-FCAW. Fonte Autor

3.2 Painéis Enrijecidos

Todos os painéis foram fabricados com os mesmos materiais independentemente da etapa realizada. As placas com dimensões de 1200 mm (largura) por 800 mm (comprimento) e espessura de 3/8” (9,5 mm) (Figura 3.3a). Os materiais utilizados e as dimensões do painel correspondem a escala de 10% de um de tamanho original aplicado à construção de barcaças, embarcações típicas da região amazônica. Para as cantoneiras com perfil L estão dispostas na Figura 3.3b, de comprimento 800 mm de abas iguais de 3 polegadas (76,2 mm) com espessura de 1/4 polegada (6,35 mm). Ao todo, cada painel possui 04 cantoneiras a uma distância de 240 mm entre elas.

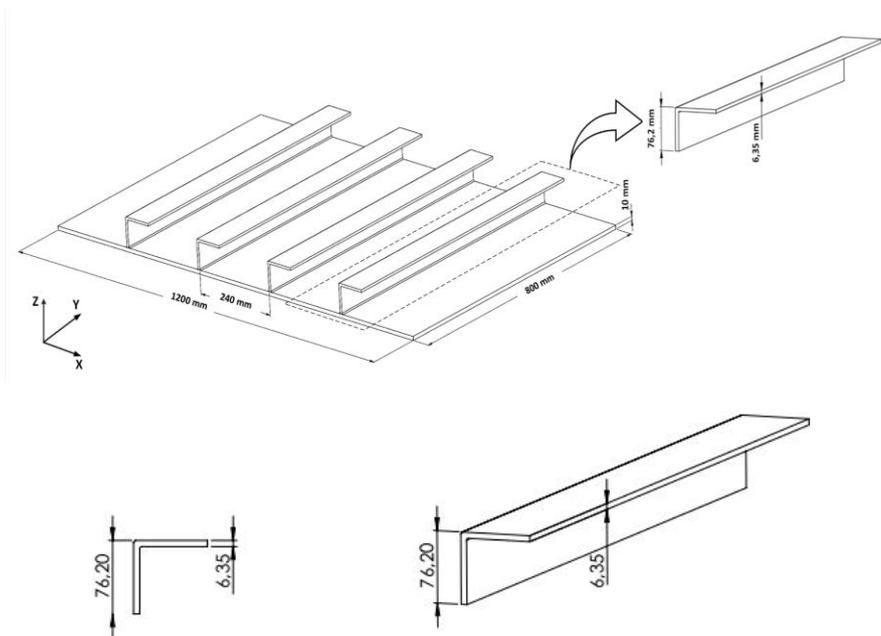


Figura 3.3 – (a) Corpo de prova na forma de painel através da junção chapa e (b) Cantoneira com perfil L pronta para soldagem dos enrijecedores. Fonte: Autor

O material de base escolhido foi o aço estrutural de resistência comum, normatizado pela ASTM A-131/A131M, específico para a construção naval. Na Tabela 3.1 é mostrado a composição dada pela norma e a medição da composição química utilizando espectroscopia por emissão ótica. Vale ressaltar que esta composição é dada como uma média de pontos de queimas realizados na amostra, ao todo foram realizados 5 pontos de queima.

Tabela 3.1 – Composição Química do aço naval estrutural

Amostra	Fe	C	Mn	Si	Al	Ni	Cr	P	S
Amostra	98,6	0,11	0,892	0,196	0,0388	0,0125	0,014	0,0147	0,0063
Norma ASTM A131 grau E	Balanço	≤0,18	0,7	0,10-0,35 ^a	≤0,015	≤0,02		0,035 máx	

a: Quando o teor de alumínio solúvel em ácido não for inferior a 0,015%, o teor mínimo de silício exigido não se aplica

Fonte: Autor

Quanto a composição química da cantoneira, esta é muito similar a do material da placa. Entretanto, a fim de confirmar o grau do material da placa foi realizado o ensaio de tração, onde os resultados estão na Tabela 3.2. Conforme os dados da norma fica claro a definição do material como o aço estrutural comum ASTM A131 grau E.

Tabela 3.2 – Dados de propriedades mecânicas do ensaio de tração

AMOSTRA	LE (MPa)	LRT (MPa)	ALONGAMENTO (%)*
1	335,32	520,66	18,44
2	326,62	508,57	19,41
3	364,83	533,42	20,44
MÉDIA	342,26	520,88	19,43
DESVIO PADRÃO	20,03	12,42	1,00
COEFICIENTE DE VARIÇÃO	5,82%	2,38%	5,15%
Norma ASTM A131/A131M - 19.	315	440 - 590	19

Fonte: Autor; ASTM A131/A131M, (19). *Para espessura ou diâmetro abaixo de 8 mm

3.3 Soldagem dos painéis

A soldagem dos painéis se deu de duas maneiras, por razão das etapas que compõe o trabalho. Assim tem-se a soldagem com o (1) FCAW robotizada e o outro (2) CW-FCAW para o estudo comparativo entre ambos.

3.3.1 Etapa 01: Soldagem FCAW robotizada

A célula de trabalho robotizada, pode ser visualizada na Figura 3.4. Onde cada item está devidamente identificado na sua posição funcional. A célula de soldagem robotizada montada em laboratório reuniu equipamentos de diversas empresas como: Kuka Roboter, Lincoln e TBI, tais empresas não possuíam interfaces industriais consolidadas entre seus equipamentos, sendo esta célula também o primeiro protótipo de integração industrial destas marcas no Brasil.

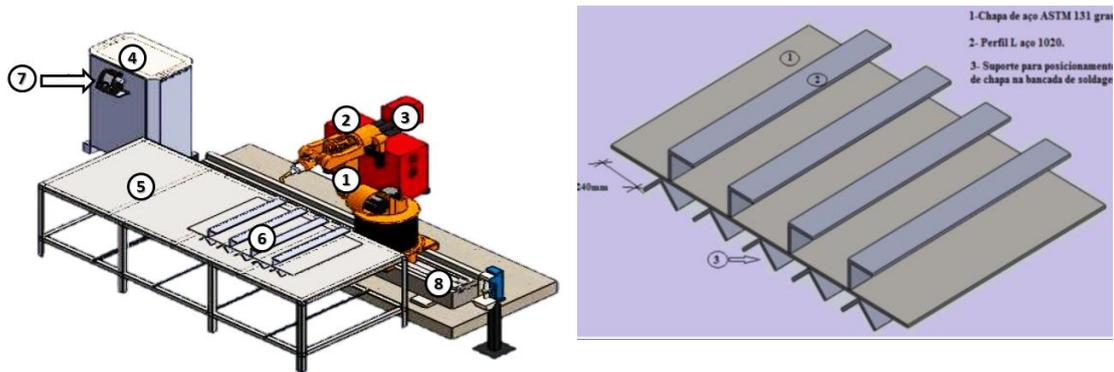


Figura 3.4 – a) Célula de trabalho para soldagem dos painéis. Onde: 1) braço robótico; 2) fonte de soldagem; 3) alimentador de arame; 4) painel de controle do robô; 5) mesa de soldagem; 6) painel; 7) unidade de controle e programação do robô; 8) unidade de deslocamento linear. b) Painel padrão com detalhes para os componentes: 1) chapa; 2) cantoneira (perfil L) e 3) suporte para posicionamento da chapa na bancada de soldagem. Fonte: Adaptado de FREITAS (2015)

Um suporte para posicionamento da chapa foi fabricado para garantir que as chapas ficassem sempre posicionadas no mesmo local para não haver problemas quanto a execução do programa, além disto, o suporte também foi projetado de tal forma que o corpo de prova não pudesse realizar a troca de calor de forma rápida com a mesa da bancada, e que a chapa não tivesse restrições de movimento. Os parâmetros de soldagem selecionados para este trabalho (Tabela 3.4), foram obtidos após ensaios preliminares, os parâmetros foram sendo alterados até que fosse obtido um cordão de solda que através de inspeção visual não apresentasse descontinuidade. Outro fator importante para a escolha dos parâmetros de soldagem, foi utilizar parâmetros que estivessem no limite de ranger dos equipamentos e que obtivessem um cordão de solda satisfatório.

Tabela 3.3 – Parâmetros de soldagem FCAW robotizado. Fonte: Autor

Tensão de soldagem	34 V
Velocidade de alimentação de arame	19 m/min
Corrente de soldagem	350 A
Vazão de gás	20 L/min
Ângulo de ataque	0°
Ângulo de trabalho	45°
DBCP	20 mm
Velocidade de soldagem	16,7 mm/s (100 cm/min)
Energia de Soldagem (H) para $\eta=0,85$	0,606 KJ/ mm

Fonte: Autor

Foram adotadas três sequências de soldagem sem o uso de restrições mecânicas às chapas. A Figura 3.5 mostra a vista superior e a seção transversal dos painéis representando o percurso de soldagem de cada sequência, identificando o início e o final da soldagem nomeando as cantoneiras de 01 a 04 (da esquerda para direita), observando que cada painel possui um total de 08 cordões de solda, que foram soldados continuamente de acordo com a programação inserida no robô de soldagem.

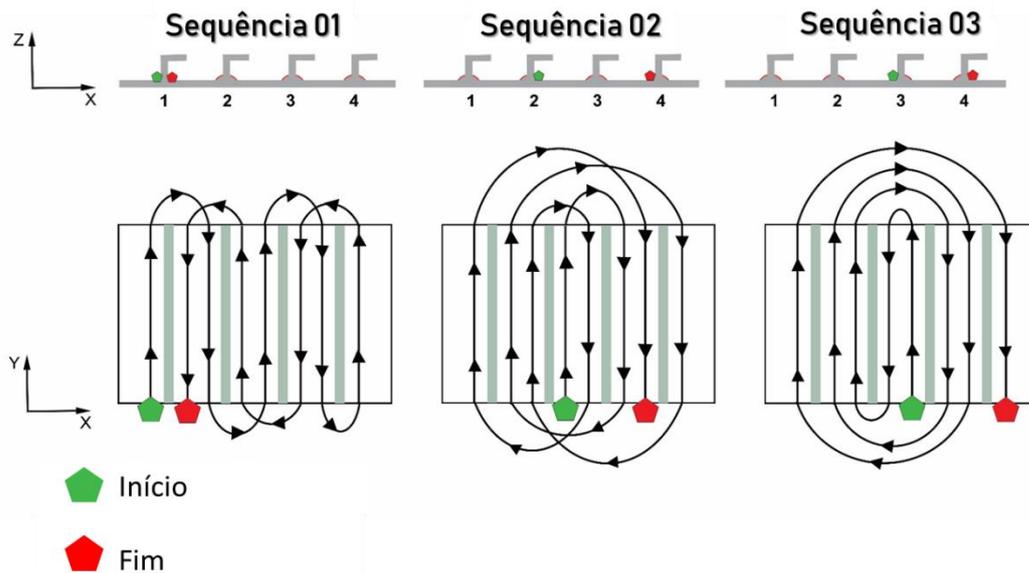


Figura 3.5 – Sequências de soldagem e seus respectivos percursos executados. (os números 1, 2, 3 e 4 representam a posição do enrijecedor soldado). Fonte Autor

Após a obtenção dos resultados das medições da Etapa 01, foi escolhida a sequência onde foram geradas menores distorções e tensões residuais, em que decidiu-se soldar com o processo CW-FCAW. Realizada conforme a Etapa 02.

3.3.2 Etapa 02: Soldagem CW-FCAW

Esta corresponde a gênese deste trabalho, uma vez que a aplicação de soldas CW nunca foram aplicadas na posição de filete. Entretanto, muitos são os desafios até que a tese se encaixe no padrão mínimo de execução. A primeira questão se esbarra

no tamanho do painel, considerado grande para os padrões de laboratório. O que requereu a adaptação de um suporte para o sistema de soldagem se locomover sobre o painel e executar a solda. Segundo a soldagem CW-FCAW está consolidada usando o modo de soldagem mecanizado, sendo que ainda não foi aplicado o dito processo no modo robotizado, a soldagem foi utilizada usando aquele modo. O que possibilita temas para outros possíveis trabalhos. Outro desafio, é a velocidade de soldagem executada na etapa 01, que só foi possível usando um sistema de deslocamento mecânico. Dessa forma, é necessário que a inserção do arame frio seja proporcional a do arame eletrodo, onde a utilização de uma Relação de Deposição (R_{CW}) para o arame adicional, dada pela Equação 3.1, que é a razão entre a velocidade de alimentação de arame adicional (V_{ACW}) e a velocidade de alimentação do processo principal (V_A), precisa ser estabelecida por:

$$R_{CW} = \frac{V_{ACW}}{V_A} \times 100 \quad \text{Equação 3.1}$$

Assim, foi utilizado o percentual de 40%, uma vez que é o mais estável quanto a estabilidade do arco de acordo com os diversos trabalhos já realizados no laboratório, onde foram executadas as soldagens. Vale lembrar que, é possível adicionar percentuais de arame acima de 100%, por isso, como as soldas de painéis não necessitam de volume depositado, mas de velocidade de execução e menores distorções e tensões residuais de soldagem, o percentual escolhido se encaixa perfeitamente em tal situação de trabalho. A Tabela 3.4, apresenta os parâmetros de soldagem utilizados para a soldagem dos painéis utilizando o processo CW-FCAW, considerando as velocidades de soldagem de 100 m/min e 120 cm/min.

Tabela 3.4 – Parâmetros de soldagem CW-FCAW.

Tensão de soldagem	34 V
Velocidade de alimentação de arame	19 m/min
Corrente de soldagem	350 A
Vazão de gás	20 L/min
Ângulo de trabalho	45°
DBCP	20 mm
Percentual de arame frio (R_{cw})	40%
Velocidade de soldagem (CW-FCAW 100)	100 cm/min (16,7 mm/s)
Velocidade de soldagem (CW-FCAW 120)	120 cm/min (20 mm/s)

Fonte: Autor

3.4 Medição

Após o resfriamento, torna-se primordial para o prosseguimento das análises a preparação dos painéis soldados para a realização das medições de sanidade das soldas, distorções e tensões residuais buscou-se utilizar as mesmas metodologias a fim de não comprometer ou obter resultados duvidosos.

3.4.1 Sanidade das Soldas

A inspeção da sanidade dos cordões de solda assumiu os critérios das normas da DNVGL, como:

- Exame visual (DNVGL CG-0051 Seção 7)
- Exame por Líquido Penetrante – LP (DNVGL CG-0051 Seção 4)
- Exame por Ultrassom – US (DNVGL CG-0051 Seção 6)

Ressaltando que os exames visual e LP avaliaram a possibilidade de descontinuidades superficiais e a técnica do US verificou se existiam descontinuidades internas como inclusões de escória, porosidades etc.

3.4.2 Distorções antes e após a soldagem

Os padrões de referência para medição das distorções de soldagem atualmente não seguem normas, mas um padrão admitido empiricamente pelos fabricantes. Assim como (CABRAL, 2011) a metodologia adotada para a análise de distorções para a tomada dos valores de distorção dos painéis se faz necessário estipular um padrão de medida, para isso foram feitas várias considerações:

- I. O corpo de prova foi dividido em quatro quadrantes, A, B, C e D (Figura 3.6a), onde foi realizada a tomada dos valores de distorção.
- II. A mesa de soldagem foi usada como referência para a retirada das medidas das distorções (Figura 3.6b), a mesma foi fabricada por chapas e cantoneiras de aço carbono, possuindo boa planicidade e não foi movida do local.

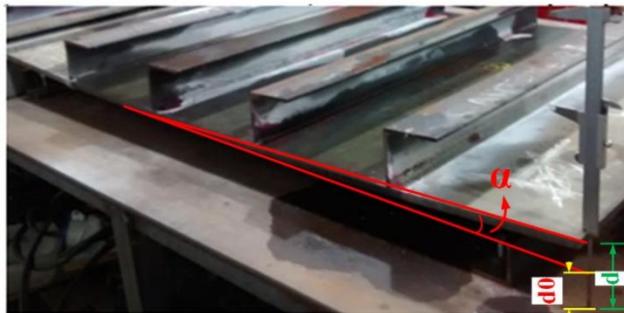
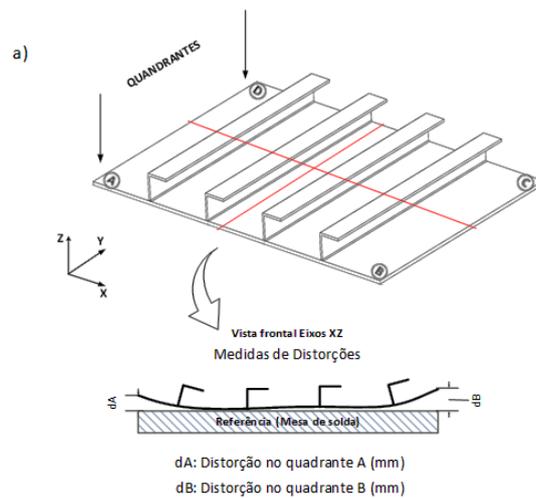


Figura 3.6 – (a) Divisão em quadrantes do painel (e da chapa, antes de soldar. No detalhe: Esquema da tomada da medida das distorções (mm) (c) Imagem da tomada da medida das distorções na prática (mm), onde: d_0 (distorção inicial), d (distorção após a soldagem), α (ângulo de distorção) Fonte: Autor

3.4.3 Tensões Residuais

Aqui encontra-se a etapa de medição mais delicada, complexa e meticulosa. Haja vista que trata dos resultados mais importantes deste trabalho de tese. No entanto, ocorreram algumas intercorrências que não tiveram como ser sanadas por falta de verbas, foram utilizadas 02 técnicas não destrutivas distintas para medição da tensões residuais, na Etapa 01 utilizou-se difração de raios X e na Etapa 02, birrefringência acústica que mede a velocidade de ondas ultrassônicas.

a) Difração de Raios X (Etapa 01)

Antes da medição propriamente dita foi necessária a limpeza eletrolítica com o mepBLITZ DC i5 usando uma solução comercial a base de ácido fosfórico e ácido cítrico (adicionando 10 mL de ácido sulfúrico por litro de solução para ajudar a remover uma grossa e densa camada de óxido). A limpeza de três linhas equidistantes (300 mm entre si e a 100 mm da borda) paralelas a maior dimensão do painel durou em torno de 1h30min cada linha, sempre ao final neutralizando o reagente de limpeza removendo todo excesso do produto químico gerado e deixando a superfície limpa (e com uma fina camada de óleo lubrificante para evitar a oxidação, devido à elevada umidade do ar), pronta para medição com DRX.

A base teórica para medição por difração de raios X foi norma BS EN 15305:2008 (*Non-Destructive Testing — Test Method for Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction*) que prevê a condição de corte para o caso de geometrias complexas havendo dificuldades para a medição. Primeiramente, foram realizadas medições de TR's em uma chapa sem enrijecedores, a fim de se verificar as intensidades das TR's do processo de laminação nas três linhas equidistantes descritas no processo de limpeza acima, esta chapa também foi denominada de chapa de referência. Sendo que a distância padrão entre os pontos foi de 30 mm.

Quanto aos painéis os pontos de medição foram estabelecidos de acordo com a Figura 3.7(a), onde pode-se evidenciar a variedade das distâncias e a diminuição desta quanto mais se aproxima ao cordão de solda. Sendo que esta imagem representa apenas a primeira seção de (7 pontos) de uma linha (70 pontos), ou seja, cada painel totaliza 210 pontos medidos, em uma única direção. A diminuição da distância entre pontos corresponde ao aumento da sensibilidade da captação dos pontos que indicam a mudança do estado de tensões residuais, pois sabia-se que quanto mais se aproxima da região da solda mais elevadas são as TR's (Figura 3.7(b)).

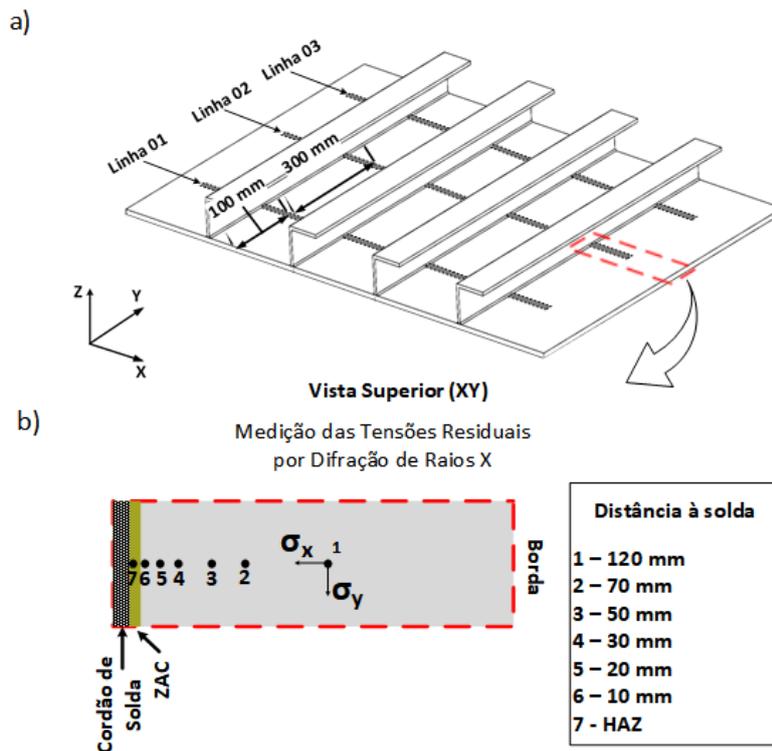


Figura 3.7 – Representação esquemática da medição das TR's no painel (a) Linhas de medição, distâncias admitidas. (b) Detalhe da distância medida entre os pontos de 1 a 7, indicando a redução da distância a fim de captar a variação das tensões residuais quanto mais se aproxima da solda. Fonte: Autor

Os parâmetros utilizados para medição das tensões residuais por DRX, estão na Tabela 3.5. As configurações desta Tabela se aplicam apenas para a medição das TR's em aço ferríticos. Sendo que para o caso de titânio, seria necessário tubo de titânio e alguns parâmetros mudariam como o ângulo de difração, entre outros.

Tabela 3.5 – Parâmetros e configuração de medição das tensões residuais por DRX. Fonte: Autor

Parâmetros de medição e Configuração do DRX	
Tubo	Cromo
Tensão	25 kV
Corrente	6 mA
Tempo Raios X	5 seg
Ângulo dos detectores (2θ)	156,4°
Tipo de Colimador e Arco	Longo
Diâmetro ponta colimador	3 mm
Distância ponta do colimador / superfície de medição	41,4 mm
Plano de medição	(211)
Número de inclinações*	4
Ângulo de inclinação máximo*($\pm\phi$)	-30° a +30°

Um outro parâmetro, tão importante quanto aos da Tabela 3.7, é a direção de medição em que as TR's são medidas. Neste caso, a posição do equipamento é a principal variável considerando que o painel não muda de posição. A Figura 3.8 mostra a imagem do equipamento, o enrijecedor e a direção de medição. Sendo que a Figura 3.8(a) mostra as medições na direção Y (Tensões Residuais Longitudinais - σ_y) e a Figura 3.8(b) mostra as medições na direção X (Tensões Residuais Transversais - σ_x). Porém, muitas limitações de medição foram encontradas. Uma das mais significativas corresponde indica o bloqueio de um dos dois detectores dos raios X difratados quando se media as tensões na ZAC, a região mais próxima da solda em que foi realizada a medição. Similarmente, na outra direção também ocorria o bloqueio dos dois detectores, quando na máxima inclinação para o mesmo lado do enrijecedor, funcionando como um anteparo dos raios X difratados.

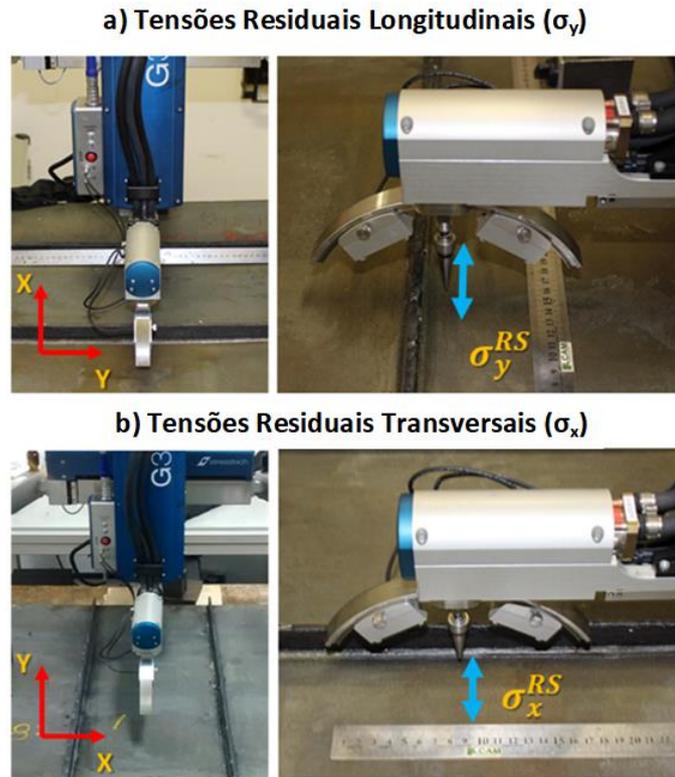


Figura 3.8 - Mostra a imagem do equipamento, o enrijecedor e a direção de medição. Direção de medição: (a) Tensões Residuais Longitudinais - σ_y ; (b) Tensões Residuais Transversais - σ_x . Fonte: Autor

O equipamento é composto de três partes: a fonte, o goniômetro e um computador com o software Xtronic instalado, exclusivo para o funcionamento do equipamento (Figura 3.9). O equipamento possui uma diversidade de acessórios necessários para aquisição de resultados de acordo com a situação de trabalho. Os principais acessórios são: tubo de radiação (cromo é utilizado para medir em aço carbono), detectores, arcos, colimadores.

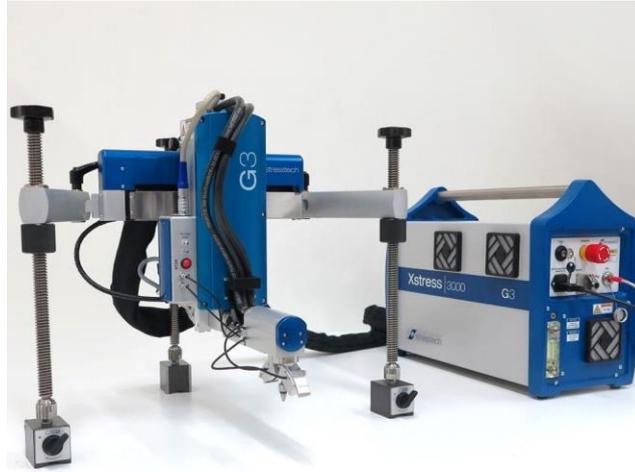


Figura 3.9 – Equipamento de difração de raios X portátil. Fonte Stressstech Group

b) Birrefringência Acústica (Etapa 02)

A fim de que as análises com BA fossem iguais ou próximas às mesmas posições medidas com DRX, o esquema organizacional dos pontos de medição, corresponde a Figura 3.10, similar a Figura 3.7. Observa-se que os números amarelos enumerados de 1 a 9 são os pontos medidos na distância padrão total de 120 mm, sendo que os pontos de 1 a 4 são distanciados por 14 mm cada e a partir do ponto 4 até o número 9, a distância fica limitada pelo diâmetro do transdutor de 12 mm, considerando como o deslocamento padrão de medição do ponto central entre os enrijecedores na direção da solda. Lembrando que o ponto 1 é exatamente a metade da distância entre os enrijecedores (120 mm), ou seja, a mesma distância da borda para cada enrijecedor subsequente. Notando que o diâmetro do transdutor corresponde a aproximadamente 4 vezes o diâmetro do colimador do DRX.

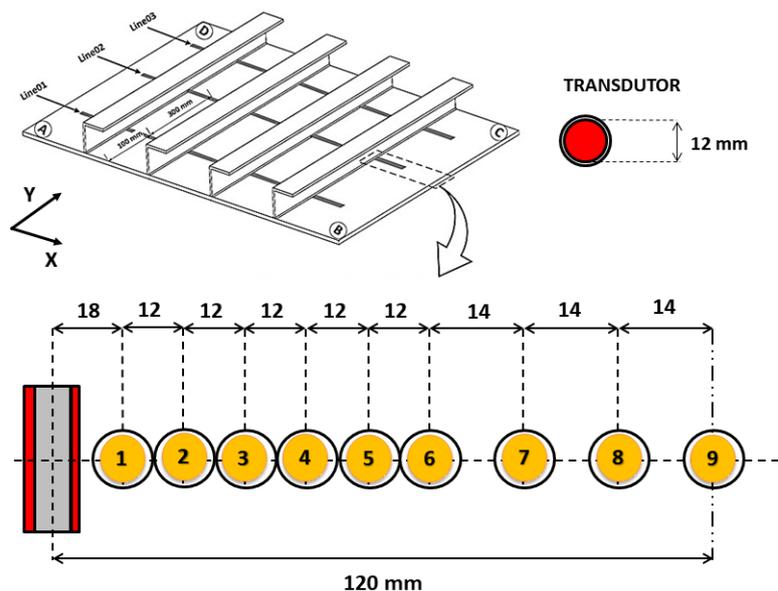


Figura 3.10 – Esquema representativo dos pontos de medição por Ultrassom com Birrefringência Acústica. Fonte: Autor

Após marcar a posição dos pontos de medição, a metodologia utilizada para a captura do sinal ultrassônico para a medir o tempo de propagação da onda consistiu no acoplamento do 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 3.11 (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 da onda polarizada transversalmente à direção de laminação, posição-2 da Figura 3.11.

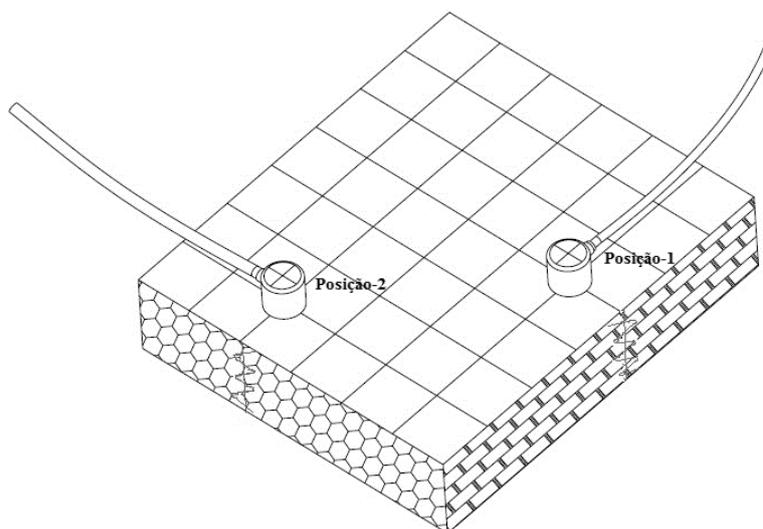


Figura 3.11 - Direção de polarização (movimento das partículas); Posição 1 - paralela à direção de laminação (longitudinal) e Posição 2 - transversal à direção de laminação. (COSTA, 2017)

Observa-se ainda que, um dado importante para a medição da birrefringência, e conseqüentemente, das tensões residuais é a determinação do B_0 do material além de ser necessário conhecer a direção de laminação considerando as técnicas metalográficas. Dessa forma, considerando que os dados de COSTA (2017) mediram esses mesmos dados citados acima em sua tese para o mesmo tipo de material (aço naval ASTM A131 grau AH32 ou similares) e condições de ensaio, assim serão os mesmos utilizados para determinação dos valores de birrefringência deste trabalho.

O equipamento ultrassônico de medição das tensões residuais composto por um aparelho gerador de pulso utiliza a técnica de inspeção pulso eco (quando o transdutor que gera é o mesmo recebe o sinal) configurado para a determinação das tensões através da birrefringência acústica, onde foi necessário um sistema de captura de sinais ultrassônicos capaz de medir a velocidade ou tempo de percurso da onda cisalhante normal à espessura do material com uso aplicado ao aço. Foi usado um transdutor ultrassônico piezelétrico de onda transversal e incidência normal de 12,7 mm de diâmetro e frequência nominal de 5 MHz. Além disso, utilizou-se também um osciloscópio com uma frequência de amostragem de 350 MHz e taxa de amostragem de 2,5 GS/s;

Todos os equipamentos foram interligados por 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, finalmente, todos os dados foram processados por um

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. Na Figura 3.12 é mostrado a conexão entre os equipamentos do sistema de captura do sinal ultrassônico e cada equipamento utilizado separadamente.

No mais, a fim de se obter confiabilidade nos resultados de tensões residuais, o sistema de captura foi calibrado através de um procedimento padrão, isto devido não existir norma adequada para este tipo de análise. 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.

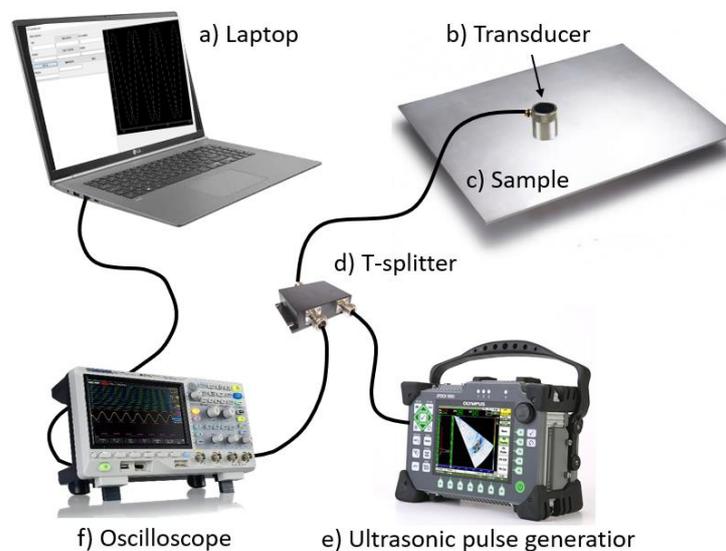


Figura 3.12 - Sistema ultrassônico utilizado na captura do tempo de percurso da onda ultrassônica para determinação das TR's por Birrefringência. Fonte: RODRIGUES et al. (2020);

3.5 Caracterização

Nesta etapa trata-se das etapas de caracterização da junta soldada e do metal de solda quanto as análises geométrica, macro e microestrutural com microscopia ótica e MEV, além da caracterização de propriedades mecânicas de microdureza.

3.5.1 Análise geométrica

Após as análises visuais e não destrutivas, esta caracterização é de extrema importância a fim de conhecer as medidas efetivas da junta soldada. A análise macro do cordão de solda é uma prática destrutiva, exigindo a remoção de amostras da solda (Figura 3.13), de acordo com a norma DNVGL- RU-SHIP Pt.2 Ch.4 (2018). Após a preparação da amostra é possível adquirir informações como: número de passes; tamanho, forma e homogeneidade do cordão de solda; e a orientação dos cordões em uma solda de passes múltiplos. A caracterização macroscópica é seguida por análise microestrutural, incluindo micro segregação, tamanho e estrutura do grão, composição da fase da solda e análise composicional.

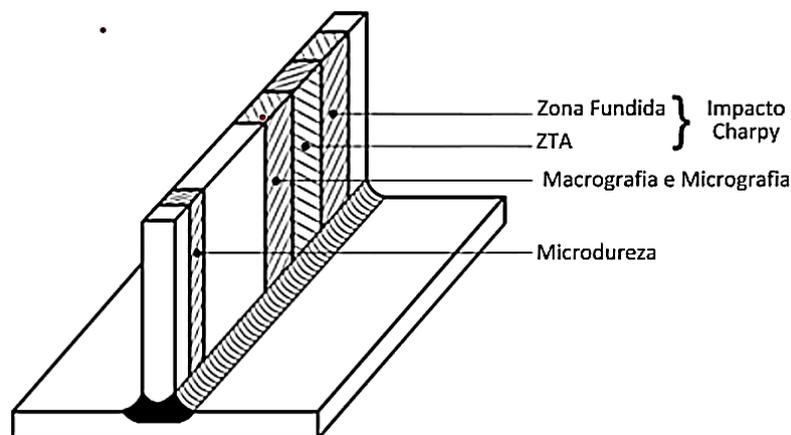


Figura 3.13 – Retirada dos corpos de prova para a caracterização geométrica, química e das propriedades mecânicas (DNVGL-RU-SHIP Pt.2 Ch.4:2018).

Assim, para o caso de soldas de filete com penetração completa, a norma DNVGL-RU-SHIP Pt.2 Ch.4 (2018) associada a norma BS EN ISO 5817 (2014), além de mostrar como deve ser realizado o corte para retirada das amostras para a caracterização metalográfica, a mesma também indica as amostras para o ensaio de dureza. Entretanto, baseando-se em outras normas da AWS e ASTM que dirige outros ensaios para cordões de solda, além destes foram efetuados ensaios para caracterização da geometria dos cordões, conforme o esquema da Figura 3.14. A Figura 3.14, identifica as principais medidas de um cordão de solda em filete como a garganta (G), perna (l e h), penetração (P) e a convexidade (ou concavidade), além da diluição do metal de solda pelo metal de base.

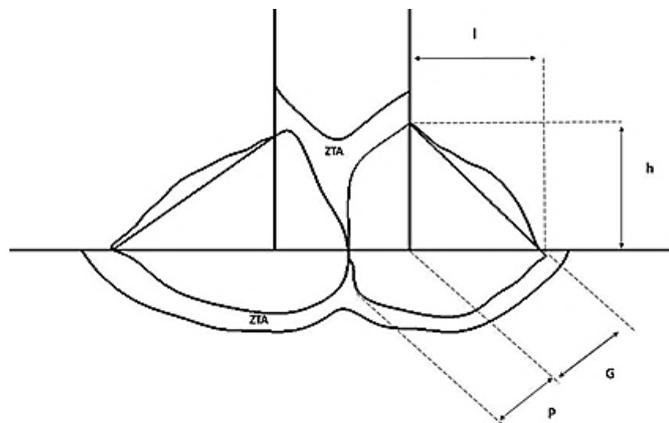


Figura 3.14 – Caracterização da geometria dos cordões de solda de filete duplo. Fonte: Autor.

Para o cálculo efetivo da diluição do metal de solda, a Figura 3.15 representa esquematicamente as zonas que compõe a junta soldada, considerando a relação já conhecida pela razão entre massa fundida do metal de base e a massa total fundida. Ou seja, usando o esquema da Figura 3.15, toma-se a região na cor amarela (área que penetra no metal de base – P) dividida pela soma de todas as regiões: região xadrez (área do metal de solda - MS), região na cor rosa (área do reforço da solda - R) e a região amarela (área penetrada no metal de base – P). A ZTA (região cinza) não entra no cálculo do percentual de diluição.

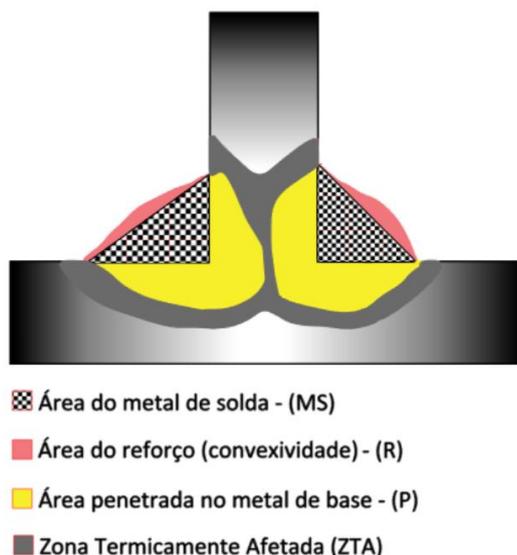


Figura 3.15 – Esquema da junta soldada, destacando-se as regiões que se relacionam na diluição.
 Fonte: Autor

3.5.2 Análise Microestrutural

Nesta etapa a Metalografia que é a técnica base para análise de imagens exige como preparação o corte e o lixamento. O corte executado como sempre discutido pela normas (DNVGL-RU-SHIP Pt.2 Ch.4-2018 e BS EN ISO 5817-2014), tendo como critérios a refrigeração da peça durante o corte e a posição correta de retirada. Para o lixamento e polimento segue-se os critérios da escala crescente da granulometria (intervalo de #100) das lixas de #100 até #600 para o caso de análise macro. Para análise micro deve-se continuar até #2000, em seguida polimento com pasta de alumina de 1 μ , 0,5 μ e 0,2 μ . Após isto, o ataque com o reagente Nital (2%) e Picral (4%) a 10 segundos. Secadas e levadas ao microscópio ótico e depois ao MEV. Para esta última técnica, dependendo da análise é necessário um polimento especial com sílica coloidal.

A análise macro volta-se principalmente para a determinação das partições térmicas da junta soldada, atentando para as regiões da ZTA e da ZF, similar as mostradas na Figura 3.14. Onde foram medidas suas áreas a fim de verificar possíveis alterações durante o processo.

Na análise micro deve se avaliar a microestrutura de todas as regiões da junta soldada, havendo um maior interesse na região da ZTA e metal de solda. Observando as possíveis formas microestruturais adquiridas sujeitando-as às comparações com as imagens micrográficas padrões de acordo com a norma IIW Doc.No.IX -1533-88 e o Volume IX- Metallography and Microstructures do Metals Handbook.

3.5.3 Análise Microdureza

Para a medição da microdureza vickers (HV), baseou-se no perfil da Figura 3.19, que representa o padrão para aquisição dos dados indicando os grupos de pontos medidos na junta soldada, ou seja, onde as endentações de pontos medidos no metal de solda, zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base. Vale ressaltar que a distância entre os pontos em linha foi de 0,5 mm e pré-carga de 0,3 HV. Ao todo cada junta, considerando apenas um cordão foram medidos 24 pontos. Apesar da junta ser com duplos cordões de solda, esta prática de medição é válida, tendo em vista a simetria da junta tanto para a questão geométrica quanto para as propriedades mecânicas que são idênticas.

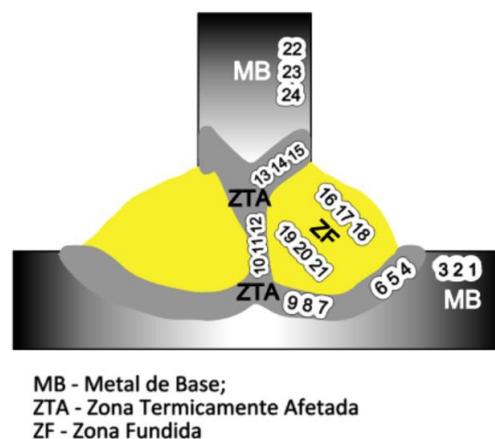


Figura 3.16 – Distâncias padrões para a execução do ensaio de microdureza (DNVGL-RU-SHIP Pt.2 Ch.4:2018).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões serão apresentados conforme descritos nos procedimentos experimentais, a fim de deixá-los numa ordem mais lógica do que cronológica para que se tenha um melhor entendimento da proposta do trabalho apresentado. Ou seja, mesmo o trabalho sendo subdividido em etapas, os resultados e as discussões serão organizados por tarefa executada como a soldagem, medição e caracterização.

4.1 Soldagens dos painéis

4.1.1 Soldagem FCAW robotizado

Após o interfaceamento e a programação entre o braço robótico e a fonte de soldagem realizados, os corpos de prova foram examinados à luz das normas aplicadas para avaliar a sanidade dos cordões de solda. A Figura 4.1 mostra o antes e após a execução da soldagem dos painéis pelo braço robótico. Contudo, a avaliação das soldas segue a seguinte ordem de avaliação: exame visual, líquido penetrante e ultrassom. As duas primeiras avaliam o estado superficial das soldas enquanto o último avalia a qualidade interna do metal de solda. Todos os ensaios visaram avaliar a presença ou não de discontinuidades como trincas, porosidades, inclusões não metálicas, entre outros. Além da concavidade ou convexidade dos cordões de solda, que no caso de soldas de filete são parâmetros significativos e considerados como critérios de aceitação.

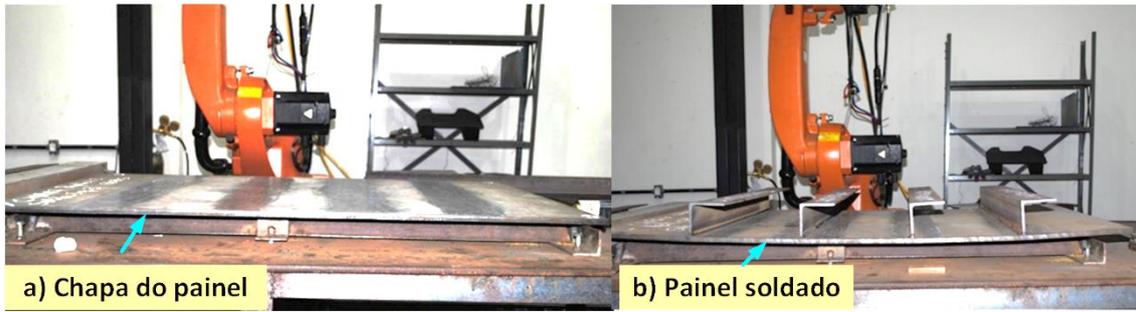


Figura 4.1 – a) Chapa limpa de óxido, pronta para montagem dos enrijecedores. b) Painel como soldado usando o braço robótico. Fonte: Autor

Os resultados encontrados estão dispostos a seguir:

- Exame visual

Apesar das dificuldades iniciais para sincronizar o braço robótico e a fonte de soldagem e obter bons resultados, ao menos, visualmente satisfatórios, foi necessário realizar ensaios preliminares que favoreceram para os resultados. Com a montagem da tabela de parâmetros e a descoberta de que a fonte possuía apenas um pacote operacional viável para o processo FCAW-G no modo robotizado, os resultados encontrados foram de satisfatórios a excelente quanto a continuidade e homogeneidade da superfície dos cordões de solda, onde pode-se perceber a convexidade e excelente acabamento (Figura 4.2). Onde a Figura 4.2 representa o padrão adquirido do ensaio visual dos cordões de solda.



Figura 4.2 – (a) Painel como soldado. (b) Superfície do cordão de solda. Fonte: Autor

- Ensaio de Líquido Penetrante (LP)

Como já mencionado, o ensaio de LP possibilita visualizar ou não a presença de descontinuidades superficiais na solda. Os ensaios revelaram que as soldas realizadas nos painéis não apresentaram nenhuma descontinuidade significativa. Não indicando a presença de nenhuma trinca de solidificação, porosidade superficiais, entre outras.

- Ensaio de Ultrassom (US)

O ensaio de US basicamente é usado para conferir o que ambos os ensaios anteriores não têm capacidade de diagnosticar, descontinuidades internas do cordão de solda como porosidades, falta de fusão, inclusões não metálicas etc. Descontinuidades estas que são mais perigosas e dependendo da aplicabilidade da solda, tornam os critérios ainda mais seletivos. Assim, fazendo-se uso de um equipamento robusto e bastante utilizado em campo, o transdutor por possuir tamanho grande e amplo feixe de ondas, uma única varredura examinou os dois cordões, devido serem estreitos.

Logo, a margem inicial do cordão de solda ficou com uma distância de 40 mm em relação a saída do feixe sônico (chamada de distância projetada). Esta distância projetou um eco na tela do aparelho na direção do ponto quatro da escala fixa, como ilustra a Figura 4.4, como a escala utilizada no ensaio foi de 100 mm, logo esse número quatro corresponde a 40 mm. Conseqüentemente, a margem do segundo cordão apresentou um eco em 60 mm, esses dois ecos foram utilizados como referenciais para o ensaio, ou seja, se algum eco aparecesse entre esses dois ecos seria possível inferir a indicação de descontinuidade.

Portanto, com o fato dos feixes sônicos só indicarem as margens externas do cordão de solda, isto significa, a não observância de descontinuidades e, conseqüentemente, ter efetivado uma união completa do perfil “L” com a chapa através das deposições metálicas da solda. Assim, possibilitou que todos os cordões de solda inspecionados não apresentaram ecos de alta intensidade entre os ecos de referência. A Figuras 4.3 mostra a imagem do ensaio realizado e, no detalhe, a tela do aparelho

revelando apenas os feixes sônicos, indicando ausência de descontinuidade nos cordões de solda.

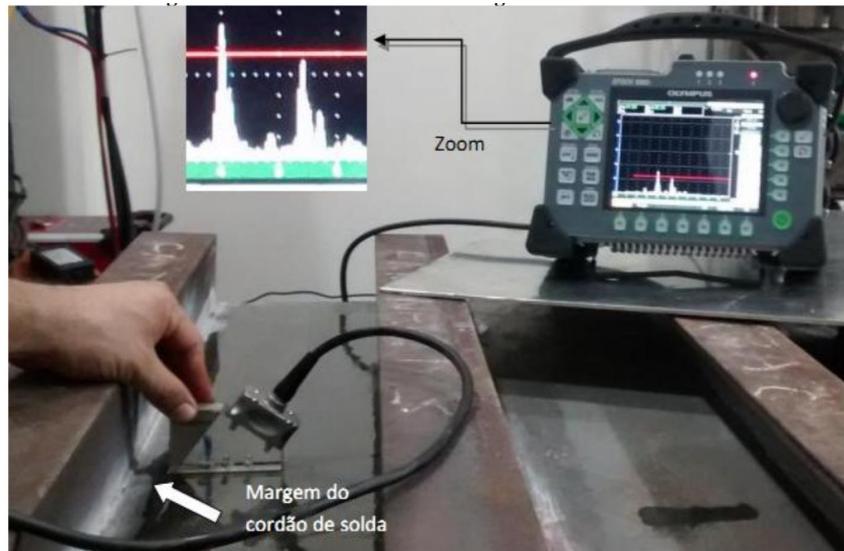


Figura 4.3 – Imagem do ensaio de ultrassom nas soldas do painel. No detalhe, a aquisição dos picos de referência. Fonte: Autor

4.1.2 Soldagem CW-FCAW

Conforme os resultados obtidos da etapa 01, com relação aos níveis de distorções e tensões residuais, a sequência 03 foi escolhida para a soldagem CW-FCAW com o percentual fixo de 40% de arame extra adicionado, haja vista que trabalhos anteriores demonstraram este percentual como o melhor em termos operacionais, principalmente quanto a estabilidade do processo. A montagem para a soldagem dos painéis requereu bastantes ajustes até a consolidação da ideia. Uma vez que a aplicação da técnica CW-FCAW nunca havia sido aplicada na posição de filete, apenas na posição plana e simples deposição. Na Figura 4.4, pode-se visualizar o painel montado com as cantoneiras ponteadas sobre a chapa, apta para receber a solda (Figura 4.4a) e após a

soldagem (Figura 4.4b). Observando cuidadosamente, pode-se perceber a presença das distorções na chapa soldada.

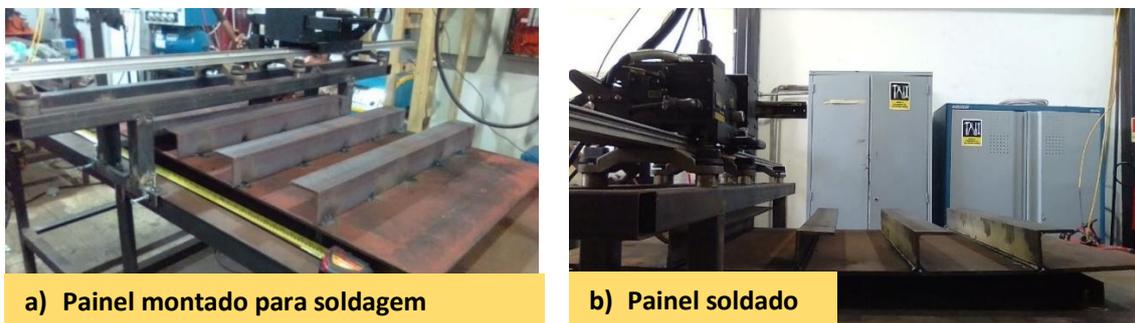


Figura 4.4 – (a) Painel montado para receber os passes de solda CW-FCAW. (b) Painel soldado.
Fonte: Autor

Já os ensaios de sanidade superficial como o exame visual, líquido penetrante e ultrassom realizados obtiveram resultados similares aos da etapa anterior com boa aparência e regularidade dos cordões de solda. A Figura 4.5 mostra o resultado encontrado quanto ao exame visual dos cordões de solda. Estes ensaios são importantes, pois mostram o principal resultado do trabalho: a soldagem do painel. Porém, por ser um trabalho comum e óbvio, a literatura e os especialistas da área não costumam repetir os detalhes da prática por serem baseados em normas e serem bastante difundidos. Desta forma, algumas práticas demonstradas com detalhes na etapa 01, não serão da mesma forma abordadas aqui, a fim de não tornar o trabalho repetitivo e extenso.



Figura 4.5 – Perfis de um cordão de solda do painel soldado com CW-FCAW utilizando velocidade de soldagem 100 cm/min. Fonte: Autor

4.2 Medições

4.2.1 Distorções

4.2.1.1 Distorções dos painéis soldados com FCAW robotizado

Os resultados de distorções fora do plano sem o uso de restrições mecânicas durante a soldagem dos painéis por FCAW-G robotizado indicaram que cada sequência adotada apresentou um comportamento peculiar quanto aos valores medidos. Os valores de distorções foram obtidos pela diferença das distorções iniciais produzidas pelos processos de laminação e armazenagem inadequadas e das distorções provocadas pelo processo de soldagem aplicado.

A Tabela 4.1 mostra os valores das distorções de cada sequência soldada considerando cada quadrante, isto é, as distorções locais. Assim, quanto aos valores, máximo e mínimo, adquiridos de forma geral, a medida do quadrante B da SEQ01, possui o maior valor de distorção entre todas as sequências e quadrantes medidos, igual a 18,20 mm. Enquanto o valor do quadrante C da SEQ03, foi onde a distorção apresentou o menor valor, 1,80 mm. Assim, estabelecendo uma proporção de 10 vezes menor que a maior distorção encontrada. Entretanto, para a SEQ 02 os valores foram intermediários para os quadrantes A e D, os valores de B e C são muito próximos ao da SEQ 01, conforme mostrado na Figura 4.6. Os valores das distorções por quadrante indicam a torção do painel causada pela soldagem e a sequência utilizada possui grande influência nesse comportamento, como verificado por LIANG e DENG (2018). Por outro lado, a média das distorções por sequência soldada estão na Figura 4.7, onde se evidencia a predominância da SEQ03, como a que possui menores valores de distorções, qualificando-se como a melhor sequência em valores locais, médios e globais.

Tabela 4.1 - Medidas das distorções nos pontos dos quadrantes por sequência soldada. Fonte: Autor

SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM	Distorção / Quadrante (mm)						
	A	B	C	D	TOTAL	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
SEQ01	17,20	18,20	16,70	15,60	67,70	16,93	1,08
SEQ02	12,20	16,45	16,60	8,50	53,75	13,44	3,87
SEQ03	10,35	4,55	1,80	5,00	21,70	5,43	3,58

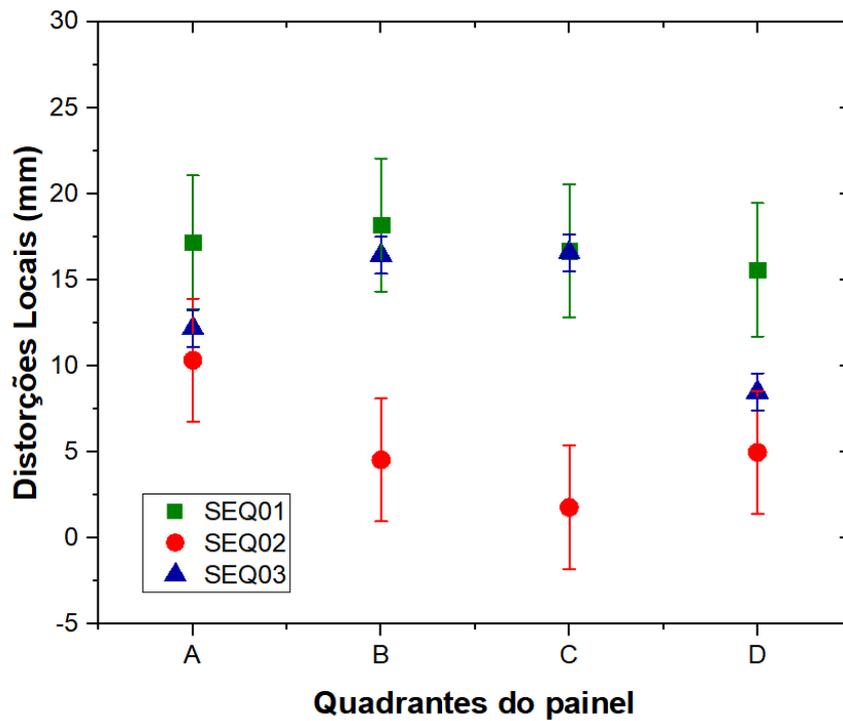


Figura 4.6 – Representação gráfica das distorções por quadrante dos painéis soldados

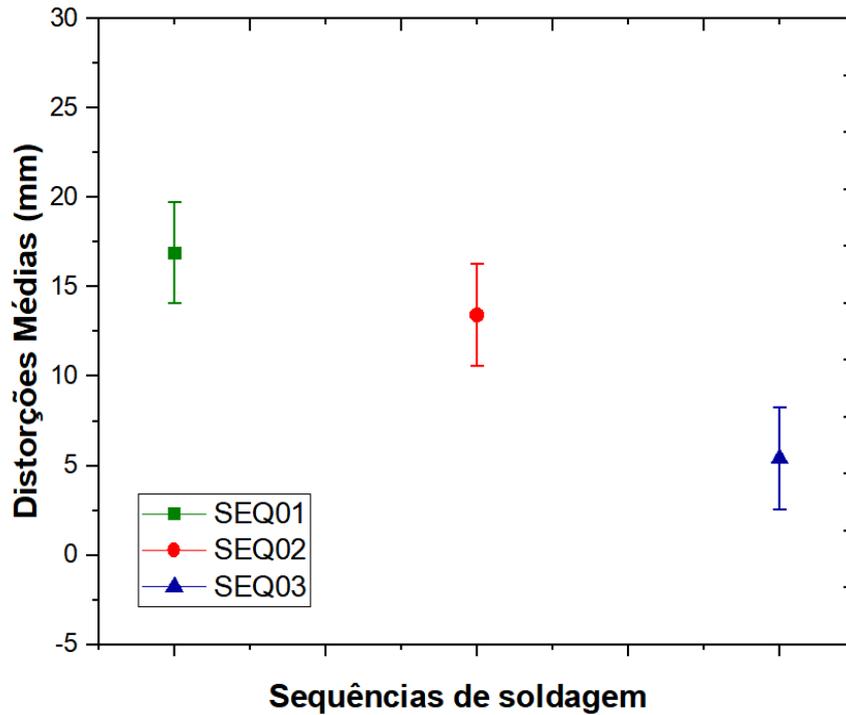


Figura 4.7 - Representação gráfica das distorções médias por sequência de soldagem

Entretanto, a Figura 4.8 mostra o gráfico das distorções totais por painel soldado. Considerando os valores de distorções globais, os maiores níveis foram produzidos soldando com a sequência SEQ01, totalizando 67,7 mm. Enquanto o painel que menos sofreu distorções foi soldado com a SEQ03 com 21,7 mm e a SEQ02 gerou níveis médios de distorções (53,7 mm), comparando as três sequências de soldagem. Tomando a SEQ03 como referência, a SEQ01 gerou aproximadamente um total de 212% e a SEQ02 um total de 147,7% a mais de distorções. Ou seja, a SEQ03 gerou menos da metade de distorções que a segunda melhor sequência de soldagem, que é a SEQ03 e próximo de um terço dos valores da pior sequência de soldagem, SEQ01.

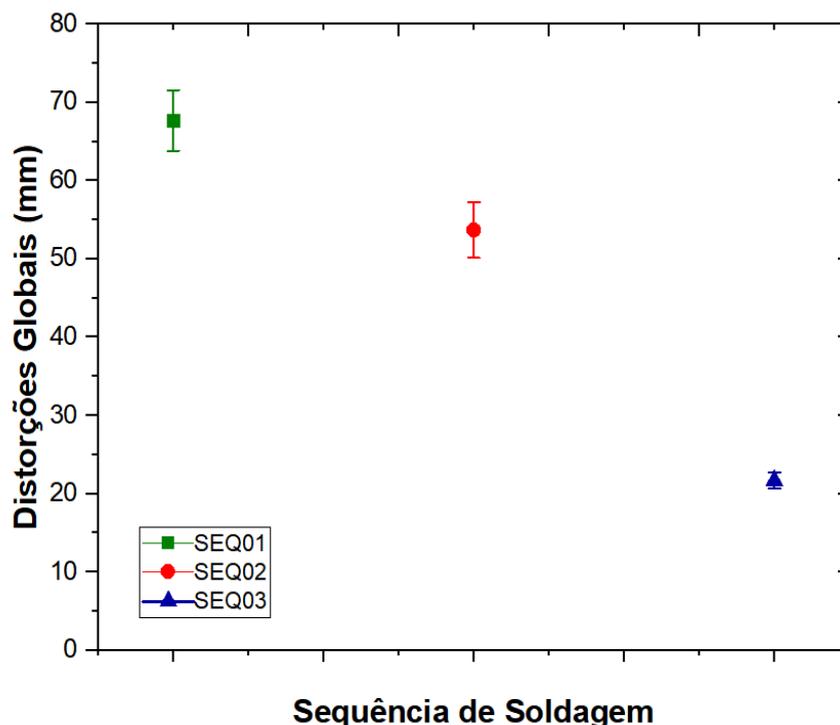


Figura 4.8 – Representação gráfica dos valores de distorções globais por sequência de soldagem

Deste modo, os valores apresentados são bem representativos para painéis soldados apenas com enrijecedores transversais, tendo em vista que as distorções de soldagem vão se acumulando ao longo da construção e montagem dos sub-blocos e blocos das embarcações (KHEDMATI et al. 2007). Logo, como já está bem estabelecido que a maior causa das distorções geradas ocorre principalmente através das forças de contração do metal após a aplicação da fonte de calor local, através dos resultados obtidos fica perceptível que a sequência de soldagem influencia na distribuição de temperatura do painel soldado e conseqüentemente nas distorções conforme os estudos similares de FU et al. (2016), CHEN e GUEDES SOARES (2016), CHEN, CHEN e SHENOI (2015) e SIRISATIEN, MAHABUNPHACHAI e SOJIPHAN (2018).

Assim, possivelmente a SEQ03 foi onde ocorreu uma distribuição mais homogênea do calor depositado no momento da soldagem, além da possibilidade influente de outros fatores possíveis não mensurados. Muito provavelmente, esta distribuição pode ser originada pela combinação da baixa energia de soldagem e melhor percurso de deposição dos cordões à junta soldada, onde observa-se que os painéis que iniciam a soldagem do centro para as bordas (SEQ02 e SEQ03) obtiveram menores magnitudes de distorções fora do plano do que o painel em que a soldagem iniciou e

terminou na borda como a SEQ01. Mostrando que os parâmetros de soldagem afetam a distribuição transiente de temperatura no painel, conforme os resultados de GERY, LONG e MAROPOULOS (2005); SONG et al. (2014) e SIRISATIEN, MAHABUNPHACHAI e SOJIPHAN (2018). De outra forma, GUO et al. (2016), observou que o calor imposto além de ser fortemente influenciador das distorções, os próprios parâmetros primários alteram o calor líquido utilizado na soldagem.

Um outro evento considerável de análise, refere-se ao tempo de deposição do segundo cordão de solda na junta de duplo filete, uma vez que a energia líquida do primeiro cordão atuou como um pré-aquecimento quando aplicado o segundo, assim, quanto menor o tempo de aplicação das soldas na mesma junta, maior a temperatura interpasse e logo diminuiu-se o gradiente de temperatura, favorecendo às condições para redução tanto das distorções como das tensões residuais. Isto pode ser mais bem observado, analisando os percursos de soldagem na Figura 3.5, onde os tempos de deposição do segundo ao primeiro cordão de solda aumentam nesta ordem SEQ03<SEQ02<SEQ01. Resultados estes que representam a mesma ordem dos resultados de distorções.

Finalmente, uma das conclusões do trabalho de TSAI, PARK e CHENG (1999), MOORE (2009), PODDER, DAS e MANDAL (2019) ajudam no embasamento para determinar a SEQ03 como a escolha adequada, pois afirmam que a localização de soldas mais próximas dos eixos neutros das seções transversais do painel pode controlar a flexão global e minimizar a distorção de soldagem de um painel reforçado. Isto justifica, as sequências que iniciam a soldagem pelo centro serem as que menos distorceram.

4.2.1.2 Distorções dos painéis soldados com CW-FCAW

Considerando a mesma condição anterior de soldagem sem o uso de restrições mecânicas, cada painel mostrou sua especificidade, devido suas diferentes formas de aplicação, variando a velocidade de soldagem. A Tabela 4.2, mostra os dados das distorções medidas antes e após a soldagem das chapas indicando o valor local por quadrante (Figura 4.9). O quadrante A do painel soldado com velocidade de soldagem de 100 cm/min apresentou o maior valor de distorção medindo 23,43 mm, correspondendo

a aproximadamente 31% do total. Esta mesma condição de soldagem é a que possui maior somatório das distorções por painel, 76,16 mm. Para a maior velocidade de soldagem (120 cm/min), o painel apresentou total de 67,20 mm comparando-se ao anterior, ocasionando uma diminuição de quase 13%.

Além disso, na Figura 4.10, o desvio padrão de cada painel soldado, são os valores dos erros padrões referentes à medição, para a velocidade de 100 cm/min o desvio padrão corresponde a aproximadamente 23% do menor valor de distorção (quadrante B – 15,31 mm) e para a velocidade de 120 cm/min, o desvio padrão vale quase 30% considerando a distorção do quadrante C igual a 12,6 mm. Além dos parâmetros de estudos do trabalho estes desvios também agregam erros de medição pela metodologia utilizada, mas estão em conformidade com o campo de aplicação.

A Figura 4.10, mostra o gráfico considerando as distorções médias para cada condição de soldagem com arame frio, o que para as dimensões do painel não são valores tão exagerados, sendo aceitáveis individualmente falando. Já para a Figura 4.11, tem-se as distorções globais por painéis. Estas distorções são o que visualmente percebe-se pela falta de alinhamento na estrutura montada. O grande problema é o acúmulo que muitas vezes gera a necessidade de retrabalhos diminuindo a produtividade como já foi mencionado.

Tabela 4.2 - Medidas das distorções nos quadrantes – CW-FCAW. Fonte: Autor.

ALIMENTAÇÃO DE ARAME CW-FCAW	Distorção / Quadrante (mm)						
	A	B	C	D	TOTAL	Média	Desvio Padrão
100 cm/min	23,43	15,31	17,48	19,94	76,16	19,04	3,48
120 cm/min	18,10	21,30	12,60	15,20	67,20	16,80	3,75

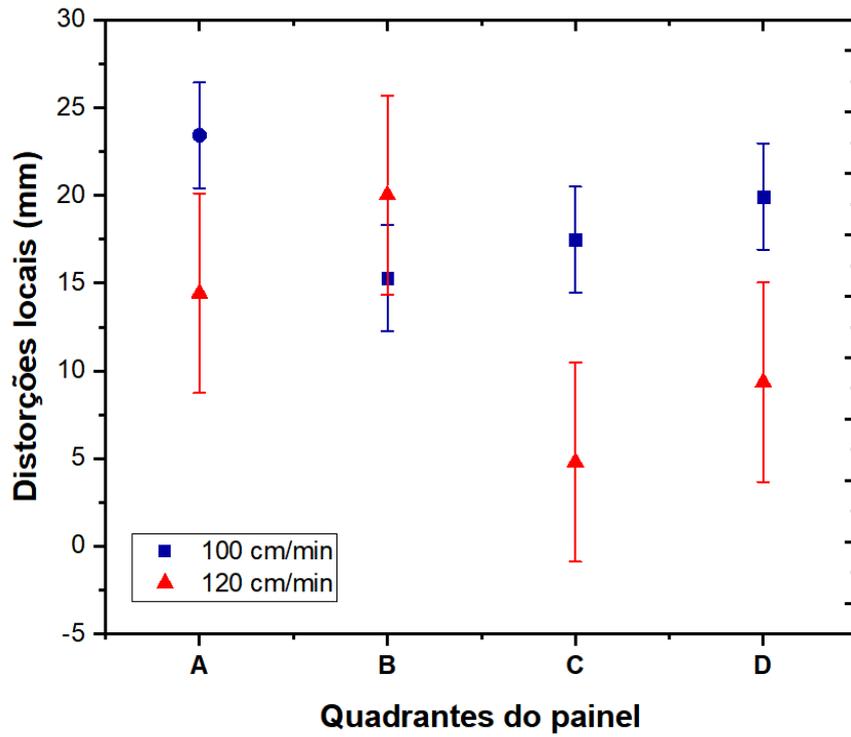


Figura 4.9 – Representação gráfica das distorções por quadrante dos painéis soldados CW-FCAW. Fonte: Autor.

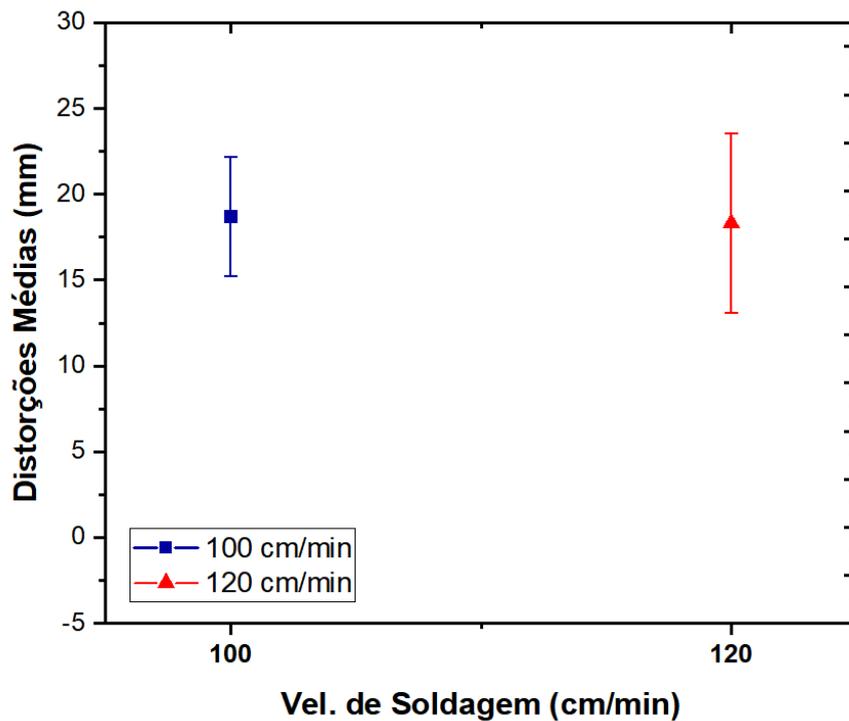


Figura 4.10 – Representação gráfica das distorções médias por quadrante dos painéis soldados CW-FCAW. Fonte: Autor.

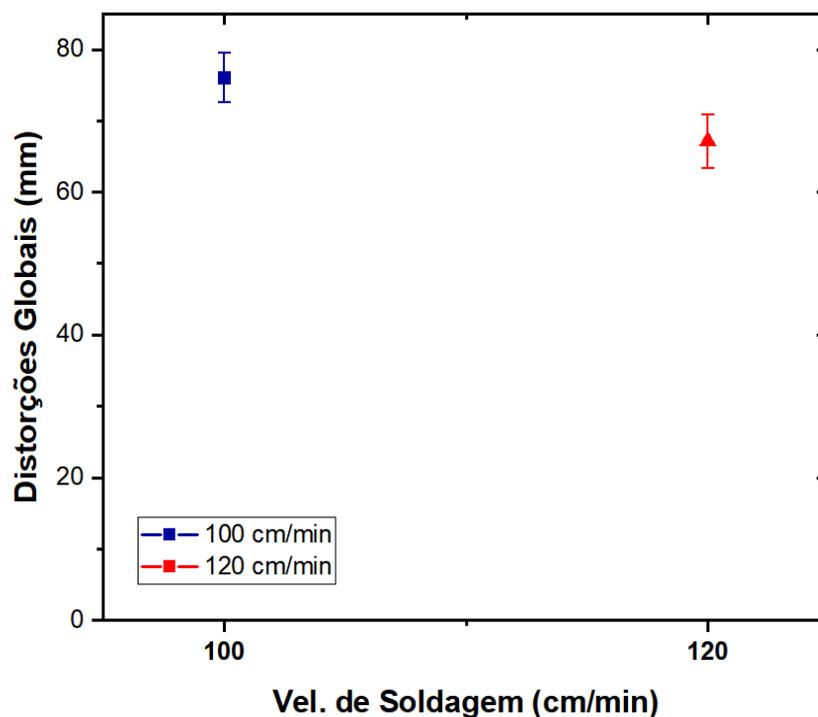


Figura 4.11 – Representação gráfica das distorções globais dos painéis soldados CW-FCAW.
Fonte: Autor.

Ainda assim, comparando a soldagem CW-FCAW com a MAG-CW utilizada por CRUZ Jr e CABRAL (2010), pode-se considerar que a forma de atuação do arame frio injetado diretamente na região do arco voltaico atue reduzindo a energia empregada no processo de soldagem, diminuindo, assim, seu efeito sobre a junta soldada e, conseqüentemente, menores valores de distorção e TR's. Considera-se que algumas combinações de parâmetros do processo CW-FCAW possivelmente acarretem menores distorções como o trabalho de MARQUES et al. (2017) e tensões residuais como COSTA et al. (2017), soldando com CW-GMAW. Entretanto, o que se pode projetar com o aumento da velocidade de soldagem, é uma provável queda nos valores de distorções. Esta possibilidade é um resultado esperado do experimento, uma vez que os 40% de arame frio adicionado possivelmente estejam influenciando na diminuição do calor na poça de fusão e, assim, nas distorções e também possivelmente nas tensões residuais de soldagem.

4.2.1.3 Comparativo de distorções entre os processos de soldagem

Vale enfatizar que muitas propostas para redução, mitigação e até eliminação de distorções de soldagem já foram desenvolvidas, mas que nenhuma foi capaz de solucionar o problema por completo. O que se tem são diversas conclusões e considerações de trabalhos na área que ajudam a tomar um caminho mais sensato na hora de decidir o que deve ser realizado para que não gere um trabalho em vão. Dessa forma, muitos trabalhos de modelamento matemático e a verificação experimental de modelos têm ajudado a solucionar parte do segredo comportamental das distorções antes, durante e após a soldagem. Portanto, os resultados deste trabalho quando comparados os valores das distorções, são de grande relevância para a área de estudo, devido a carência de dados não só experimentais como de aplicação prática, como estes aqui apresentados.

Mesmo conhecendo-se alguns parâmetros diferenciais importantes que podem tornar tal comparativo inoportuno em determinadas ocasiões, a realidade das tecnologias locais o faz necessária. Isto refere-se aos modos de soldagem em que, para a escolha da sequência de soldagem do painel, soldou-se no modo robotizado e com a técnica alternativa do arame frio utilizou-se o modo mecanizado, por questões já discutidas. Assim a Figura 4.12, representa graficamente todos os dados de distorções locais por quadrante enfatizando que a SEQ03 com FCAW robotizado ocasionou em menores distorções que todas as demais. Podendo visualizar graficamente na Figura 4.13 que as distorções da SEQ03 foram tão baixas, que o total deste parâmetro é próximo às médias dos restantes. Lembrando que, na Figura 4.13, os valores menores são as médias e os maiores as distorções globais ou totais de cada parâmetro de soldagem. Portanto, comparado à execução da soldagem CW-FCAW este efeito pode ser causado pelo maior retardamento de aplicação do segundo passe de solda após o primeiro, uma vez que no modo mecanizado ainda existe interferência e necessidade efetiva de um operador que demora no posicionamento para soldar cada passe especificamente que requer um tempo de ajuste maior, enquanto, no modo robotizado a soldagem ocorre sucessivamente efetuando a tarefa em poucos segundos de um passe para outro.

Por outro lado, esta análise comparativa, ressalta também o movimento torsional do painel soldado em cada uma de suas extremidades, de acordo com seus parâmetros

peculiares de soldagem, isto tem a ver com a homogeneidade de distorção em cada borda, ou seja, o questionamento é por quê cada borda distorceu com magnitude diferente, soldando nas mesmas condições. Assim, PODDER, DAS e MANDAL (2019) sugerem uma sequência em sentido contrário para cada solda de um enrijecedor soldado de ambos os lados, a fim de evitar distorções nas bordas livres. Ainda além da possibilidade da soldagem simultânea de cordões selecionados para diminuir distorções e tensões residuais consideravelmente (JAVADI, 2018).

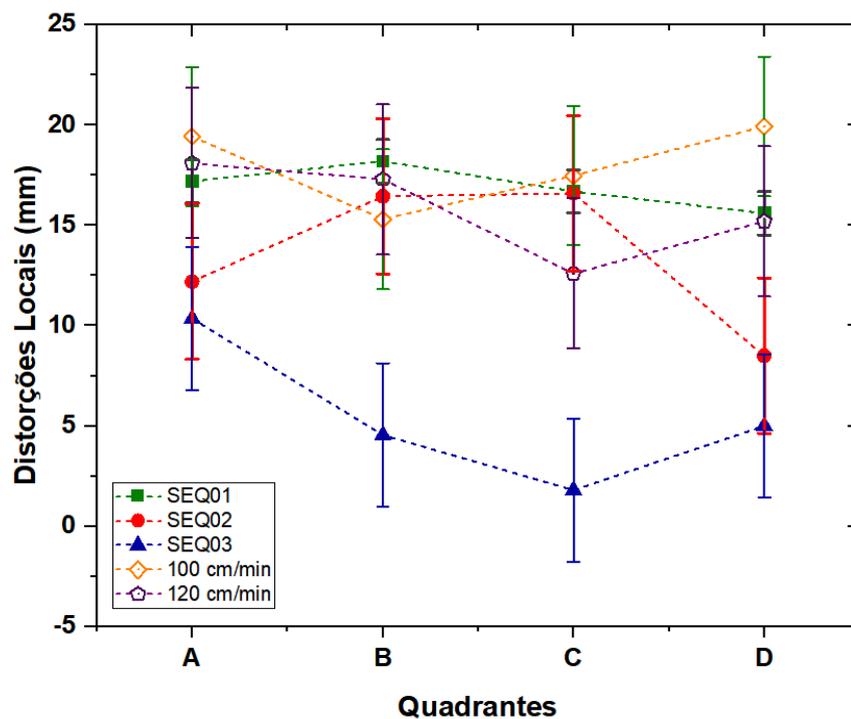


Figura 4.12 – Representação gráfica das distorções por quadrante dos painéis soldados com FCAW robotizado e CW-FCAW. Fonte: Autor

Finalmente, um reflexo da escolha não adequada dos parâmetros de soldagem é o acúmulo das distorções que um painel pode apresentar, devido à má distribuição de calor, sendo geralmente prevenidas ou corrigidas por métodos termomecânicos que envolve custos adicionais além da soldagem (OKANO, TSUJI e MOCHIZUKI, 2017). Além do mais, KHEDMATI et al. (2007), MOORE (2009) e GASPAR et al. (2011) afirmam que as imperfeições geométricas iniciais resultado da distorção pós-soldagem de subpainéis enrijecidos de forma longitudinal ou transversal, influenciam significativamente nos cálculos de resistência final da embarcação, corroborando claramente para afirmar que,

as SEQ02 e com CW-FCAW (100 cm/min), podem estar fora dos padrões admitidos na fabricação de painéis para embarcações em um contexto geral. E as condições da SEQ01 e CW-FCAW com 120 cm/min são passíveis de considerações para aplicação em campo. Além do mais, o excesso de distorções de soldagem desqualifica uma estrutura soldada para sua finalidade pretendida, além da redução de sua resistência à flambagem e uma aparência indesejada, os custos de reparos podem custar até 10 vezes mais que um trabalho bem feito pela primeira vez (MOORE, 2009). Assim, a distorção excessiva de vários painéis reforçados finos devido a efeitos de soldagem pode afetar seriamente o custo de fabricação e o atraso de uma embarcação (CHAU, 2006).

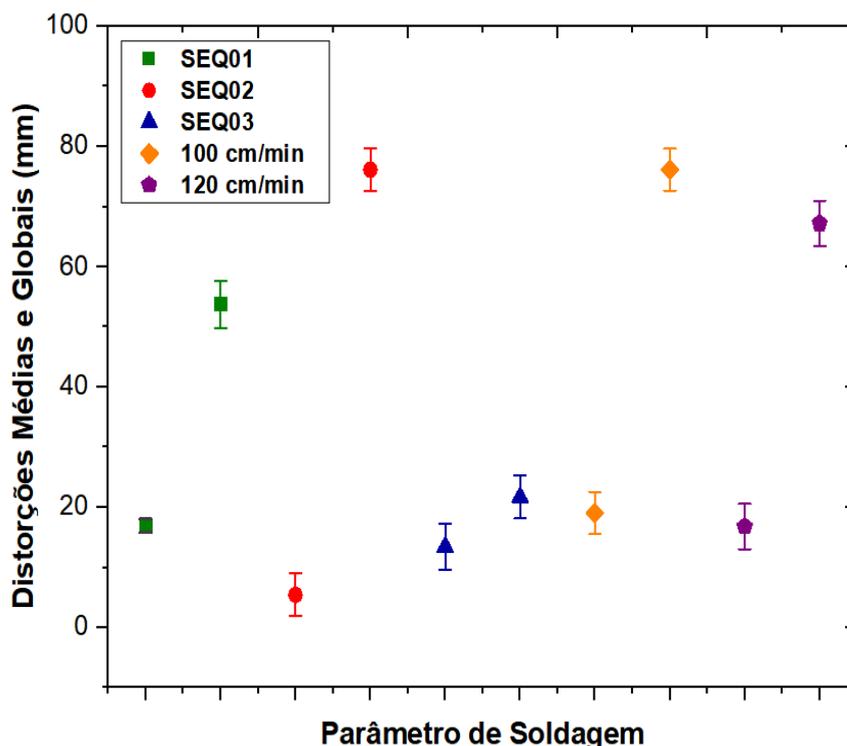


Figura 4.13 – Representação gráfica das distorções médias e globais dos painéis soldados FCAW robotizado e CW-FCAW. Fonte: Autor

De outra forma, MANDAL et al. (2014) considera que, uma das formas para aumentar a resistência à flambagem da embarcação é aumentando a espessura da chapa e diminuindo o espaçamento dos enrijecedores, porém ocorre o aumento do peso da estrutura, o que não é desejado na construção naval. Além da possibilidade de reduzir em 73% a distorção angular, considerando o uso do método de restrição estrutural em junta T e aliviar levemente as tensões residuais, conforme ZHANG et al. (2019).

4.2.2 Tensões Residuais

4.2.2.1 Etapa 01 - Calibração e medição na chapa de referência por DRX

As medidas das tensões residuais correspondem aos resultados mais onerosos deste trabalho, devido aos mínimos cuidados e, de certa forma, a experiência requerida para saber lidar com as muitas particularidades que requereu o equipamento e o objetivo a ser alcançado. De outra forma, poderia se colocar todos os dados a perder e necessitar refazer as medições. Assim, as análises das tensões residuais começaram pelas medições em uma chapa sem enrijecedores, limpa com eletropolimento e devidamente particionada e marcada com a posição exatas onde foram medidas as tensões residuais e a direção da tensão a qual se pretende encontrar. Aliás, antes de tudo foi necessária uma calibração do equipamento utilizando uma amostra padrão de pó de aço ferrítico, onde estima-se que esta seja livre de tensões. A Figura 4.14, mostra a interface do software do equipamento com os principais parâmetros de medição em destaque. Já a Figura 4.15, representa a interface dos dados de calibração encontrados.

Após a calibração, as TR's na chapa de referência foram medidas. Os valores obtidos estão na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4, os valores de referência por cada linha medida. Foi assumido como distância padrão 30 mm entre os pontos, nas linhas pré-estabelecidas. As TR's foram medidas apenas nas direções longitudinais da chapa, considerando que medir nas duas direções se tornaria desnecessária, ocasionando gasto do tubo de raios X (horas de funcionamento), além de ser bastante trabalhoso. Ou seja, os valores medidos serão considerados como valores médios em ambas as direções similares as medidas por BA e confirmadas por medidas similares de COSTA (2017). No mais, o equipamento fornece um erro de medição para cada ponto medido, devido as dificuldades de medição foi estipulado um erro máximo de medição de ± 20 MPa em todas as medições deste trabalho, conforme BHADESHIA e WITHERS (2001). Entretanto, considerando maior desafio medir nas regiões da solda (ZAC e ZF) este erro aceitável foi de até ± 30 MPa em algumas situações. Porém, isto é uma exceção e não regra.

Assim, através destes dados foram plotados os gráficos dos perfis 2D (Figura 4.16) e a superfície 3D (Figura 4.17) em gradiente de cores representam

os valores medidos das tensões residuais médias da chapa de referência (tensões residuais longitudinais - σ_y e tensões residuais transversais - σ_x) ao longo das três linhas de medição no eixo X (Linha01, Linha02 e Linha03).

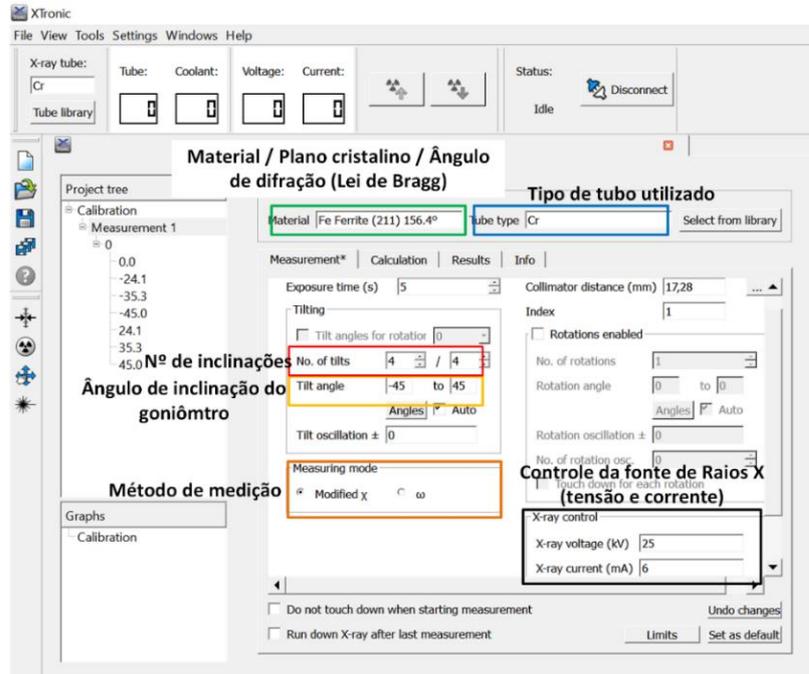


Figura 4.14 – Interface do software do equipamento de medição de TR's por DRX. As áreas destacadas mostram os principais parâmetros de configuração. Fonte: Autor

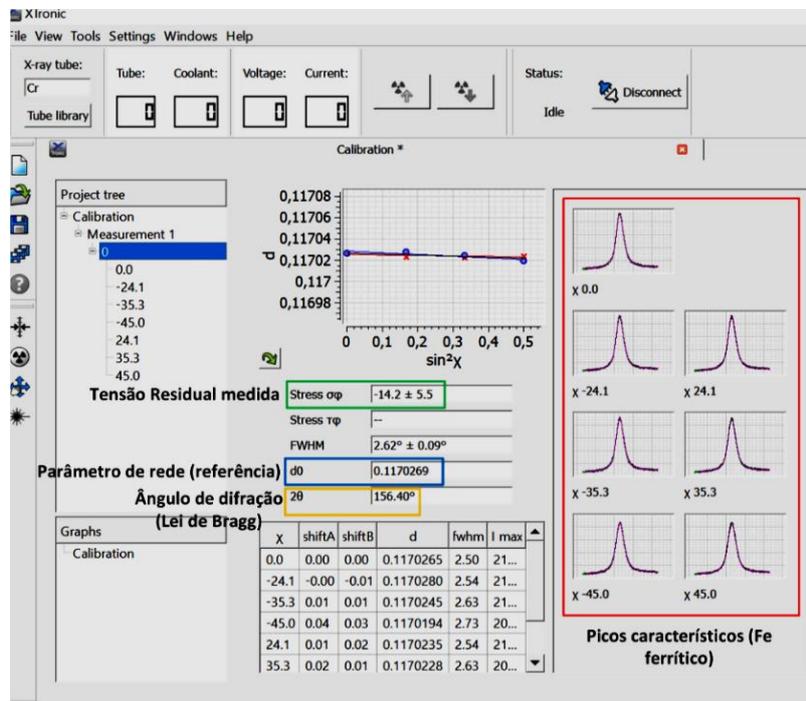


Figura 4.15 - Interface do software do equipamento de medição de TR's por DRX. As áreas destacadas mostram os dados de calibração encontrados. Com destaque para área na cor verde, que mostra o valor da tensão residual medida e o erro. Fonte: Autor

Tabela 4.3 –Valores de referência das TR's da chapa de referência, em MPa. Fonte: Autor

Chapa de Referência			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
TR Tratativas Máx. (MPa)	59,9	62,9	55,4
TR Compressivas Máx. (MPa)	-20,6	-48,4	-16,9
Média	16,1	8,4	23,7
Desvio Padrão	22,1	27,8	22,0
Amplitude amostral	80,5	111,3	72,3

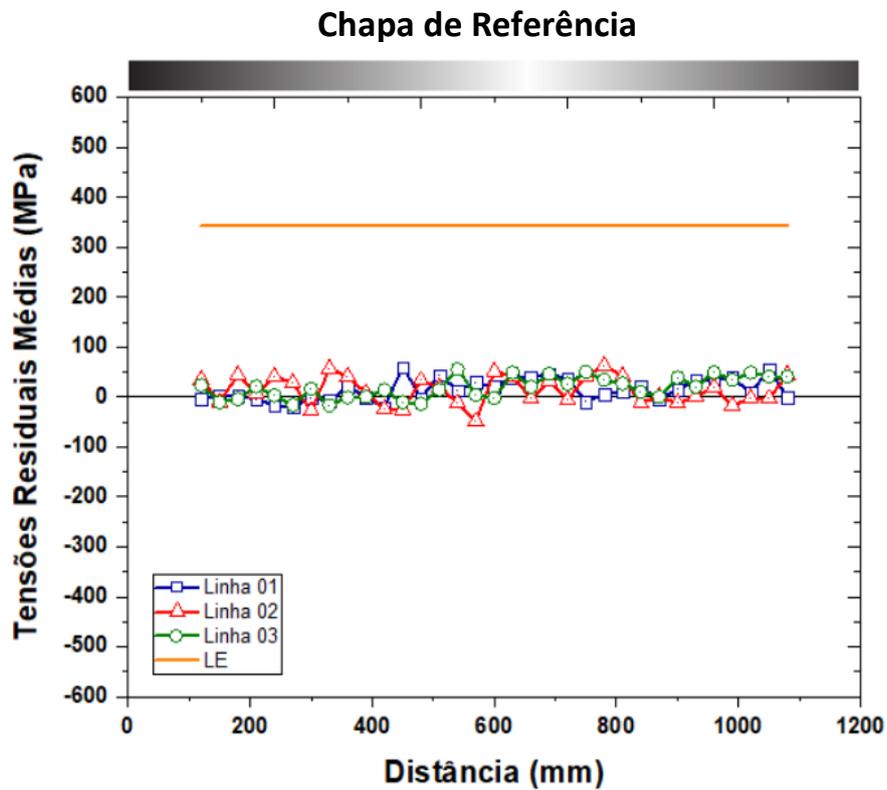


Figura 4.16 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's médias na chapa de referência medida com DRX. Fonte: Autor

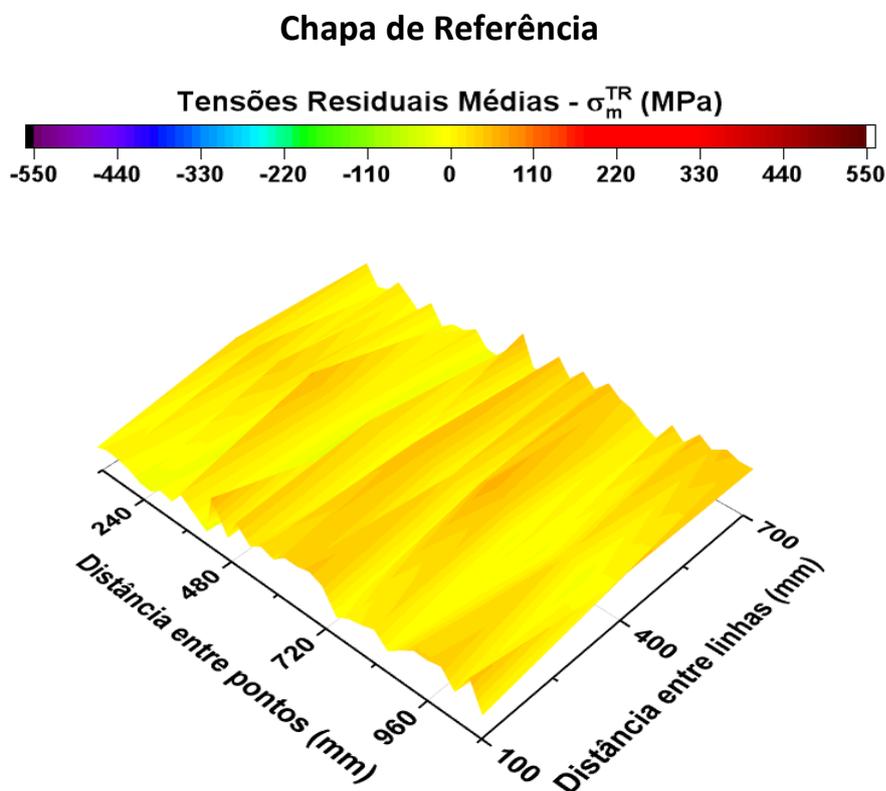


Figura 4.17 - Representação gráfica da superfície 3D das TR's na chapa de referência medida com DRX. Fonte: Autor

Logo, as tensões residuais médias (σ_m) medidas na chapa de referência, definem uma faixa de tensões residuais compressivas leves (-48,4 MPa, máxima) a tensões trativas moderadas (62,9 MPa, máximo,) ambos na linha02, resultando em um valor médio geral de 14,2 MPa, ou seja, entre todos os pontos medidos. Considerando os picos de tensões, estes resultados correspondem a aproximadamente 50% dos valores encontrados por YANG et al. (2019) em chapas de aço ABS grau DH-36 e aços ARBL. Sendo aquele, com características químicas mais próximas do que o analisado neste estudo.

As Figuras 4.16 e 4.17, se complementam, pois, o gráfico 2D indica o valor dos pontos dispostos por linha exibindo a vista frontal do painel, enquanto a superfície 3D representa o perfil das TR's distribuídas sobre a superfície da chapa, onde foram realizadas as medições. A Figura 4.17, representa claramente a distribuição destas tensões na superfície da chapa indicando a predominância de tensões residuais trativas ao longo do centro e das bordas.

a) Tensões residuais longitudinais (σ_y) nos painéis por DRX

As tensões residuais de soldagem atuam em todas as direções, porém em corpos de prova planos (e em outras geometrias também) há necessidade de definição das direções de medição destas tensões, uma vez que o principal risco da presença destas tensões na mesma direção dos esforços aplicados pode ocorrer falhas prematuras ou imperfeições como deformações e flambagem (WITHERS, 2007; YANG e JUNG, 2007; YAN, 2014).

Dessa forma, os resultados das tensões residuais longitudinais foram obtidas no sentido paralelo aos cordões de solda (são transversais ao comprimento do painel) (Tabela 4.4, 4.5, 4.6) pode-se observar que os gráficos 2D das Figuras 4.18, 4.20, 4.22 e as superfícies 3D das Figuras 4.19, 4.21, 4.23 para as 03 sequências de soldagem admitidas, indicando que, os valores mais extremos encontrados foram -385,9 MPa na linha 01 da sequência 01 e 290,7 MPa na linha 03 da sequência 02 (Tabelas 4.4 e 4.5). Este valor corresponde a quase 90% da tensão de escoamento média do material da chapa que foi medida (LE= 342,2 MPa; LRT= 520MPa). Isto, representa, que o limite de segurança já foi atingido no caso da estrutura em serviço. Os valores anteriores de tensões residuais compressivas e trativas são os valores máximos medidos no trabalho. Alguns autores, tratam os gráficos de tensões chamando as partes de picos e vales. Assim, foi calculada a amplitude amostral (nas tabelas com os valores de referência de cada sequência soldada) para cada linha medida e comparadas entre si e entre os valores de tensões das sequências de soldagem correspondentes. Dessa forma, a sequência01 possui a maior amplitude amostral (665,9 MPa – Tabela 4.4) deste estudo.

Tabela 4.4 – Dados de referência das medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor

Painel Soldado – Sequência01 – TR's Longitudinais			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
TR Tratativas Máx. (MPa)	280	244,2	286,6
TR Compressivas Máx. (MPa)	-385,9	-337,4	-335,5
Média	-200,4	-200,1	-214,0
Desvio Padrão	185,8	176,1	171,1
Amplitude amostral	665,9	581,6	622,1

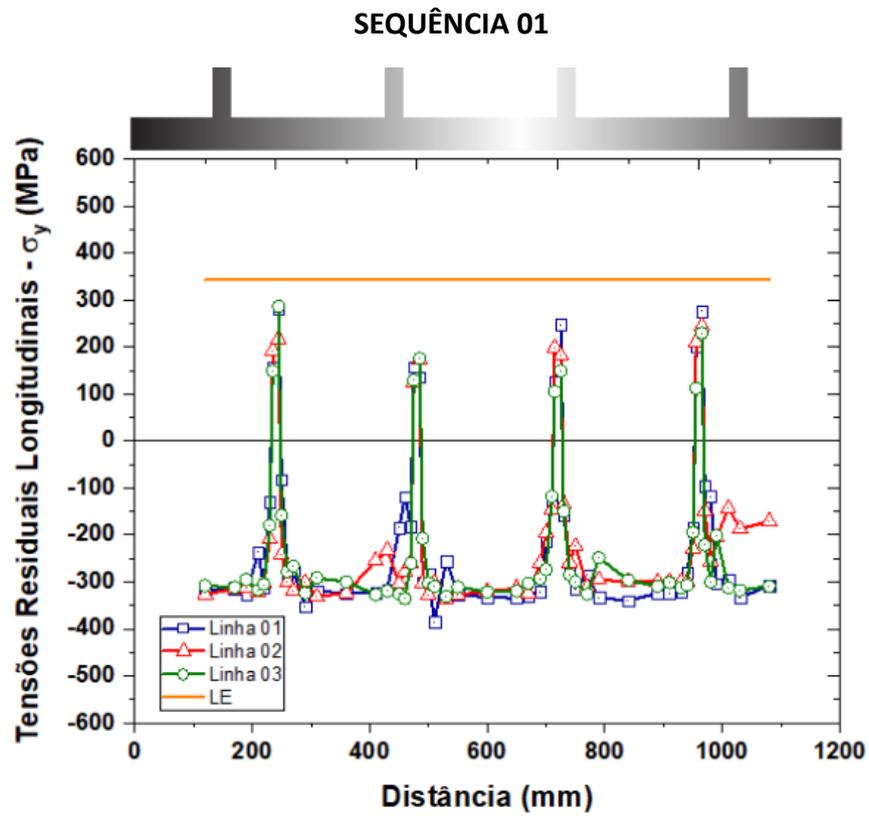


Figura 4.18 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor

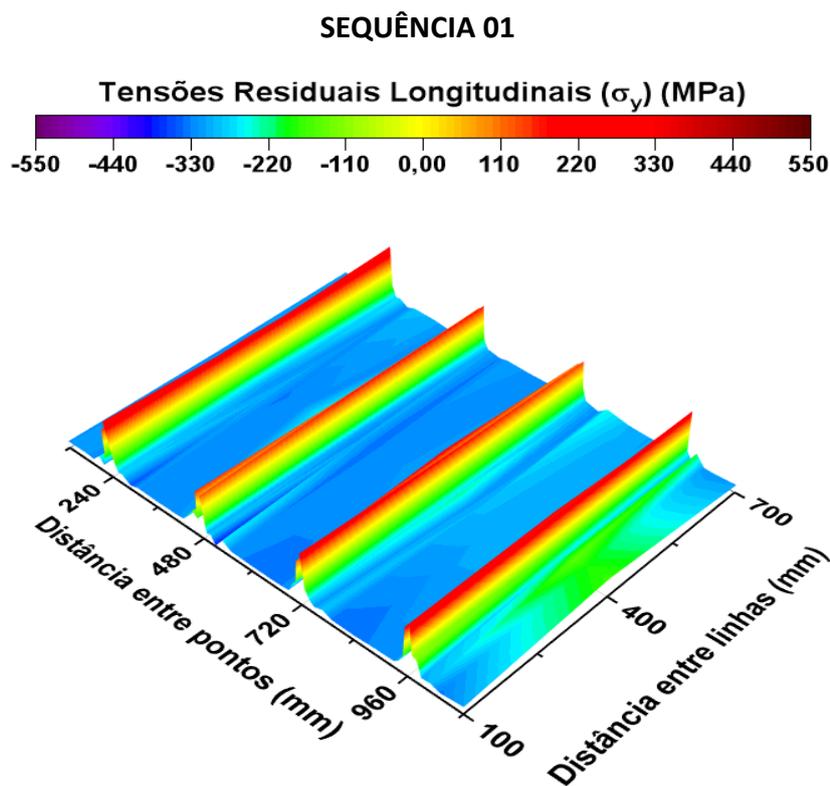


Figura 4.19 – Representação gráfica da superfície 3D das TR's Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor

Tabela 4.5 – Dados de referência das medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor

Painel Soldado – Sequência02 – TR's Longitudinais			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
TR Trativas Máx. (MPa)	225,3	238,5	290,7
TR Compressivas Máx. (MPa)	-365,3	-313,4	-333,2
Média	-213,1	-193,5	-202,5
Desvio Padrão	174,3	163,8	167,0
Amplitude amostral	590,6	551,9	623,9

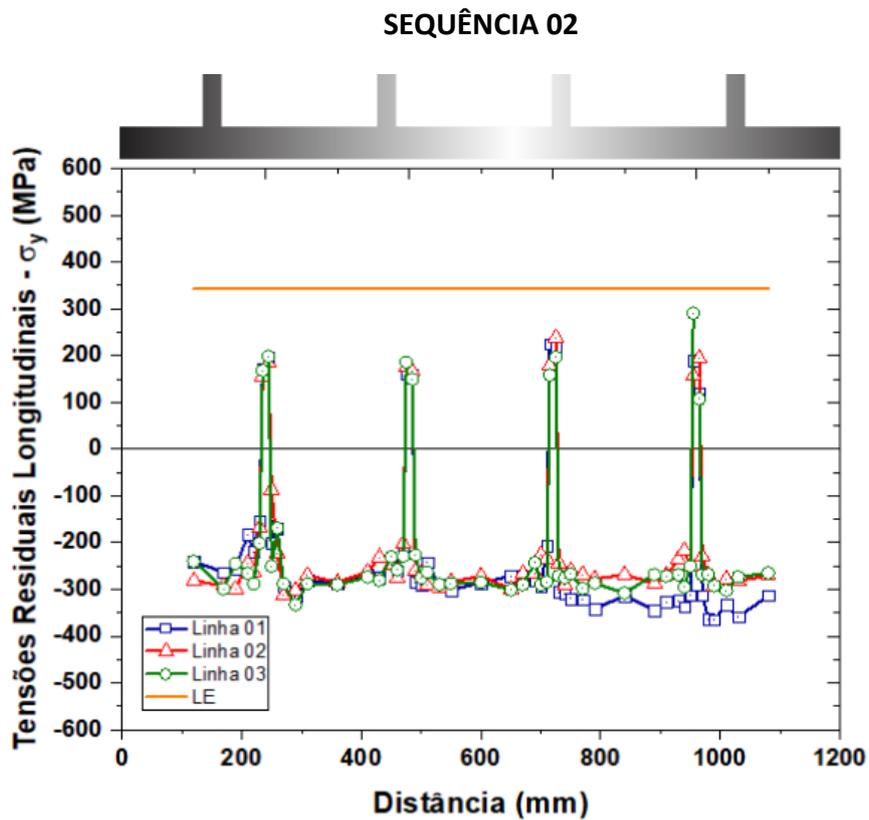


Figura 4.20 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor

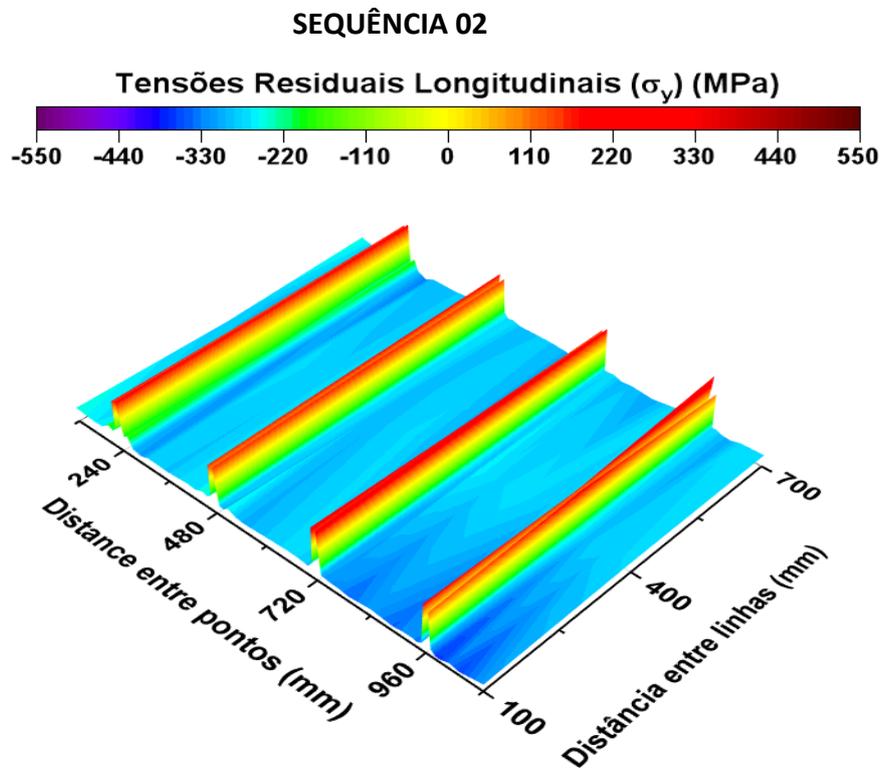


Figura 4.21 – Representação gráfica da superfície 3D das TR's Longitudinais (σ_y^{TR}) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor

Tabela 4.6 – Dados de referência das medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor

Painel Soldado – Sequência03 – TR's Longitudinais			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
TR Trativas Máx. (MPa)	184,2	198,7	184,8
TR Compressivas Máx. (MPa)	-200,9	-108,9	-120,3
Média	-84,6	-32,5	-26,2
Desvio Padrão	101,9	87,5	81,6
Amplitude amostral	385,1	307,6	305,1

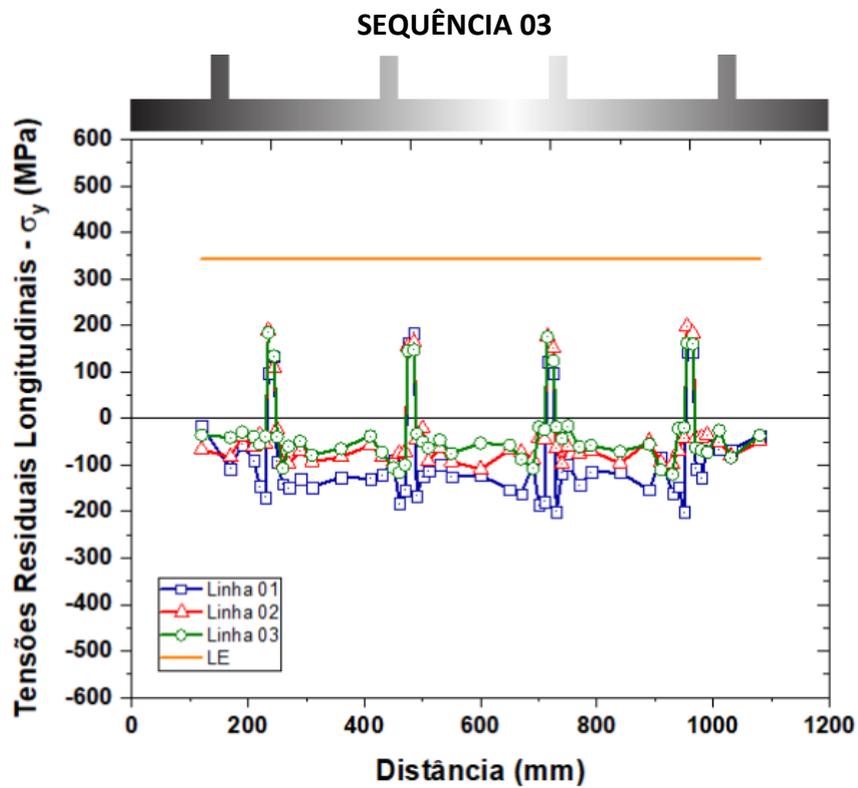


Figura 4.22 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Longitudinais (σ_y^{TR}) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor

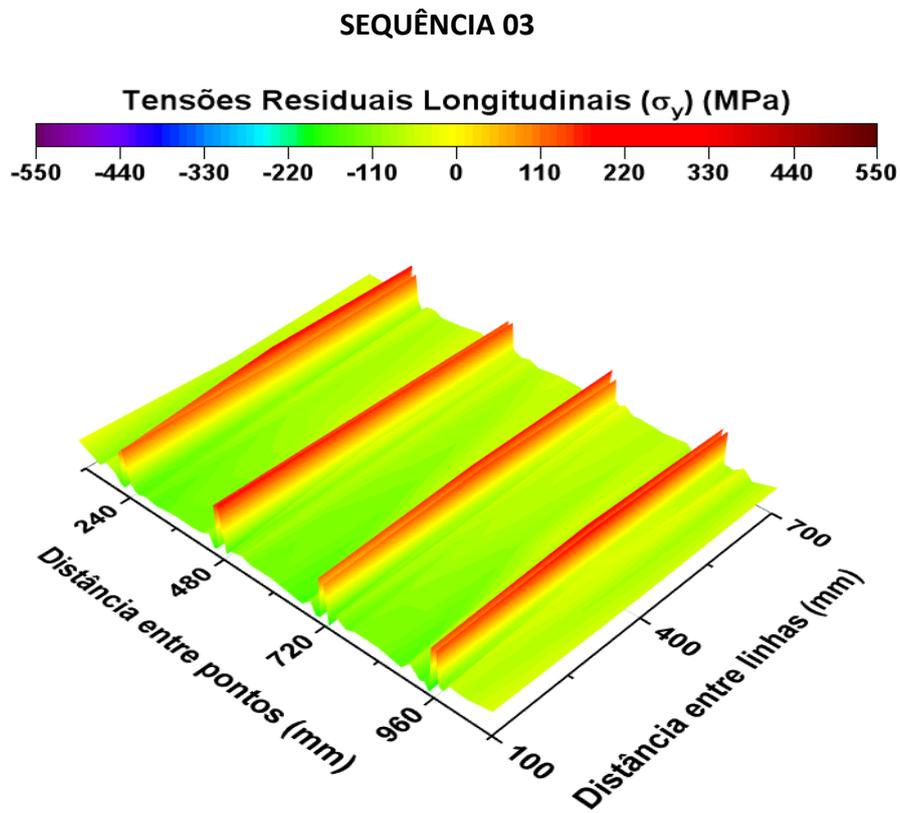


Figura 4.23 – Representação gráfica da superfície 3D das TR's Longitudinais (σ_y^{TR}) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor

De outra forma, as SEQ01 e SEQ02, apresentaram comportamento similares com tensões residuais compressivas intensas na direção longitudinal do painel (-345 MPa, em média) geralmente entre as distâncias 120mm até 30 mm da solda (os pontos de 1 a 4 - Figura 3.7b) e a partir de 20 mm até a ZTA (os pontos de 5 a 7 - Figura 3.7b), a formação de picos longos com tensões residuais trativas acima dos 280 MPa. Uma pequena mudança de comportamento pode ser vista na linha01 a partir dos enrijecedores st03 e st04 da SEQ02, onde as tensões compressivas estão um nível mais abaixo.

Entretanto, a SEQ03 apresentou picos mais curtos para os pontos mais próximos da solda, com valores de tensões residuais trativas próximas a 200 MPa, máximo (Tabela 4.6). Diminuindo para 61,5% do valor comparado a tensão de escoamento do material, o que diminui consideravelmente quanto ao valor médio das tensões residuais trativas da SEQ01 e SEQ02. Porém, considerando que, ainda é elevado para os padrões admitidos de segurança, de no máximo 90% LRT do material. Além disso, a SEQ03 apresentou para os pontos mais distantes da solda (30 mm a 120 mm – Figura 3.7b) tensões compressivas menores com valores médios de -143,3 MPa, com os menores níveis encontrados para as TR's longitudinais de até -108 MPa.

De outra forma, pode-se verificar os comportamentos das tensões residuais longitudinais considerando a média dos valores correspondentes das três linhas de medição em cada sequência soldada. Na Figura 4.24, têm-se o gráfico 2D de linhas e pontos mostrando um comparativo de tensões. Pode claramente ser observado as curvas de tensões longitudinais médias das SEQ01 e SEQ02 envolverem a curva da SEQ03, evidenciando os picos já mencionados de cada sequência. Já a Figura 4.25, representa o perfil da superfície 3D plotando os valores médios das tensões longitudinais, ou seja, o perfil encontrado é uma projeção estatística dos valores realmente medidos. Ressaltando que a média de cada sequência corresponde a linha de mesmo índice, ou seja, na linha 01 são os dados da SEQ01, e assim sucessivamente. O ponto principal a ser notado é a mudança no gradiente de cores de azul para verde, isto é, a média das TR's longitudinais da SEQ01 e SEQ02 são tensões mais compressivas que as da SEQ03.

TR'S LONGITUDINAIS MÉDIAS X SEQUÊNCIAS DE SOLDAGEM

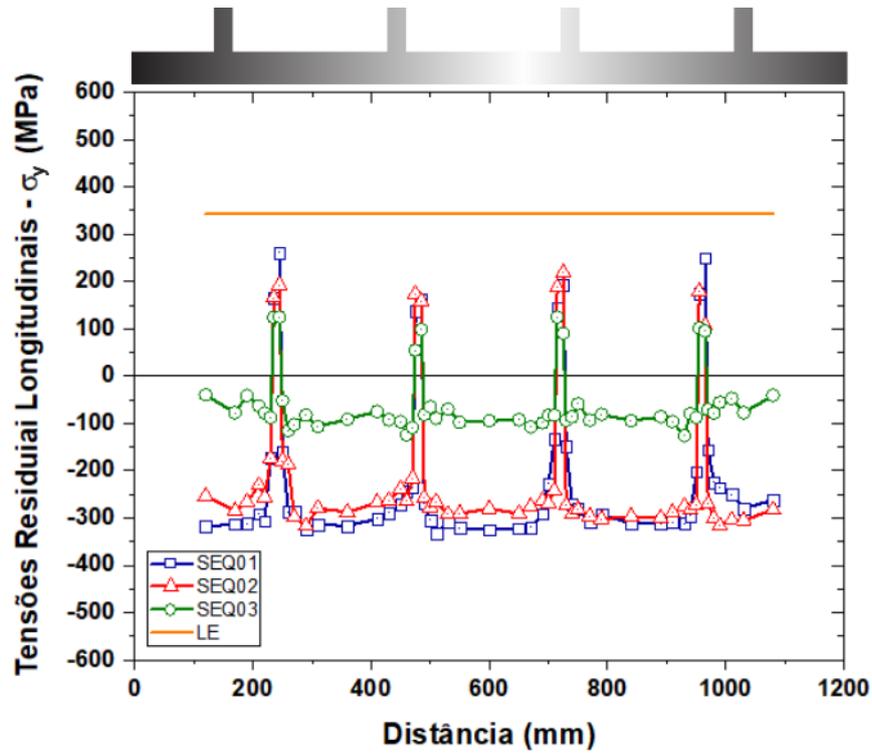


Figura 4.24 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Longitudinais Médias (σ_y) por sequência de soldagem. Fonte: Autor

TR'S LONGITUDINAIS MÉDIAS DRX (MPa)

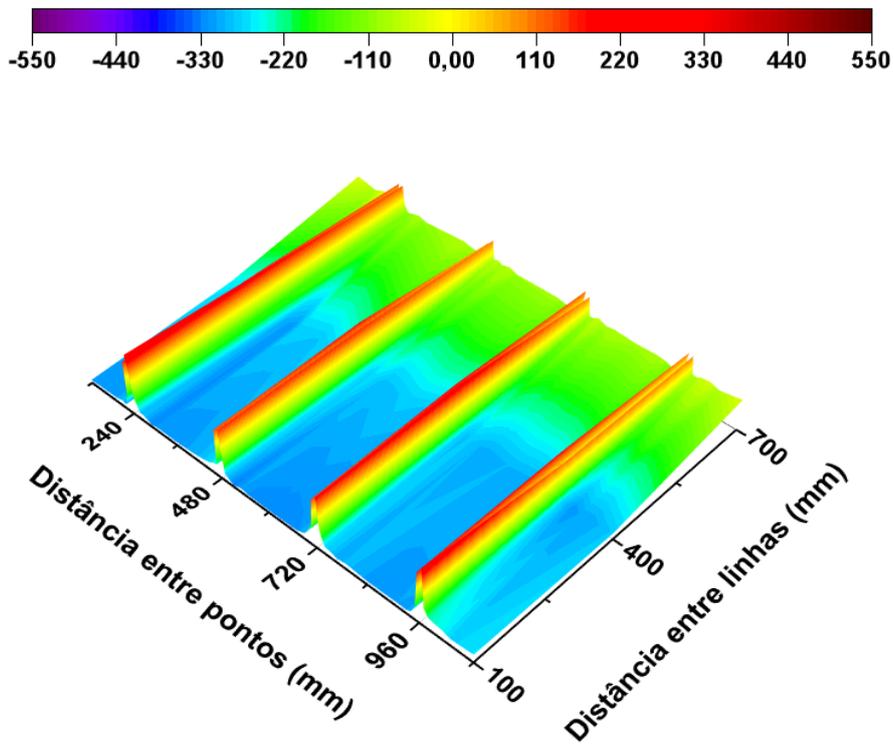


Figura 4.25 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Longitudinais Médias (σ_y) de cada sequência de soldagem. Fonte: Autor

Lembrando que as tensões residuais ótimas devem estar o mais próximo da linha neutra. Alguns autores tentam prever os níveis de tensão provocada pela soldagem, porém são quase impossíveis de se prever com exatidão, no entanto, sabe-se que as tensões residuais compressivas melhoram a resistência à fadiga em alguns componentes e que as tensões residuais trativas diminuem levando a falha por nucleação de trincas (ESTERMAN, et al. 1996; TORRES e VOORWALD, 2002 e WITHERS, 2007), e é esta a base das considerações destas análises.

b) Tensões residuais transversais (σ_y) nos painéis por DRX

Conforme a literatura, os valores de tensões residuais transversais são menos intensas que as tensões residuais longitudinais à solda, daí o princípio de que restrições longitudinais diminuem mais eficientemente as tensões residuais de soldagem (ESTEFEN et al. 2008). Porém, não menos importante é o seu estudo e análise. Os dados das medições das TR's transversais dos painéis soldados estão nas Tabelas 4.7, 4.8, 4.9, onde pode-se plotar os gráficos dos perfis 2D (Figuras 4.26, 4.28, 4.30 e 4.32) e as superfícies 3D (Figuras 4.27, 4.29, 4.31 e 4.33). Assim, das tensões residuais medidas é possível visualizar a similaridade entre os gráficos da SEQ01 e SEQ02 e a heterogeneidade da SEQ03. Através dos dados obtidos constatou-se que as TR's longitudinais possuem picos de 23,7% (tensões trativas) e 44% (tensões compressivas) maiores que as TR's no sentido transversal.

Tabela 4.7 – Dados de referência das medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor

Painel Soldado – Sequência01 – TR's Transversais			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
TR Trativas Máx. (MPa)	183,4	202,6	179,4
TR Compressivas Máx. (MPa)	-234,6	-218,6	-234
Média	-123,3	-104,0	-132,0
Desvio Padrão	127,2	132,4	119,7
Amplitude amostral	418	421,2	413,4

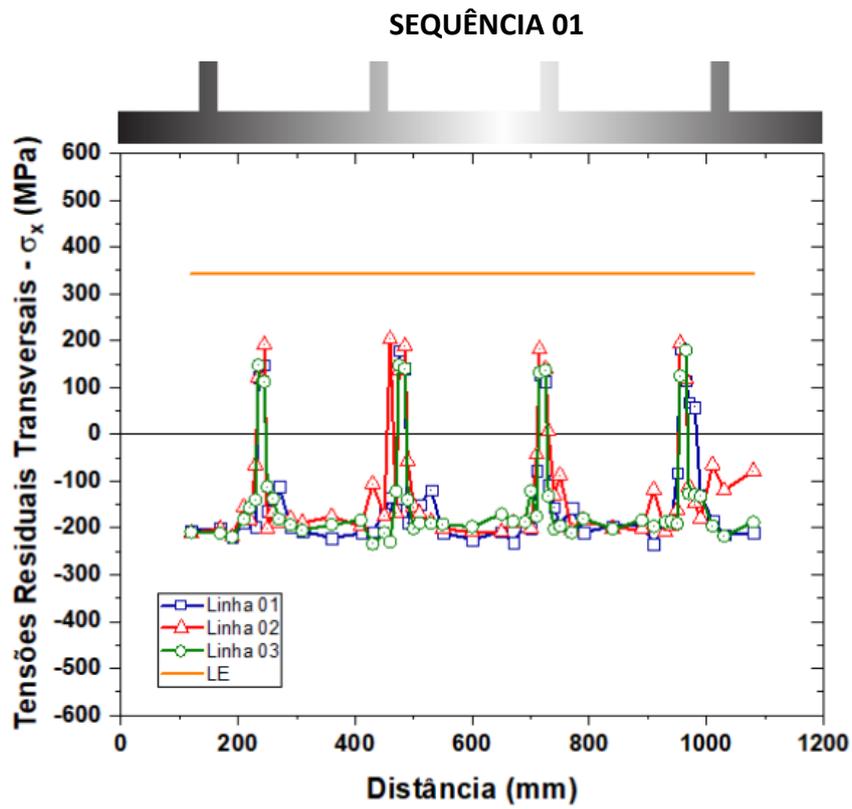


Figura 4.26 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor

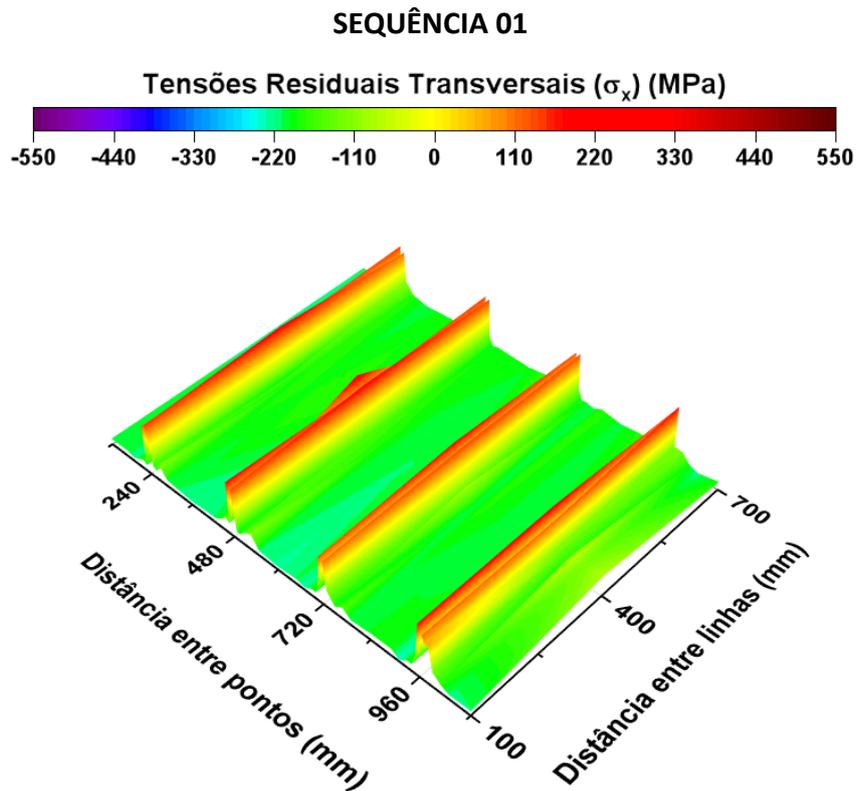


Figura 4.27 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência01.

Tabela 4.8 – Dados de referência das medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor

Painel Soldado – Sequência02 – TR's Transversais			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
TR Tratativas Máx. (MPa)	155,3	165,3	193,1
TR Compressivas Máx. (MPa)	-257,8	-268,3	-265
Média	-131,7	-131,8	-132,5
Desvio Padrão	123,6	129,2	137,3
Amplitude amostral	413,1	433,6	458,1

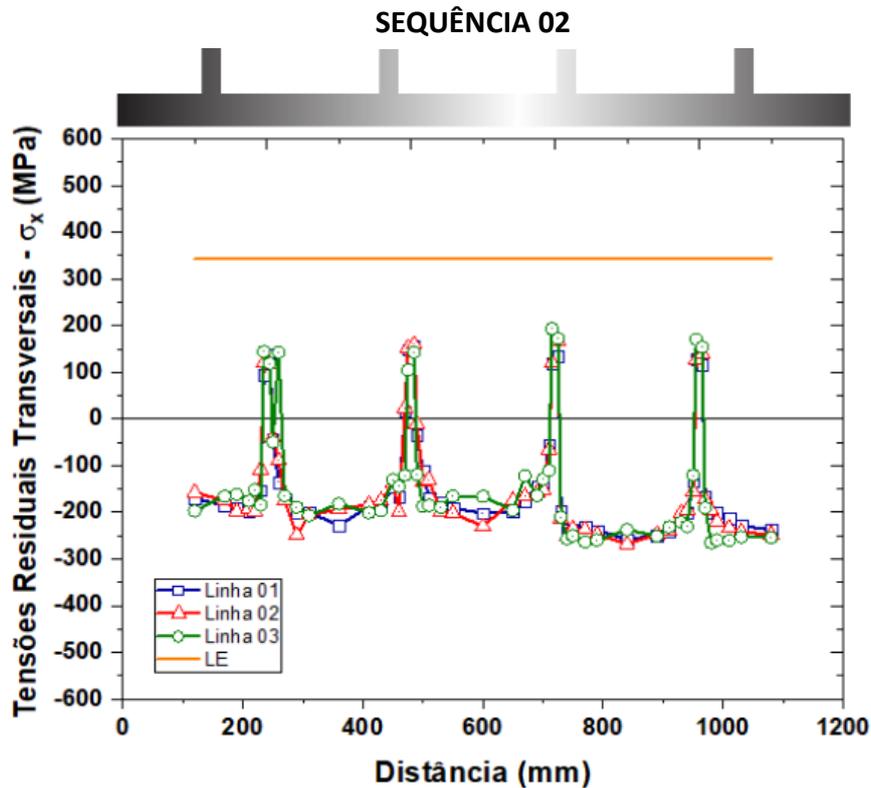


Figura 4.28 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor

SEQUÊNCIA 02

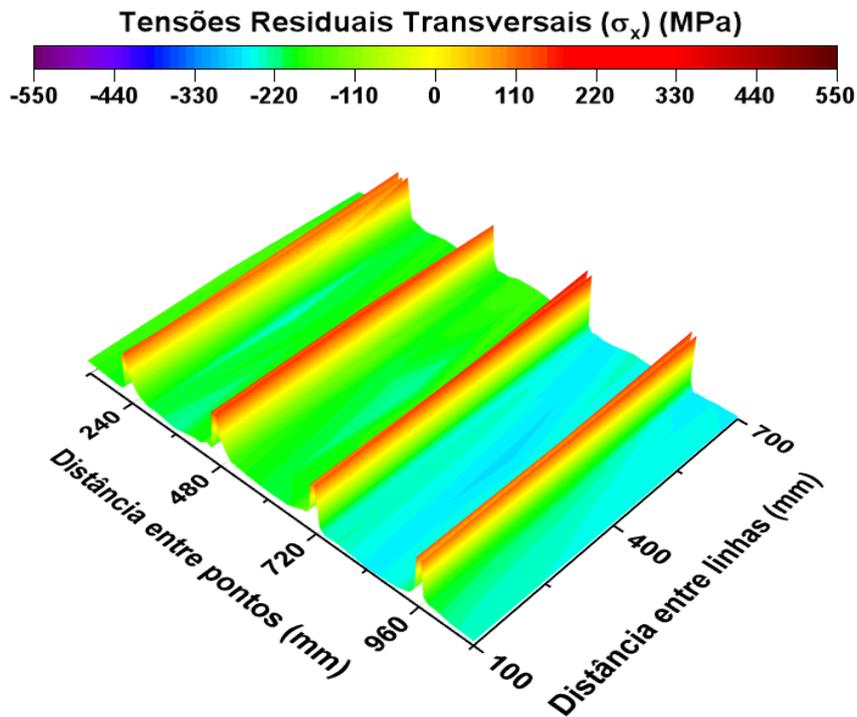


Figura 4.29 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor

Tabela 4.9 – Dados de referência das medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor

Painel Soldado – Sequência03 – TR's Transversais			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
TR Tratativas Máx. (MPa)	208,9	235,1	235
TR Compressivas Máx. (MPa)	-52	-11,3	19
Média	107,10	111,82	104,07
Desvio Padrão	61,8	50,4	47,6
Amplitude amostral	260,9	246,4	216

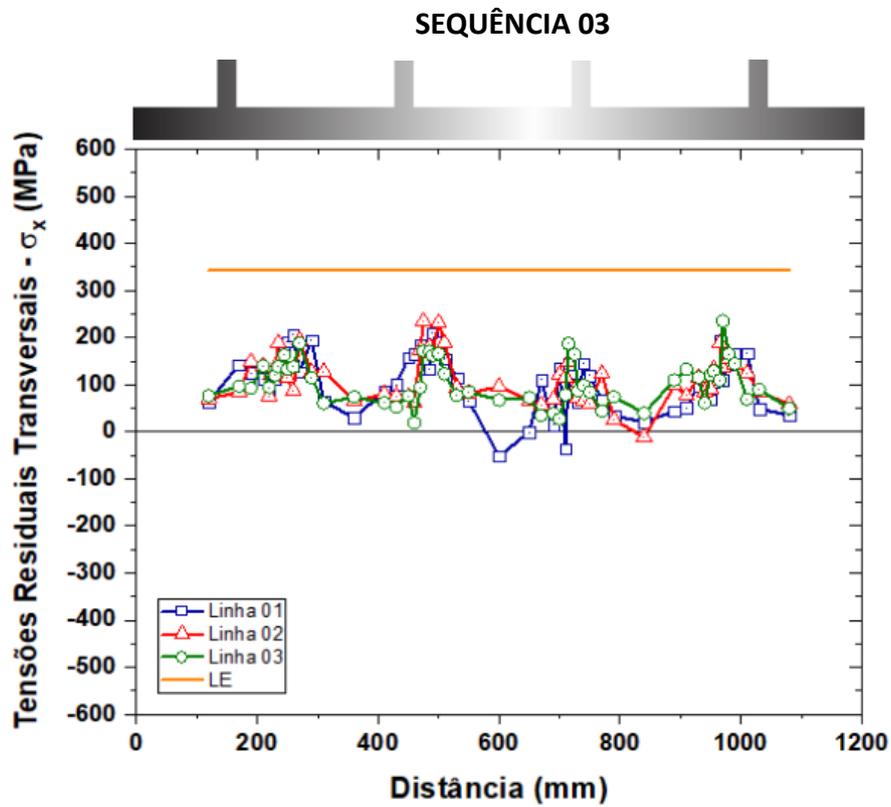


Figura 4.30 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor

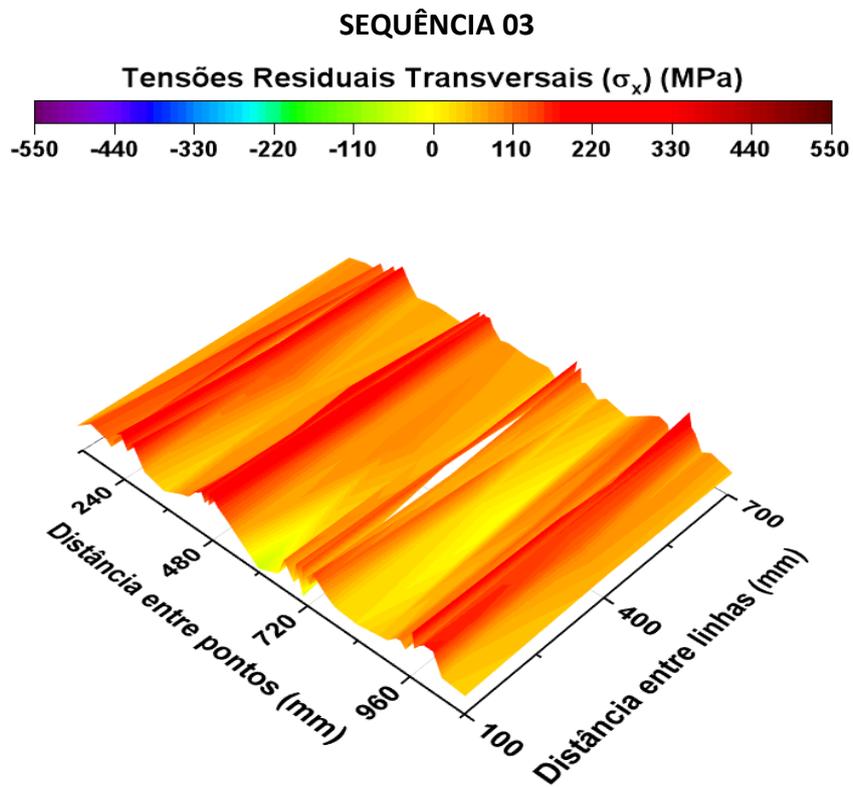


Figura 4.31 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Transversais (σ_x) do painel soldado com a Sequência03.

Contudo, os valores máximos de tensões residuais compressivas e trativas encontrados foram -268,3 MPa (linha02 da SEQ02 – Tabela 4.8) e 235,1 MPa (linhas 02 e 03 da SEQ03 – Tabela 4.9), respectivamente. A SEQ02, da mesma forma que apresentou uma anomalia na linha 02 para tensões residuais longitudinais, agora repetiu nas três linhas na mesma faixa a partir do enrijecedor St03 e St04, mostrando uma leve queda das tensões residuais compressivas para um valor médio de -260 MPa. Porém, de maneira geral, as tensões residuais compressivas no sentido transversal às soldas continuam baixas nos pontos de 1 a 4 (nas distâncias de 120 mm a 30 mm distante da solda – Figura 3.7b) com valores de -230 MPa, em média. E a partir dos pontos de 5 a 7 (20 mm até a ZTA – Figura 3.7b) ocorre a mudança das tensões compressivas para trativas, onde os picos de tensões trativas estão bem abaixo se comparados com os obtidos na medição das tensões residuais longitudinais.

No entanto, considerando os resultados da SEQ03, as tensões compressivas mantiveram-se próximas a da chapa de referência (-52 MPa, $\pm 3,5$ MPa), principalmente as localizadas entre os enrijecedores (St02/St03 e St03/St04). Entretanto, o valor máximo da tensão residual trativa encontrado foi nas linha02 e linha03 do painel da SEQ03. O que corresponde a quase 73% do limite de escoamento do material da chapa. Com apenas 11,5% maior que o valor encontrado do menor pico de tensão trativa encontrado para as TR's longitudinais. Um fato diferente ocorreu na linha 03 da SEQ03 para as tensões no sentido transversal, onde não ocorreram a presença de tensões residuais compressivas, apenas tensões trativas com o menor valor de 19 MPa. Dessa forma, conseqüentemente, também, as amplitudes amostrais foram menores, onde o maior valor foi de 458,1 MPa. Se comparado ao maior valor correspondente das TR's longitudinais este valor é 45% menor.

De outra maneira, a Figura 4.32, representa as curvas do gráfico 2D através do cálculo das médias dos valores de TR's transversais de cada sequência de soldagem evidenciando o perfil muito similar das SEQ01 e SEQ02 com valores de tensões compressivas e alguns pontos trativos e a SEQ03 com um perfil totalmente formado por tensões residuais trativas de até 200 MPa. Por outro lado, Figura 4.33, representa o perfil da superfície 3D plotando os valores médios das tensões transversais, isto é, o perfil encontrado provém da projeção estatística dos valores medidos. Com as mesmas considerações de sequências e linhas de medição utilizados no gráfico da Figura 4.25. As tensões residuais trativas da SEQ03 ocasionam a mudança do gradiente de tensões saindo

da cor verde com zonas azuladas para a cor amarela, ou seja, mudando de um perfil de tensões compressivas para tensões trativas.

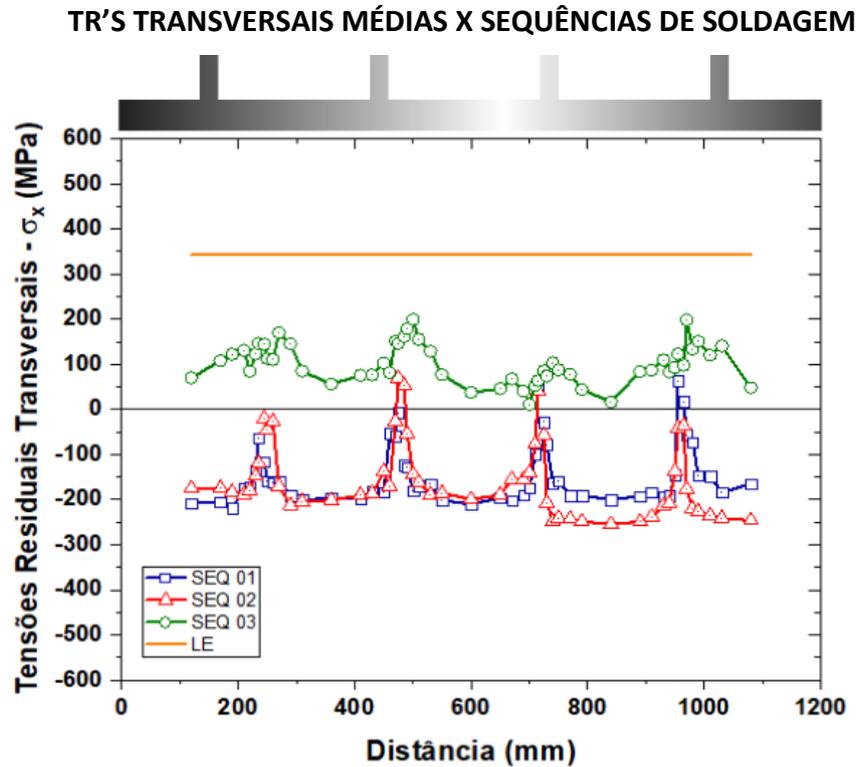


Figura 4.32 – Representação gráfica do perfil 2D das TR's Transversais Médias (σ_x) de cada sequência de soldagem. Fonte: Autor

A relação dos parâmetros de soldagem juntamente com o controle dimensional do painel enrijecido torna o trabalho dificultoso para se afirmar com veemência e isoladamente o real fator de interferência nos resultados, porém se baseando em trabalhos anteriores, pode-se afirmar que a velocidade de soldagem tem um efeito significativo na distribuição do calor para a formação das tensões residuais (TEKGOZ et al. 2015). O que afeta a energia de soldagem imposta, favorecendo para a elevação das tensões residuais medidas junto ao cordão de solda. O que também levou COLEGROVE et al. (2009) e KENNO et al. (2010) afirmarem que baixos valores de energia de soldagem aumentam ainda mais estas tensões trativas, o que pode ter influenciado de igual modo no comportamento das tensões residuais encontradas neste trabalho. Além disso, a energia de soldagem pode estar relacionada com os picos bem definidos dos resultados das tensões residuais longitudinais e transversais para todas as sequências soldadas, com

exceção para o comportamento da SEQ03, quanto ao perfil encontrado para as tensões residuais transversais.

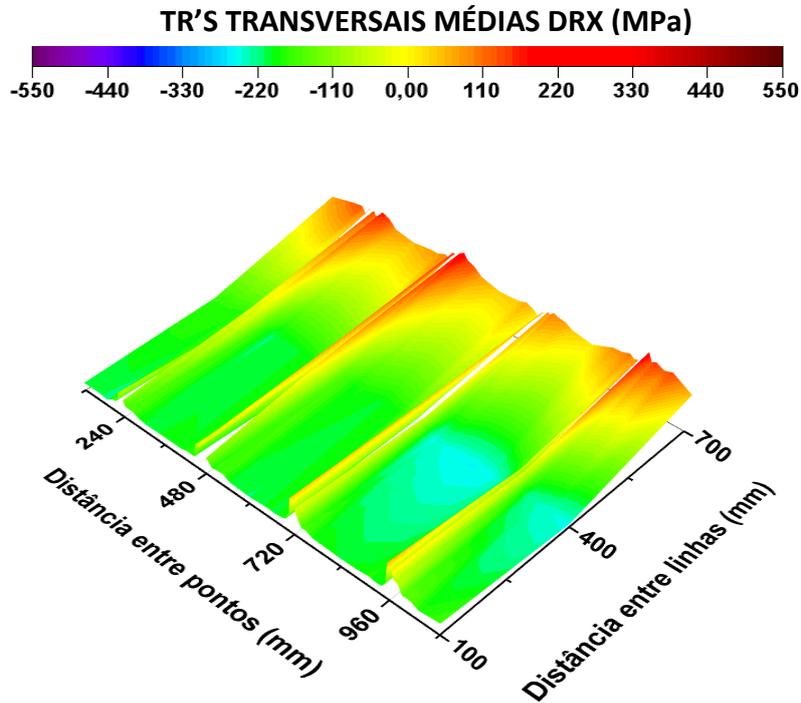


Figura 4.33 – Representação gráfica do perfil 3D das TR's Transversais Médias (σ_x) de cada sequência de soldagem. Fonte: Autor

Ainda assim, os baixos valores de energia de soldagem ajudaram na formação das tensões residuais predominantemente formadas por expansão volumétrica no caso deste tipo de aço (NITSCHKE-PAGEL e DILGER, 2014). De outra forma, o espaçamento entre os enrijecedores de 240 mm pode ter ajudado a diminuir o nível das tensões residuais encontrados, conforme KENNO et al. (2010), onde é afirmado que o aumento da distância entre enrijecedores para valores acima de 250 mm favorece para o aumento do pico de tensões trativas máximas. Assim, uma das formas de reduzir as tensões residuais trativas durante a fabricação é considerar no projeto de soldagem a relação entre a largura do cordão de solda e o comprimento de contração ou restrição mecânica imposta. Já as tensões residuais longitudinais entre os enrijecedores foram afetadas pela sequência de soldagem, conforme os resultados de KEIVANI et al. (2014) e GUO et al. (2016).

4.2.2.2 Etapa 02 - Calibração e medição na chapa de referência por BA

Antes de tratar dos resultados de tensões residuais por birrefringência propriamente ditos, pode-se afirmar que este método de medição é muito mais rápido e menos onerosa do que quando medida por difração de raios X. Além disso, pode-se considerar que é preciso um pré-tratamento mais demorado e minucioso para o DRX, enquanto o uso da birrefringência requer pouca preparação. Outro fator importante, é o custo, os equipamentos da birrefringência custam em média menos da metade que o valor de um difratômetro de raios X portátil para medir tensões residuais, porém, existem equipamentos de DRX cada vez menores e mais baratos. E também, um diferencial importante consiste na maior resolução espacial da área e profundidade de medição de um transdutor para um colimador, ou seja, 16 vezes maior para as condições deste trabalho. Finalmente, o mais importante é que os resultados possuem excelentes confiabilidade e aceitabilidade, mesmo considerando um comparativo arbitrário de valores, por diversas razões já mencionadas, mas os resultados a seguir falam por si só.

Assim sendo, a técnica da birrefringência foi utilizada para medir os tempos médios de percurso da onda ultrassônica nas direções paralela e transversal de uma chapa sem enrijecedores e de uma chapa com os enrijecedores, bem como encontrar os seus valores de birrefringências acústicas e posteriormente encontrar as tensões residuais. Logo, a partir dos valores de birrefringências considera-se o antes e após a soldagem sendo em seguida calculadas as diferenças de tensões residuais médias ($\sigma_y - \sigma_x$), ao longo das direções paralela e perpendicular às dimensões do painel, com o uso da equação 2.8. Lembrando do uso da constante acustoelástica do material como recebido ($-7,33 \times 10^{-6}$ (MPa)⁻¹), o mesmo valor obtido por COSTA (2017), ressaltando por se tratar do mesmo material.

Todos os dados do tempo de onda percorridos para encontrar os valores das tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) estão detalhados no Apêndice II. Assim, primeiramente, foram consideradas as medições em uma chapa do metal de base com as mesmas dimensões do painel e do mesmo espaço amostral de onde foram retiradas as que foram usadas para fabricar estes. Esta análise inicial, objetivou a avaliação das imperfeições iniciais de fabricação do material como recebido. Os valores da Tabela 4.10, representam os dados de referência quanto aos picos de tensões residuais trativas e compressivas de

cada linha onde foram medidas. Além dos valores médios, desvio padrão e amplitude amostral, ressaltando que este modelo de tabela é o mesmo ao longo do trabalho. Então, usando a tabela citada, observa-se que a maior diferença de tensão trativa na chapa de referência está na linha02 e a tensão compressiva pertence a linha03, sendo que ainda esta linha possui maior amplitude amostral, ou seja, maiores picos de tensões. Porém, a linha01 chama a atenção por apresentar valores pequenos de tensões, tanto trativas quanto compressivas, o que é excelente, indicando baixos níveis de tensões. Onde pela média, evidencia-se tensões quase nulas de apenas 4,29 MPa.

Tabela 4.10 –Valores de referência das TR's da chapa de referência, em MPa. Fonte: Autor

Chapa de Referência (BA)			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
$(\sigma_y - \sigma_x)$ Trativas Máx. (MPa)	34,94	59,58	103,38
$(\sigma_y - \sigma_x)$ Compressivas Máx. (MPa)	-20,28	-112,60	-6,67
Média	4,29	-28,01	36,70
Desvio Padrão	19,8	51,1	32,6
Amplitude amostral	55,22	172,18	110,06

Assim, considerando todos os pontos medidos (69 pontos em cada linha), foram plotados os gráficos dos perfis 2D (Figura 4.34) e a superfície 3D (Figura 4.35) em gradiente de cores representam os valores da diferença das tensões residuais da chapa de referência (tensões residuais longitudinais - σ_y e tensões residuais transversais - σ_x) ao longo das três linhas de medição no eixo X (Linha01, Linha02 e Linha03). Ressalta-se que, quando citados os termos: tensões, tensões residuais, tensões trativas, tensões compressivas, tensões longitudinais, tensões transversais, entre outros, estes estão se referindo diretamente às diferenças de tensões encontradas por birrefringência acústica.

Através do gráfico da Figura 4.36, os pontos com tensões trativas estão na linha02 e linha03, sendo que nesta está o maior valor de pico. A linha02, apresenta as tensões mais compressivas da chapa. Através do gráfico de superfície da Figura 4.37, têm-se os comportamentos listados acima em forma de gradiente de cores, onde observa-se ao centro a cor verde indicando exatamente os valores da linha02 (diferença de tensões trativas) e o restante da chapa predominantemente amarelo, com exceção de alguns pontos mais avermelhados indicando a presença de tensões trativas na linha03, à 700mm da chapa.

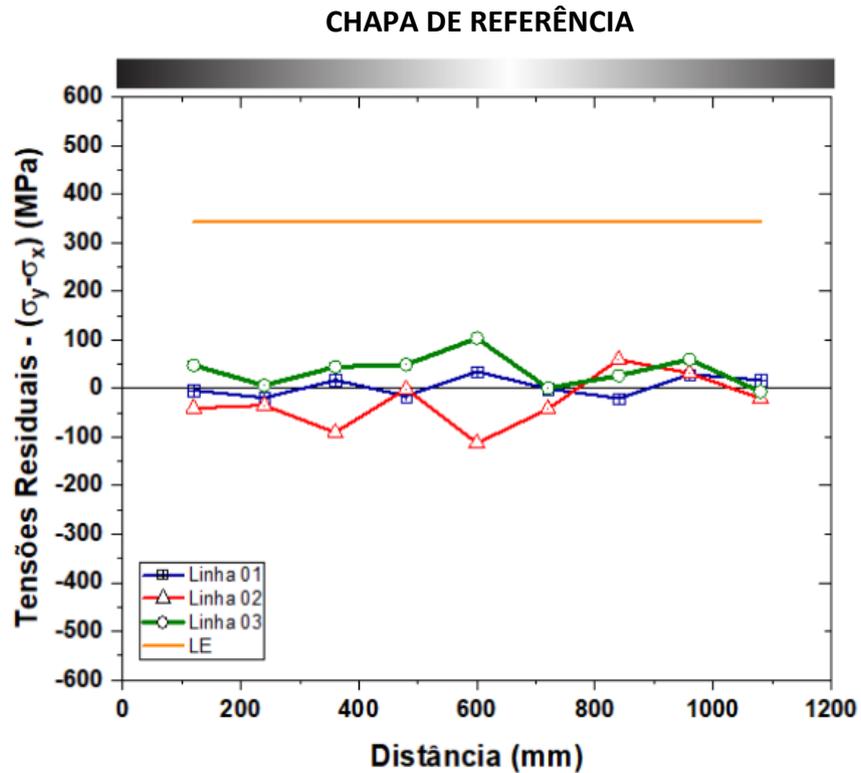


Figura 4.34 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) da chapa de referência medidas por BA. Fonte: Autor

No entanto, conforme mostrado no fluxograma da Figura 5.1, a melhor sequência soldada da etapa 1 foi utilizada para soldar 02 painéis com o processo CW-FCAW utilizando o percentual fixo de arame frio de 40%, empregando as velocidades de soldagem 100 cm/min e 120 cm/min e o painel soldado com FCAW da sequência 03 foi utilizado como parâmetro comparativo entre processos de soldagem.

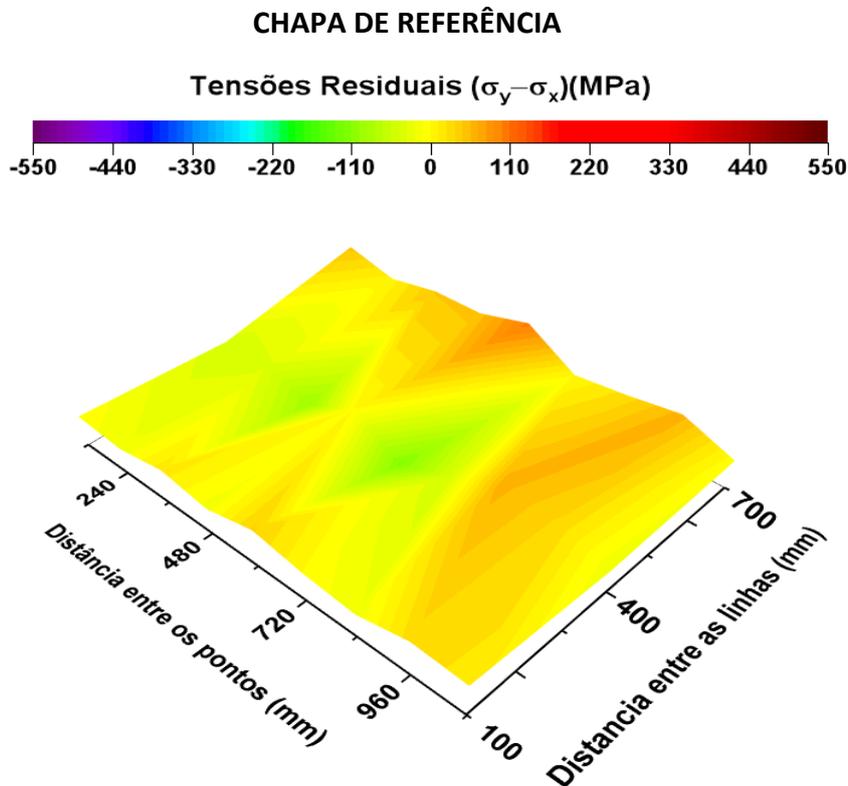


Figura 4.35 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) da chapa de referência medidas por BA. Fonte: Autor

Portanto, o painel com menores valores de distorções e tensões residuais da etapa01, foi o painel da SEQ03, assim este foi analisado utilizando o método do ultrassom por BA, onde os valores de referência estão dispostos na Tabela 4.11, de onde é possível obter as seguintes considerações: o pico de tensão mais trativo pertence a linha03, com o valor de 495,08 MPa, aproximadamente 34% maior que o pico da linha01 que foi o menor (327,68 MPa). Por outro lado, esta mesma linha, possui o pico de tensão residual mais compressiva medindo -490,08 MPa que corresponde a quase o pico de TR trativo. Ainda neste quesito, a linha 03, não apresentou TR's de caráter compressivo, sendo o menor valor 6,52 MPa, ou seja, tensão quase zero. Porém, a média para esta linha mostrou uma média bem elevada de 155,80 MPa, o que pode favorecer para o desencadeamento de falhas. E também, para a linha02 ocorre um comportamento que vale destacar, onde o valor de TR compressiva corresponde a uma diferença de 200 MPa comparado ao pico, sendo um gradiente bem significativo, mas que favorece o painel em determinadas situações. Outra característica marcante, corresponde a amplitude amostral de 817,76 MPa, ou seja, indo do ponto mais baixo para o mais elevado de TR é possível dizer que as tensões variam de um comportamento extremo ao outro na linha01.

Tabela 4.11 –Valores de referência da diferença de tensões residuais do painel soldado FCAW (SEQ03), em MPa. Fonte: Autor

FCAW – SEQ03 (BA)			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
$(\sigma_y - \sigma_x)$ Trativas Máx. (MPa)	327,68	404,12	495,08
$(\sigma_y - \sigma_x)$ Compressivas Máx. (MPa)	-490,08	-239,00	6,52
Média	-180,92	-31,17	155,80
Desvio Padrão	126,76	129,97	98,17
Amplitude amostral	817,76	643,12	488,56

Logo, o comportamento representado pelos valores da Tabela 4.11 pode ser visualizado no gráfico 2D da Figura 4.36, sendo notória a presença dos picos e a grande variação das TR's ao longo das linhas, sendo a linha 01 e a linha02 com comportamento similar e a linha 03, com tensões totalmente trativas, como citado anteriormente. No gráfico da Figura 4.37, a superfície representa claramente o gradiente de tensões pela diferença de cores, partindo da linha01 (região mais verde de -220MPa a -110 MPa com zonas azuis escuras de tensões compressivas mais intensas, em torno de -440MPa) crescendo na linha02 (mudança da cor verde para amarela, região levemente trativa chegando a tensões maiores na linha03 (predominantemente na cor vermelha, com pico de até 495 MPa).

Outra consideração importante, é a presença da cor vermelha próxima aos enrijecedores, causada obviamente pelo calor das soldas depositadas. A sequência utilizada, considerando que as soldas do duplo filete dos enrijecedores mais ao meio (st02 e st03) foram em sentido contrário possivelmente provocaram a atenuação das tensões residuais, enquanto para os enrijecedores das bordas do painel (st01 e st04), onde as soldadas foram aplicadas no mesmo sentido favoreceram para o aumento das tensões residuais nestas regiões, conforme a Figura 4.37.

FCAW ROBOTIZADO (SEQ03)

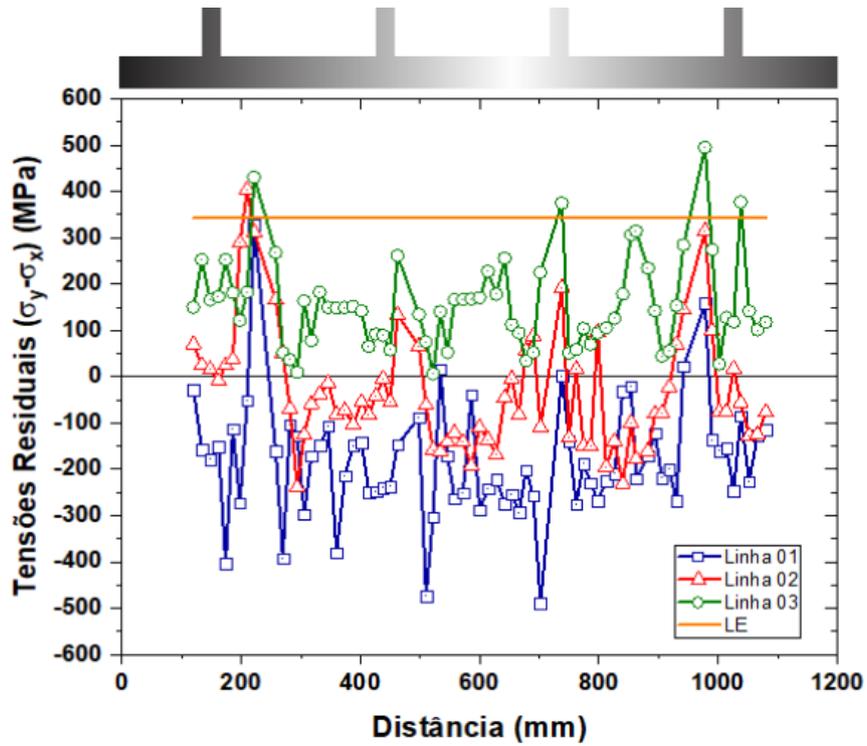


Figura 4.36 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais $(\sigma_y - \sigma_x)$ do painel soldado com FCAW robotizado (SEQ03) medidas por BA. Fonte: Autor

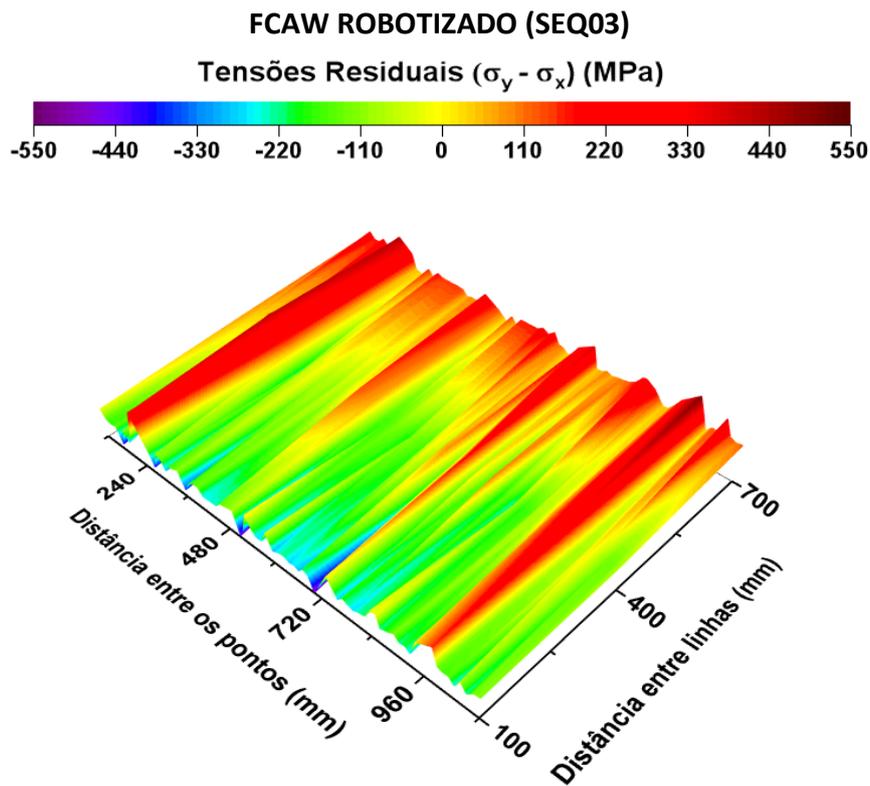


Figura 4.37 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais $(\sigma_y - \sigma_x)$ do painel soldado com FCAW robotizado (SEQ03) medidas por BA. Fonte: Autor

A tese levantada baseia-se na hipótese de que a energia de soldagem (ou calor imposto) atua como parcela significativa na inserção de fatores metalúrgicos para o aumento das distorções e tensões residuais produzidas pelo processo de soldagem nos painéis enrijecidos. Assim com a aplicação da técnica CW-FCAW, baseado em outros trabalhos considera-se que arame frio adicionado ajuda a “desviar” uma parcela não quantificada do calor imposto movido para a sua fusão e incorporação no metal de solda. Desta forma, os níveis de velocidade de soldagem também ajudam a diminuir a energia de soldagem uma vez que possuem relação inversa. Por isso, utilizou-se duas velocidades de soldagem para aplicação do CW-FCAW, a primeira velocidade igual a soldada inicialmente, 100 cm/min e a outra a 120 cm/min.

Logo, após a soldagem com o processo CW-FCAW, mediu-se a diferença das tensões residuais dos painéis aplicando a técnica de ultrassom por birrefringência acústica. Para a velocidade de soldagem de 100 cm/min, foram encontrados os seguintes valores da Tabela 4.12. Diretamente, o valor do pico de tensão trativa chama atenção por ser muito elevado (503,35 MPa), porém similar aos resultados dos picos encontrados por YANG et al. (2019) para o mesmo aço, presente na linha01. Este valor está a 17 MPa do LRT do material; a linha02 possui um pico considerável de 479,10 MPa, mas o ideal seria o encontrado na linha03 de 154,38 MPa. O maior pico de tensão trativa corresponde a 70% a mais que o menor, além também de ser 35% maior que o limite de escoamento do material. Ou seja, a região deste ponto, possui forte tendência a falha por este valor tão elevado.

O painel soldado possui forças trativas tão elevadas que as mesmas linhas (linha01 e linha02) com maiores picos trativos, não apresentaram tensões compressivas, os valores de pico menos intensos foram 137,17 MPa e 162,58 MPa, respectivamente. Sendo a linha03, a que possui o menor pico de tensão compressiva de fato, -76,94 MPa. Este painel, por linha de medição, apresentou valores predominantemente trativos com algumas exceções compressivas na linha03, como pode ser visualizado no gráfico da Figura 4.38. Podendo ser observado uma similaridade grande da linha de tendência entre os pontos de cada linha de medição (linha01 e linha02), onde as amplitudes amostrais da Tabela 4.12 e a Figura 4.38 demonstram o que está sendo descrito. Porém, a linha03 comporta-se à parte com valores e picos menores.

Tabela 4.12 –Valores de referência da diferença das tensões residuais do painel soldado com CW-FCAW com velocidade de soldagem de 100 cm/min, em MPa. Fonte: Autor

CW-FCAW 100 cm/min (BA)			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
$(\sigma_y - \sigma_x)$ Tativas Máx. (MPa)	503,35	479,10	154,38
$(\sigma_y - \sigma_x)$ Compressivas Máx. (MPa)	137,17	162,58	-76,94
Média	312,88	263,48	43,77
Desvio Padrão	70,73	71,65	48,33
Amplitude amostral	640,52	641,69	231,32

Na Figura 4.39, o gráfico de superfície representa os resultados através do gradiente de cores relacionando aos níveis de tensões residuais, onde pode-se notar a predominância da cor vermelha (faixa de tensões um pouco acima de 440 MPa) e um tom vermelho mais forte ao centro da chapa, indicando a presença dos picos de tensões tativas da linha02. A cor amarela da borda (TR's abaixo de 100 MPa), refere-se as tensões presentes na linha03. A presença de tensões tativas elevadas não se limita apenas às regiões próximas a região das soldas e sim de uma forma generalizada. Porém, a linha03, apesar de excêntrica, possui um comportamento quase igual ao teoricamente desejado pela sua amplitude amostral baixíssima e valores de tensões nulos ou quase nulos.

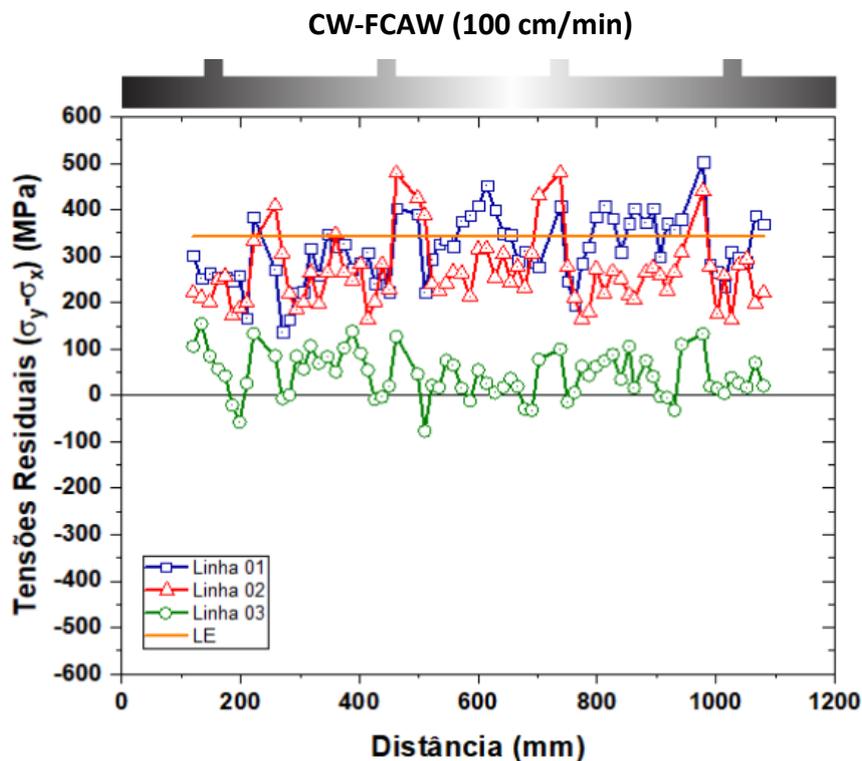


Figura 4.38 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com CW-FCAW (100 cm/min) medidas por BA. Fonte: Autor

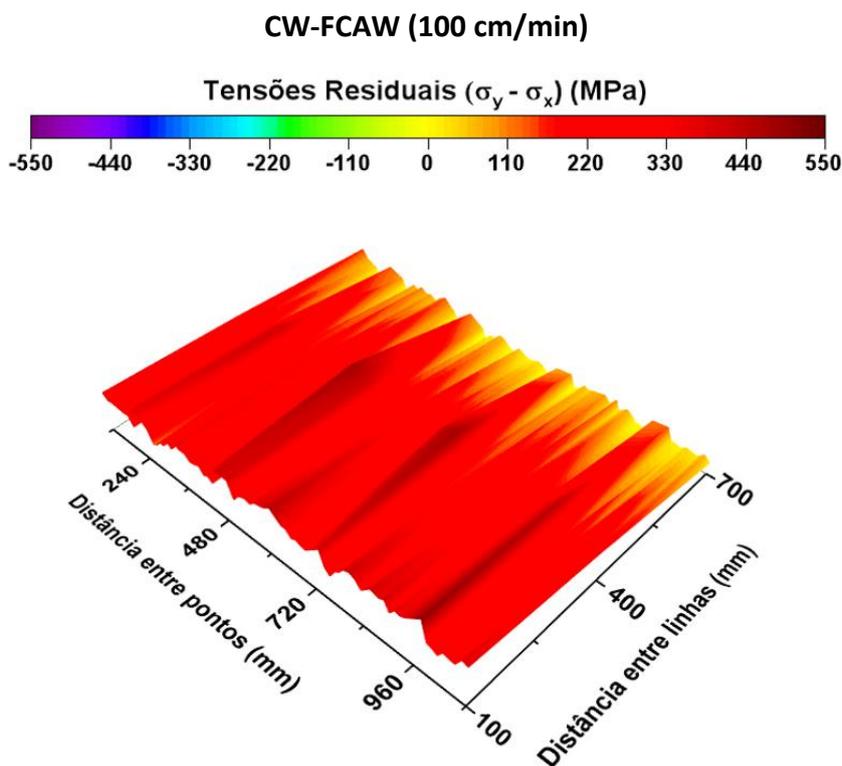


Figura 4.39 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com CW-FCAW (100 cm/min) medidas por BA. Fonte: Autor

Na Tabela 4.13, dispõe-se os dados encontrados na medição por birrefringência das diferenças de tensões residuais do painel soldado com CW-FCAW a 120 cm/min (velocidade de soldagem). Diferentemente, das condições descritas do painel anterior, este painel apresentou tensões residuais mais comuns e até mais brandas, percebe-se que a amplitude amostral mais elevada possui 397,33 MPa, na linha01, sendo também 290,87 MPa na linha02 e um comportamento bem diferenciado para a linha03, onde os dados são todos compressivos, com uma amplitude de -241,65 MPa. Inclusive, o pico de tensões compressivas está nesta linha com um valor de -303,59 MPa.

Sob o mesmo ponto de vista, o pico de tensões trativas nesta mesma linha03, não existe, sendo um valor compressivo de -61,95 MPa, porém, embora exista o pico mais trativo, este é um valor bem abaixo do painel soldado com 100 cm/min, de 314,53 MPa na linha 01. Este valor corresponde a quase 92% do valor total do LE (342,2 MPa) e corresponde a 60% do LRT. A média, desconsiderando a linha03 por suas características

anormais, possui valores relativamente mais baixos, na faixa de 100 MPa a 190 MPa, para as linha01 e linha02.

Tabela 4.13 –Valores de referência da diferença das tensões residuais do painel soldado com CW-FCAW com velocidade de soldagem de 120 cm/min, em MPa. Fonte: Autor

CW-FCAW 120 cm/min (BA)			
Valores de Referência	Linha01	Linha02	Linha03
$(\sigma_y - \sigma_x)$ Tativas Máx. (MPa)	314,53	275,79	-61,95
$(\sigma_y - \sigma_x)$ Compressivas Máx. (MPa)	82,81	15,08	-303,59
Média	191,67	107,46	-189,77
Desvio Padrão	45,22	55,09	57,82
Amplitude amostral	397,33	290,87	-241,65

O gráfico da Figura 4.40, expõe melhor os dados descritos anteriormente, onde observa-se a presença de picos de tensões menores. A linha01 e linha02 possuem valores de TR's mais trativos, em que a linha01 possui valores na faixa de 200 MPa e a linha02, possui valores mais baixos, na faixa de 100 MPa ou quase nulos, principalmente entre os enrijecedores st01 e st02. A linha03 apresenta comportamento totalmente compressivo, conforme a Figura 4.40. Salienta-se ainda que, os mesmos dados plotados na superfície 3D da Figura 4.41, mostram as tensões decrescendo conforme a ordem crescente das linhas de medição. As tensões residuais da linha 01 estão na cor vermelha na faixa de 330 MPa a 440 MPa, indo para a linha02 ocorre uma mudança de cor para o amarelo, tensões próximas das tensões nulas. E finalmente, a linha03 possui cor verde com algumas regiões mais azuis, fato este referente a presença de tensões predominantemente compressivas (na faixa de -110 MPa a -220 MPa).

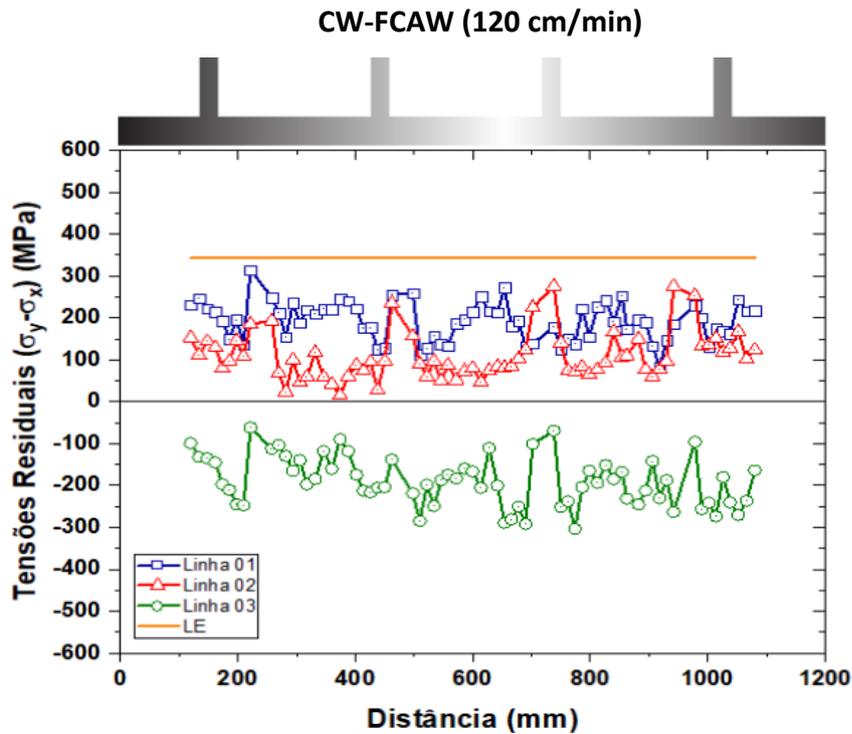


Figura 4.40 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com CW-FCAW (120 cm/min) medidas por BA. Fonte: Autor

Fazendo uma análise visual, o painel FCAW e as duas condições CW-FCAW utilizando as Figuras 4.39, 4.41 e 4.43 das superfícies 3D, pode-se perceber que estes dois apresentam quase comportamento inverso ao FCAW quanto ao perfil de tensões comparando as cores de cada painel. Podendo ainda observar que, o painel soldado com a velocidade de soldagem de 120 cm/min possui semelhanças visuais ao painel 100 cm/min CW-FCAW, com menores TR's, mas indicando o mesmo sentido de decréscimo destas tensões da linha 03 para linha 01.

Por outro lado, levando em consideração os valores médios das TR's de cada painel medido por birrefringência, atribuindo a linha 01 ao painel FCAW, e a linha 02 e linha 03, às condições CW-FCAW de 100 cm/min e 120 cm/min, respectivamente, foram plotadas as curvas 2D (Figura 4.42) e 3D (Figura 4.43). Esta é uma curva idealizada com os valores médios.

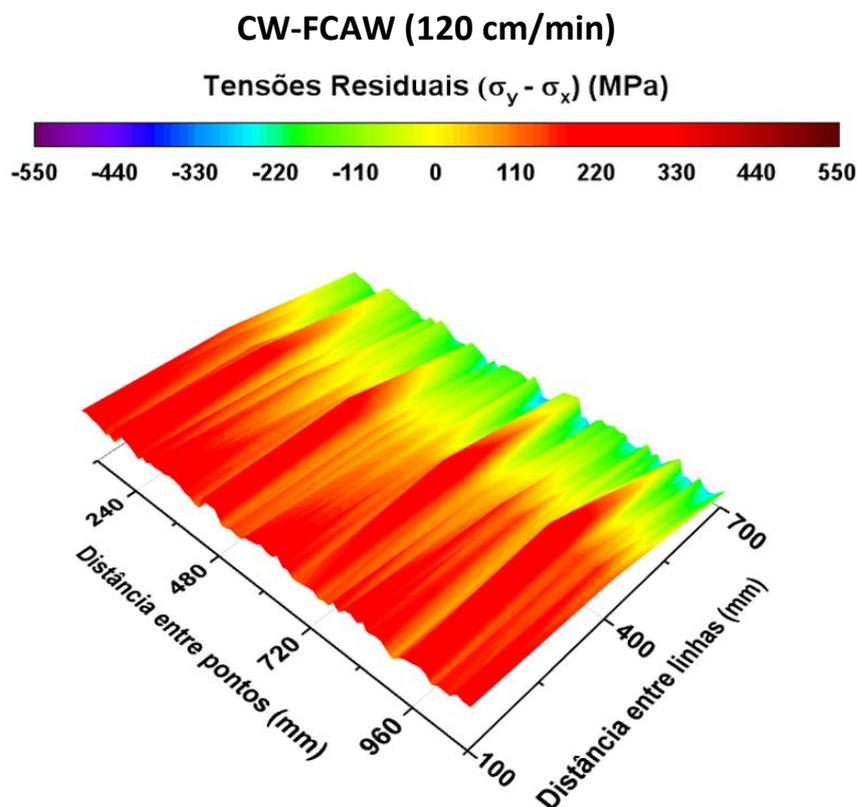


Figura 4.41 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais ($\sigma_y - \sigma_x$) do painel soldado com CW-FCAW (120 cm/min) medidas por BA. Fonte: Autor

Utilizando a Figura 4.42, nota-se a predominância das TR's trativas, mesmo sendo médias no painel CW-FCAW com velocidade de soldagem de 100 cm/min, e o decaimento das tensões para o painel FCAW e CW-FCAW (120 cm/min). Através do gradiente de tensões da Figura 4.43, a cor vermelha indica as TR's trativas predominantes da condição CW-FCAW (100 cm/min) e as bordas das linhas 01 e linha 03, com TR's compressivas próximas a linha neutra, presentes nas condições FCAW (SEQ03) e CW-FCAW (120 cm/min), respectivamente. Ou seja, caso a superfície da Figura 4.43, permanecesse com as condições da CW-FCAW (100 cm/min) similares as demais situações encontradas nos outros parâmetros de soldagem, poder-se-ia dizer que teríamos a condição otimizada de todo trabalho realizado. Porém, ao menos a situação do painel CW-FCAW (120 cm/min) é excelente com relação ao painel FCAW escolhido como referência, mostrando ligeira vantagem quanto este.

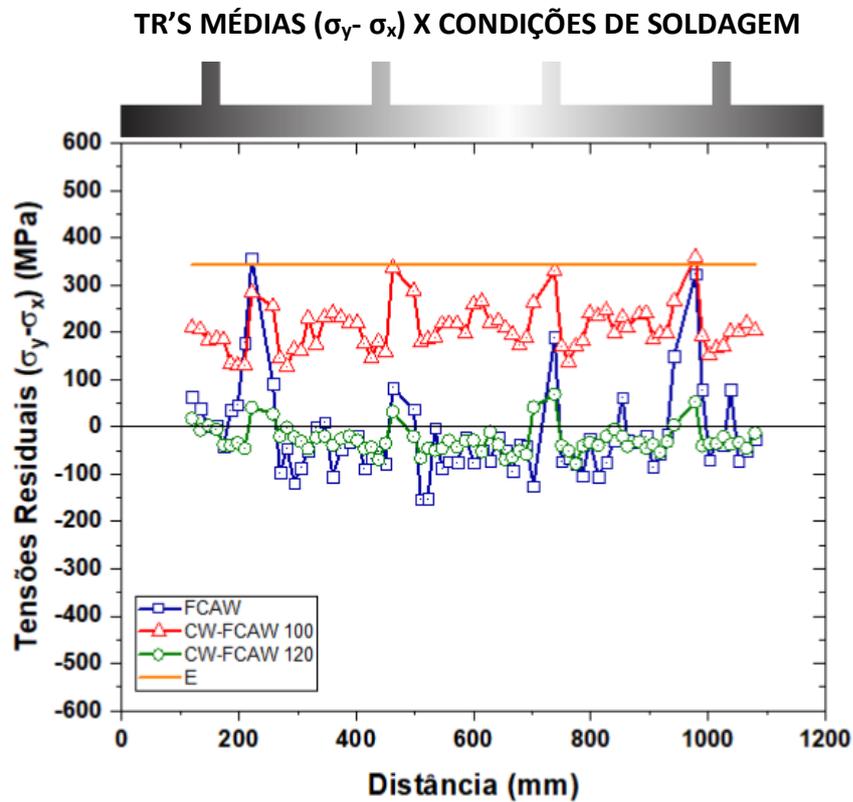


Figura 4.42 – Representação gráfica do perfil 2D da diferença de tensões residuais médias ($\sigma_y - \sigma_x$) dos painéis soldados com FCAW e CW-FCAW medidas por BA. Fonte: Autor

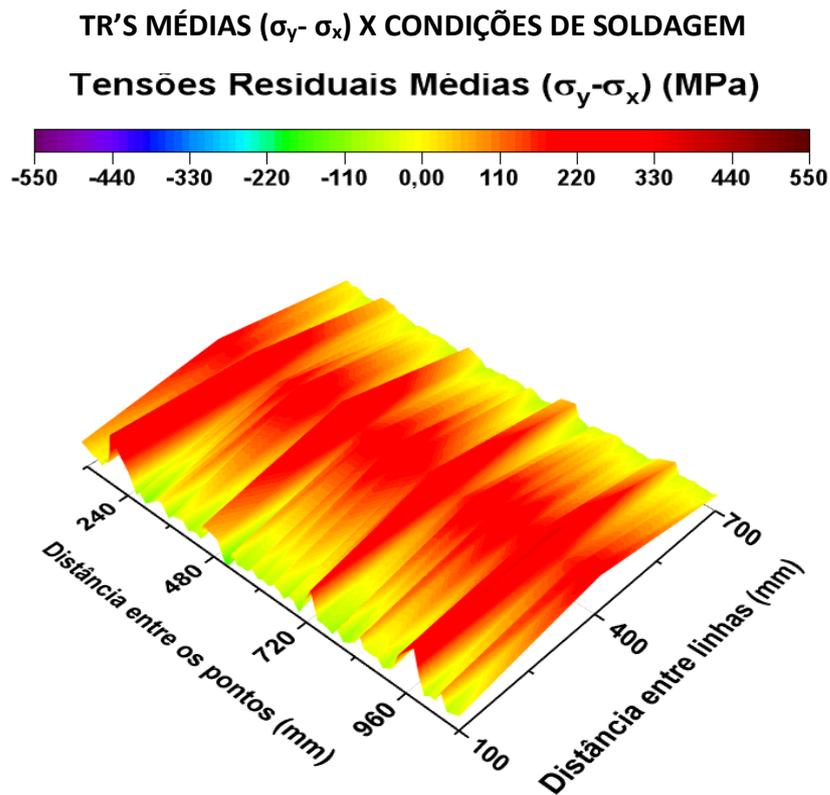


Figura 4.43 – Representação gráfica do perfil 3D da diferença de tensões residuais médias ($\sigma_y - \sigma_x$) dos painéis soldados com FCAW e CW-FCAW medidas por BA. Fonte: Autor

4.2.2.3 Comparativo das tensões residuais da chapa de referência por DRX e BA

Os comparativos considerados serão apenas para que haja uma concordância ou suplementação entre os resultados apresentados, tornando a análise mais interessante e dentro das mínimas possibilidades de consolidação do estudo realizado. Ressaltando mais uma vez que os métodos de medição são do mesmo grupo técnico (ensaios não destrutivos), porém utilizam princípios de análise distintos como resolução espacial (colimador e transdutor) e diferente profundidade medida, além dos resultados informados, onde a difração fornece um resultado de tensão principal e a birrefringência uma diferença de tensões principais em direções ortotrópicas.

Primeiramente, a chapa de referência consiste em um dado bastante relevante quando se considera as tensões residuais e distorções de soldagem, porém quanto antes for realizado esse controle, melhor os resultados. Assim, mesmo as condições das técnicas de medição de tensões residuais serem diferentes, comparar os resultados ajuda a perceber a proximidade do campo de tensões residuais iniciais nas superfícies (medido por DRX) e ao longo da espessura da chapa (medido por BA).

Adotando os pontos de medição com DRX as mesmas regiões da chapa medidas com BA (por ter menos pontos medidos deste), admitindo-se as médias das tensões residuais de cada método mensurado nas três linhas, foram plotadas no gráfico da Figura 4.44, onde é possível observar que as TR's medidas por DRX são mais trativas e as medidas por BA são mais compressivas. Estes comportamentos adquiridos são totalmente interferidos pela profundidade ou espessura medida. Onde aquelas tensões residuais dão o perfil de superfície e estes o perfil de toda a espessura da chapa. Mas que ambos apresentam um perfil de TR's quase similares em magnitude, estando bem próximo da linha neutra.

Entretanto, a Figura 4.45, mostra a imagem da superfície 3D considerando o gradiente de TR's da chapa de referência medida por ambos os métodos utilizados no trabalho, onde percebe-se que há predominância das tensões moderadas na faixa de -50 MPa a 50 MPa (cor amarela) e pico de até 90 MPa (cor laranja) nas duas superfícies. Porém, há picos de tensões trativas (até 150 MPa - região vermelha) na linha 03 e picos de tensões compressivas (próximo de -150 MPa, cor verde) na linha 02 mais ao centro na superfície medida por BA. Estes pontos medidos podem ser descartados por serem

exceções e não representarem o comportamento globalizado. Sendo que, portanto, as medições foram muito parecidas quanto aos valores encontrados e de baixa intensidade muito próximo a linha neutra para ambos os métodos utilizados. Permitindo assim, afirmar que, a chapa de referência está em condições muito próximas a ideal, com tensões residuais quase nulas, condição esta alcançada apenas realizando tratamento térmico.

TR'S MÉDIAS DA CHAPA DE REFERÊNCIA X MÉTODO DE MEDIÇÃO

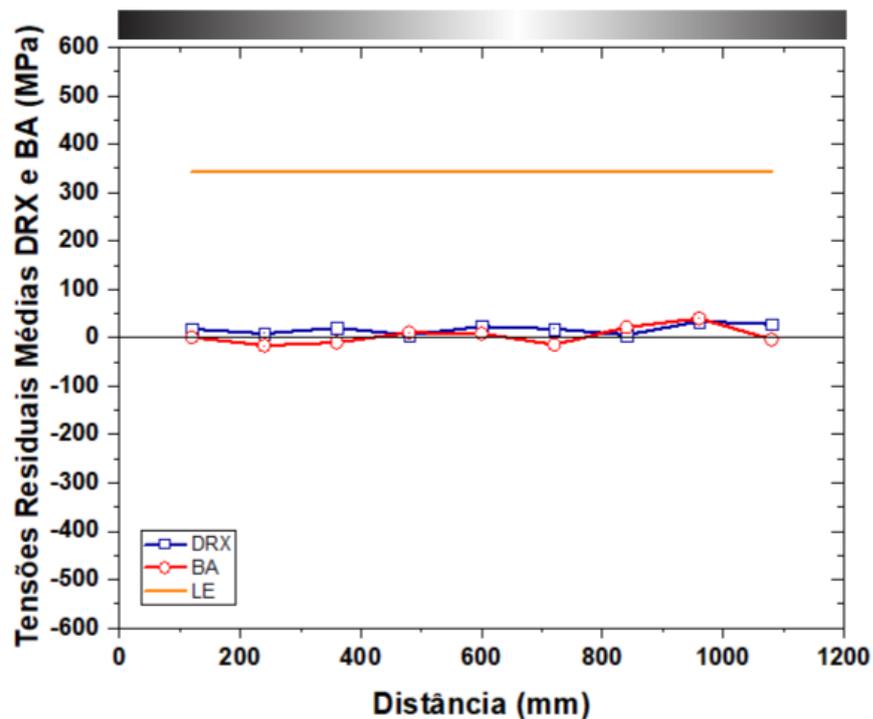


Figura 4.44 – Representação gráfica do perfil 2D das tensões residuais médias da chapa de referência medidas por DRX e BA. Fonte: Autor

Finalmente, para os resultados acima considerados, PARK e LEE (2007) mostraram que as tensões residuais iniciais da chapa, produzidas através da laminação não afetam as distorções e nem as tensões residuais de soldagem. Embora, no trabalho de PARK e WOO (2018), para chapas grossas (25mm e 70 mm), apenas as tensões compressivas de solda podem ser alteradas pelas variações de tensões iniciais (compressivas ou trativas), sem grandes efeitos. A literatura afirma que as tensões de fabricação conforme vão se afastando do cordão tornam-se mais dominantes. Neste trabalho, as tensões de soldagem foram predominantes, devido ao espaçamento entre

apresentados anteriormente serão combinados para melhores considerações comparativas.

Logo, a Figura 4.46, corresponde a plotagem dos pontos médios das tensões residuais medidos por difração de raios X e birrefringência acústica, sendo possível observar que as tensões residuais médias obtidas por BA estão próximas as TR longitudinais medidas por DRX, ambas com caráter quase que puramente de tensões compressivas, salve algumas exceções quanto aos picos trativos próximos à região da solda. E apesar das TR's transversais serem trativas com alguns pontos quase nulos, o comportamento das TR's medidas com BA estão localizadas entre os picos das tensões residuais transversais (natureza trativa) e das tensões residuais longitudinais (natureza compressiva) medidas por DRX. Ou seja, os valores encontrados estão em conformidade mesmo com técnicas de avaliação diferentes aplicada ao material.

A Figura 4.47, representa o comparativo das superfícies 3D dos gradientes de tensões, onde as seções a e b, são as medidas por DRX e c, por BA. Onde a diferença de TR's encontradas por BA mostram que o gradiente de tensões possui predominância de TR's compressivas entre os enrijecedores e TR's trativas próximas a solda, mostrando quase a fusão das parcelas longitudinais e transversais obtidas por DRX. Além disso, é permissível dizer que a técnica de birrefringência acústica pode e tem um potencial de aplicação para medir TR's em painéis enrijecidos de maneira prática e mais rápida que quando medida por DRX. Mas que não anula ou desconsidera as medições feitas por este equipamento, e sim se complementam pela concordância entre os resultados obtidos.

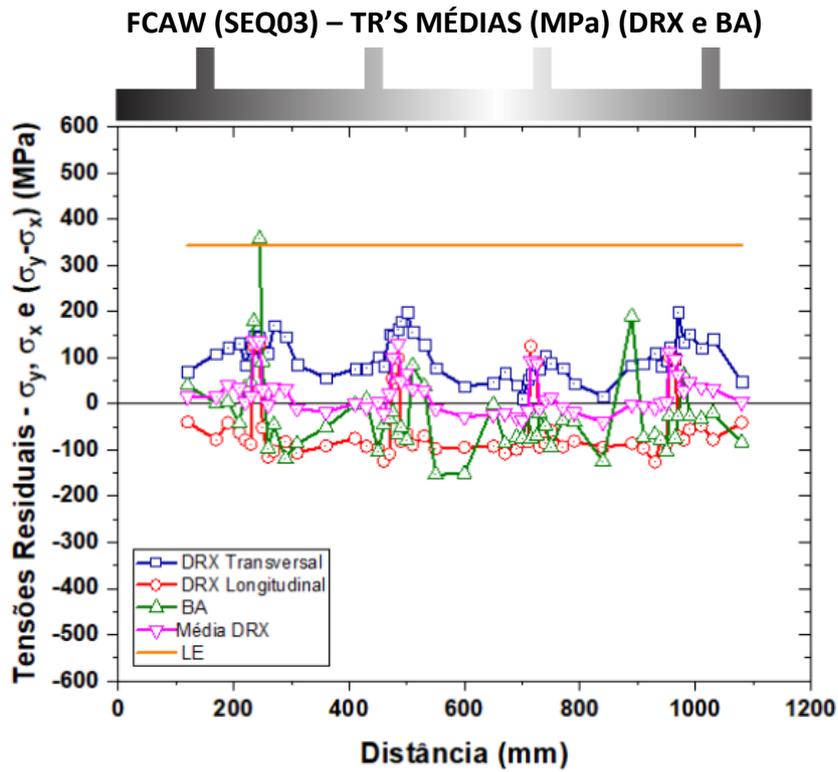


Figura 4.46 - Representação gráfica do perfil 2D das tensões residuais médias do painel soldado com FCAW e SEQ03 medidas por DRX e BA. Fonte: Autor

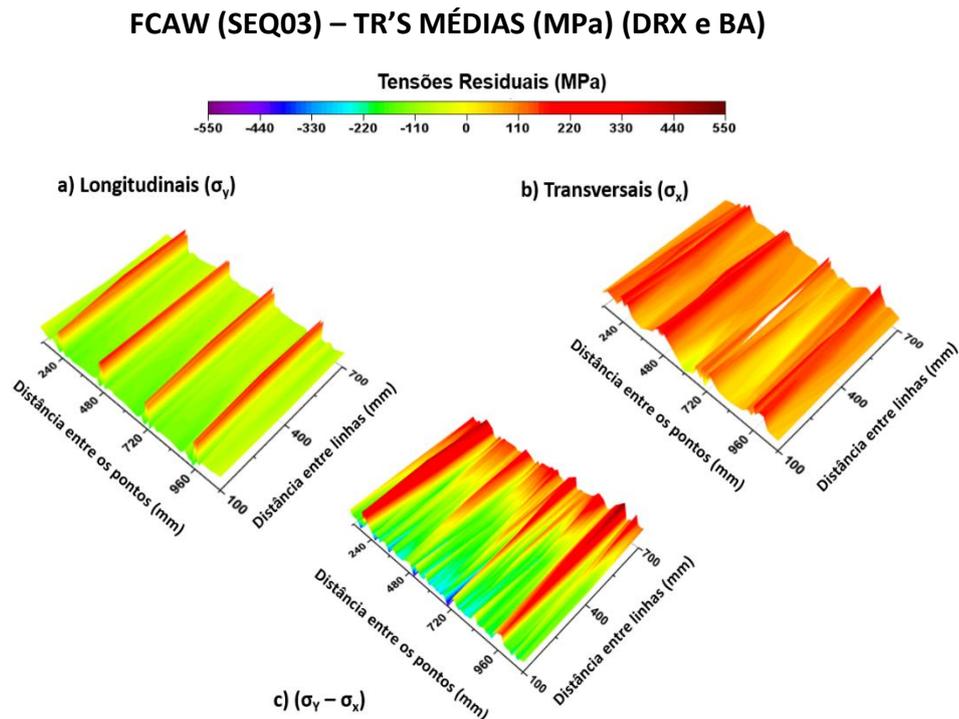


Figura 4.47 – Representação gráfica do perfil 3D das tensões residuais da chapa do painel soldado com FCAW e Sequência03: (a) e (b) medidas por difração de raios X e (c) medida por birrefringência acústica. Fonte: Autor

4.2.2.5 Comparativo das tensões residuais entre os painéis soldados com FCAW robotizado e CW-FCAW

Como já discutido, as tensões residuais longitudinais são mais intensas que as tensões transversais quando medidas próximas a uma junta soldada. Porém, para os painéis considerados, as TR's longitudinais ao cordão de solda estão na mesma direção das tensões que favorecem para o movimento de flexão de viga, o que torna estas tensões muito perigosas, dependendo de sua montagem posterior e das forças aplicadas ao painel.

Entretanto, as TR's transversais ao cordão de solda, mesmo sendo de menores intensidades, se não controladas, favorecem para acelerar o mecanismo de falha atuando no mesmo sentido das forças aplicadas, prejudicando a estrutura da mesma forma. Embora, o autor deste trabalho considera que o equilíbrio de intensidade das TR's é o que deve ser mantido (independente das suas direções de atuação), sendo que o quanto mais próximo da linha neutra melhor. Entretanto, em um âmbito um pouco maior o cuidado para não ter em grau elevado, as TR's compressivas transversais aos cordões de solda. Uma vez que, alguns autores como CALSEN e CZUJKO (1978) e WERNER et al. (2014), já enfatizaram que esta é a direção preferencial em que são causadas falhas catastróficas entre os enrijecedores dos painéis.

Portanto, com as mínimas considerações necessárias para serem comparadas, os perfis 2D, das Figura 4.48 e Figura 4.49, foram separados de acordo com as direções das TR's medidas por DRX, sendo este o perfil para as tensões transversais e aquela o das tensões longitudinais. Conforme, a Figura 4.48, a média das TR's mesmo considerando somente a direção longitudinal, devido as medições por DRX, é possível afirmar que os painéis da SEQ01 e SEQ02 (FCAW robotizado), possuem intensidade de tensões muito compressivas e o painel CW-FCAW soldado com 100 cm/min, possui tensões médias muito trativas, o que favorece para a não escolha dos procedimentos de soldagem utilizadas para serem empregadas na fabricação de painéis enrijecidos. Ressaltando que a SEQ01 é a sequência praticada na fabricação de estruturas por um estaleiro da região. E, assim, a SEQ03 soldada seja por FCAW robotizado ou por CW-FCAW a 120 cm/min, fornece valores mais amenos de TR's na faixa de -100 MPa, sendo esta condição, um pouco menos, indicando assim que, estes procedimentos de soldagem

possuem excelentes possibilidades para fornecer estruturas soldadas com menores intensidades de tensões residuais.

Ainda para a Figura 4.49, as TR's transversalmente medidas por DRX, quando comparadas com as medidas por BA, soldadas com CW-FCAW, fornece valores similares as condições longitudinais, porém com menores intensidades. Sendo assim, as SEQ01 e SEQ02, ainda possuem um perfil inteiramente compressivo e a condição CW-FCAW a 100 cm/min, inversamente proporcional, de caráter trativo, o que confirma as condições utilizadas de soldagem como desfavoráveis para uso.

Por outro lado, a SEQ03, considerando valores encontrados em ambos os métodos de medição possuem certa divergência, sendo a medida por DRX com caráter trativo e por BA caráter compressivo, exatamente diferentes, fortemente justificado pelas técnicas utilizadas com destaque para a profundidade de TR's analisadas, mas ainda assim com valores em boas condições de estudo. Muito provavelmente, isto deve-se ao resfriamento mais rápido na superfície, pois o processo não é homogêneo ao longo da espessura, gerando gradientes de tensões residuais da superfície ao centro da chapa (GUROVA, QUARANTA e ESTEFEN, 2006). Porém, em uma condição ainda melhor, vem o painel soldado com CW-FCAW (120 cm/min), por apresentar TR's de intensidade levemente compressivas. Favorecendo, para uma decisão mais acertada como a condição de soldagem que gera menores tensões residuais.

Finalmente, a situação otimizada para soldagem dos painéis considerando uma escolha completa deve-se ponderar tanto os valores de distorções como de TR's, o que altera os padrões de escolha anterior, considerando apenas as TR's. O que favorece à escolha da SEQ03 como a melhor, em ambos os atributos requisitados. A preocupação com as distorções refere-se a perda da produtividade, em torno de, 30% do tempo total de fabricação de uma embarcação apenas para corrigir estas descontinuidades (GUROVA, 2006; MOORE, 2009; MANDAL, 2017). Mas a soldagem CW-FCAW com velocidade de soldagem de 120 cm/min, aparece como uma excelente alternativa, pelo perfil de tensões residuais médio, não encontrado em nenhuma outra condição, mesmo com FCAW robotizado. Deixando a lacuna de uma possível condição ainda mais excepcional de valores menores de distorções e TR's de soldagem, que é a condição CW-FCAW robotizada.

COMPARATIVO TODAS AS SOLDAGENS TR'S MÉDIAS (MPa) (DRX e BA)

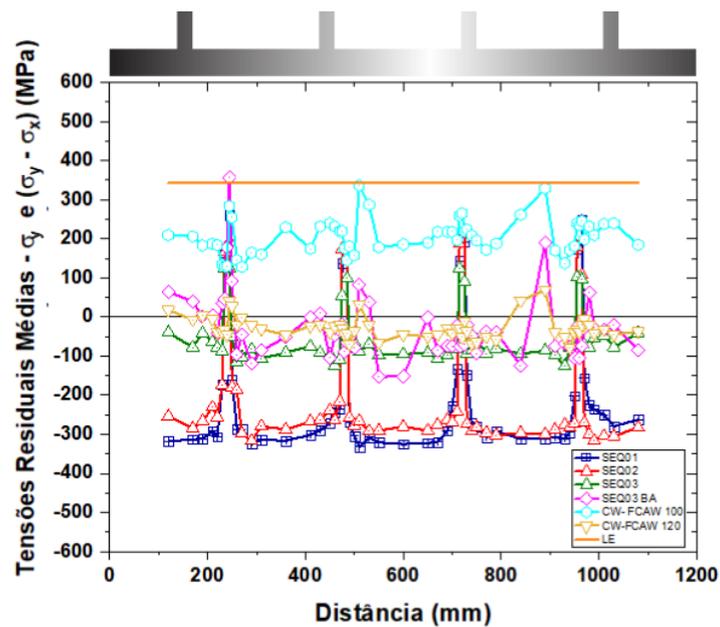


Figura 4.48 – Representação gráfica do perfil 2D das tensões residuais médias do painel soldado com FCAW e CW-FCAW, considerando as TR's Longitudinais medidas por DRX. Fonte: Autor

COMPARATIVO TODAS AS SOLDAGENS TR'S MÉDIAS (MPa) (DRX e BA)

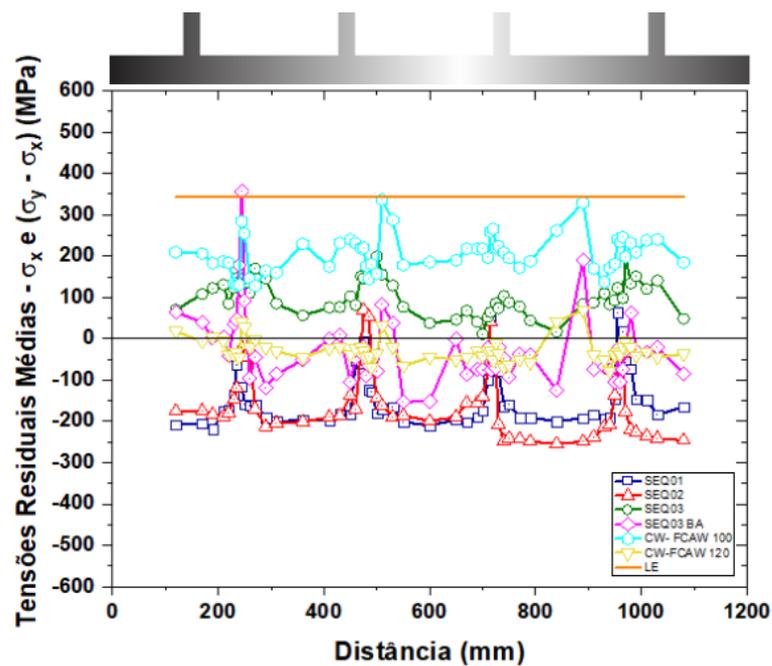


Figura 4.49 – Representação gráfica do perfil 2D das tensões residuais médias do painel soldado com FCAW e CW-FCAW, considerando as TR's Transversais medidas por DRX. Fonte: Autor

4.3 Caracterização

Neste trabalho o processo de caracterização se deu da mesma forma como é apresentada em diversos trabalhos acadêmicos convencionais, dispondo, primeiramente as imagens das análises macro, micro e em seguida as propriedades mecânicas. A Figura 4.50 apresenta de forma esquemática a captura das imagens utilizando microscopia ótica e MEV das peças estudadas, mostrando nitidamente as diferenças microestruturais entre as regiões do MB, ZTA e MS.

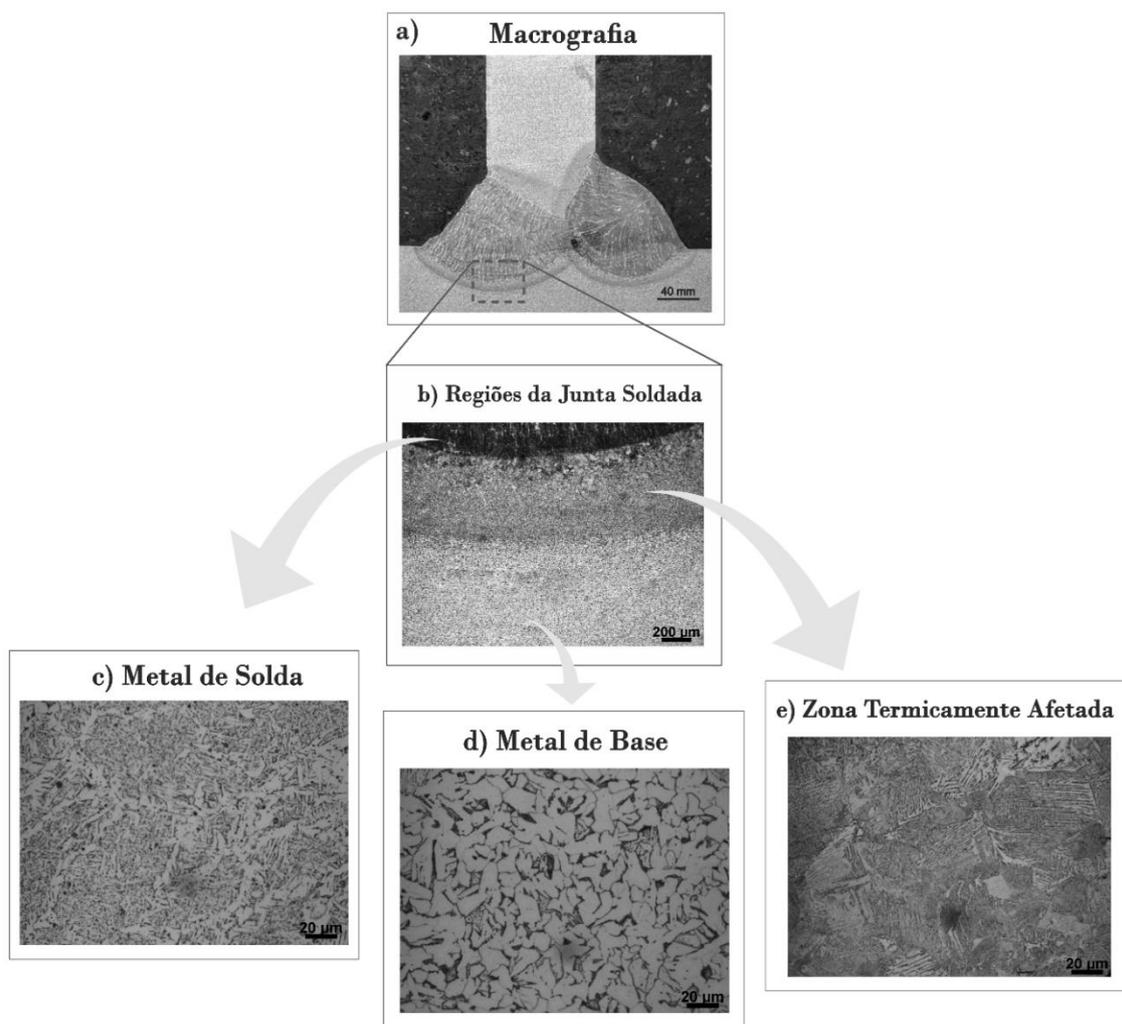


Figura 4.50 – Representação esquemática das regiões de captura de imagens macro e micro. (a) Macrografia. (b) Regiões da junta soldada. (c) Metal de solda (MS). (d) Metal de base e (e) ZTA. Fonte: Autor.

4.3.1 Análise Macro - Geometria dos cordões de solda

Nesta etapa será realizada a análise macroscópica, também conhecida como análise geométrica do cordão de solda através de captação de imagem por câmera convencional e usando softwares para medição das áreas dos cordões, área penetrada e a área da ZTA, diluição, além de distâncias padrões que são medidas em uma solda de filete como perna, garganta, penetração. Esses resultados ajudam a compreender muitas nuances do que ocorreu de fato durante o processo de soldagem. Principalmente, para comparar as diferenças entre o FCAW convencional utilizando o modo robotizado e o CW-FCAW para ambas as velocidades utilizadas e entre as mudanças neste mesmo processo.

a) FCAW robotizada

Baseando-se em que os parâmetros e condições de soldagem são as mesmas alterando apenas a sequência de aplicação, a seção transversal dos cordões tende a ser muito parecida, como mostrado na Figura 4.51. Onde apresentaram excelentes curvaturas quanto a convexidade. Os resultados representam a boa aplicabilidade do processo de soldagem robotizado para a situação em questão. A baixa convexidade é, muito provavelmente, reflexo da elevada velocidade de soldagem, aproximadamente 185% maior que a aplicada no caso de soldagem semiautomática de 35 cm/min. Este valor refere-se a valores de campo que é usado como referência pelos soldadores. A Tabela 4.14 apresenta os dados da geometria dos cordões de solda.

A Tabela 4.14, mostra alguns dados que chamam a atenção, como os cordões mais simétricos são da sequência 01 usando os dados das pernas l e h, como mostra a Figura 4.50. Por outro lado, a sequência 02 mostrou mais assimetria, indicando que o valor de l é maior que o h do cordão 01 (C1) e o cordão (C2) é o que possui maior área dos cordões de solda e maiores áreas penetradas. Como as soldas aplicadas se caracterizam pela profundidade total, as profundidades (P) apresentaram resultados que decresceram conforme a sequência utilizada.

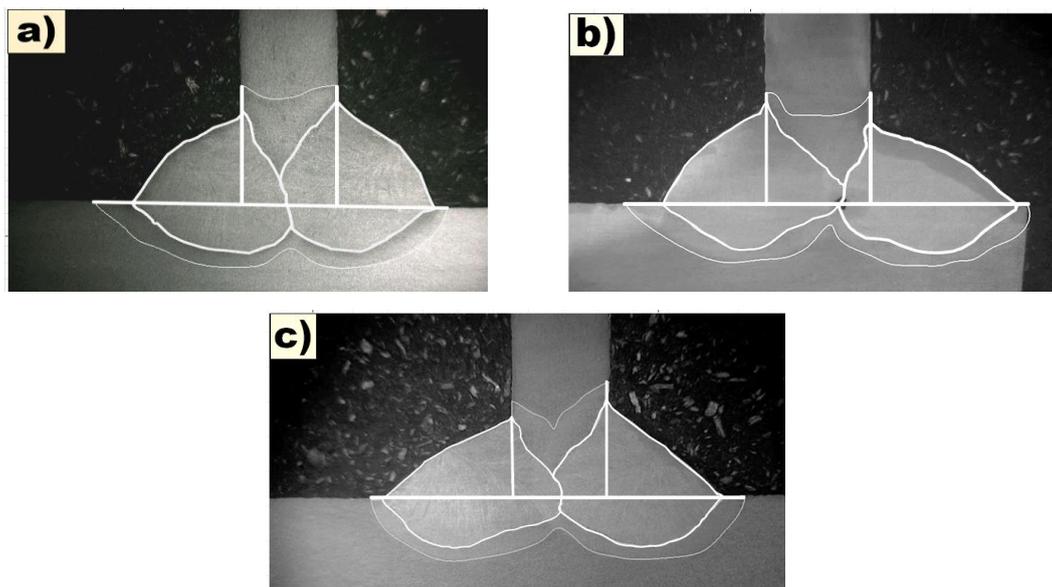


Figura 4.51 – Perfil geométrico dos cordões de solda utilizando as seqüências de soldagem FCAW robotizado: (a) SEQ01 (b) SEQ02 e (c) SEQ03. Fonte: Autor

Estes valores influenciaram nas diluições que variaram um pouco da média (54,2% e desvio padrão de 4,1%), com maior valor para a seqüência 02 de 58,7% e a menor diluição de 48,7%, para a seqüência 03. Com relação aos valores das áreas da ZTA, possivelmente o aumento destas tenha uma provável relação com um tempo mais curto de um passe de solda para o outro, ajudando a descrever o efeito de um pré-tratamento térmico realizado. Ou seja, quanto menor este tempo maior a influência da temperatura, nas distorções e tensões residuais, como discutido antes.

Tabela 4.14 – Dimensões dos cordões de solda considerando as seqüências de soldagem

Seqüência de soldagem	Nº do cordão de solda	Profund. P (mm)	Garganta G (mm)	Perna l (mm)	Perna h (mm)	Áreas dos cordões (mm ²)	Área Penetrada (mm ²)	Área da ZTA (mm ²)	Diluição (%)
SEQ 01	C1	3,05	4,9	5,4	6,4	48,88	26,64	37,79	55,2
	C2	2,6	4,9	6,0	5,6	47,03	25,03		
SEQ 02	C1	2,3	4,4	5,6	6,3	46,70	28,00	36,47	58,7
	C2	2,2	4,4	7,5	4,7	45,86	28,69		
SEQ 03	C1	1,7	4,8	7,2	4,3	40,16	19,66	32,69	48,7
	C2	1,8	4,5	5,5	5,5	42,83	19,58		
MÉDIA		2,29	4,65	6,23	5,47	45,24	24,6	35,7	54,2
DESVIO PADRÃO		0,44	0,22	0,88	0,77	2,90	3,7	2,2	4,1

Assim, em soldas de duplo filete, similarmente realizado pelos autores PANDEY, GIRI e MAHAPATRA (2016) pode-se dizer que as propriedades do cordão de solda são afetadas pela direção da soldagem. Ou seja, a profundidade de penetração, a largura, a altura do cordão, o comprimento da perna e a diluição percentual aumentam, se a direção da solda inverter o sentido do primeiro para o segundo passe de solda, o que ajuda a explicar o que foi encontrado neste trabalho, mais precisamente no painel da SEQ02 e SEQ03, se comparado os resultados encontrados e os percursos de soldagem dos painéis na Figura 3.7, quando acontece tal situação entre os passes de solda.

b) CW-FCAW

A soldagem CW-FCAW traz consigo uma previsibilidade de alteração dos perfis dos cordões em ambas as condições de soldagem (100 cm/min e 120 cm/min), já que o arame adicional aumenta o volume de material depositado em mais 40% e também altera a energia usada na soldagem. Assim, os perfis da Figura 4.52, revelam as características geométricas das soldas de filete empregados na soldagem de painéis. Destacando uma convexidade mais acentuada, principalmente nos cordões soldados com 120 cm/min. Como também, a alteração do tipo de solda, ou seja, saindo de um modelo de filete de penetração total para parcial. Dois tipos de descontinuidades surgiram: (1) na amostra de 100 cm/min, a presença de uma inclusão de escória, muito frequente na soldagem FCAW. (2) na amostra de 120 cm/min, a imagem indica falta de fusão pelo calor incipiente para efetuar a solda. Ambas as descontinuidades podem ser sanadas através do ajuste de parâmetros como aumento da corrente ou troca do gás por uma mistura de gases, como a mistura CO₂ com 25% de argônio. Por outro lado, fica evidente, a presença de ZTA's mais estreitas. Possivelmente gerado pela mudança na direção da energia de soldagem aplicada que, ao invés de escavar o metal de base aumentando a penetração, esta energia é utilizada para a fusão do arame frio.

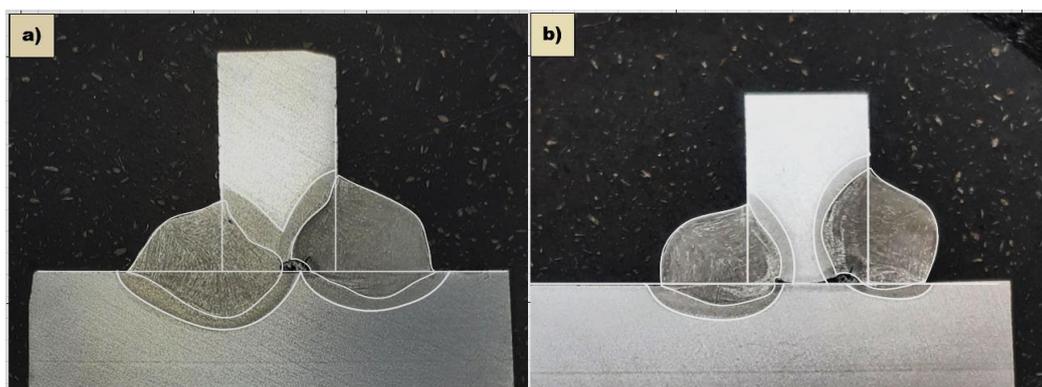


Figura 4.52 – Perfil geométrico dos cordões de solda utilizando o processo CW-FCAW com velocidades de soldagem: a) 100 cm/min b) 120 cm/min. Fonte: Autor.

Por outro lado, demais dados podem ser extraídos usando a Tabela 4.15, como a diminuição da área dos cordões de solda C1 e C2, saindo de uma velocidade de soldagem menor (100 cm/min) para uma maior (120 cm/min), 69,62 mm² e 55,2 mm², respectivamente. Gerando uma diminuição de 14,42 mm², corresponde a aproximadamente 20% menos área. A queda da penetração (área penetrada) também é um dado importante, pois influencia diretamente na diluição, ocasionando num decréscimo de quase 10%, comparando os parâmetros supramencionados.

Tabela 4.15 – Dimensões dos cordões de solda utilizando o processo CW-FCAW

Vel. Soldagem (cm/min)	Nº do cordão de solda	Profund. P (mm)	Garganta G (mm)	Perna l (mm)	Perna h (mm)	Áreas dos cordões (mm ²)	Área Penetrada (mm ²)	Área da ZTA (mm ²)	Diluição (%)
100	C1	1,23	5,12	5,22	5,4	35,39	20,86	27,43	41,3
	C2	4,92	3,6	3,77	3,9	34,23	11,64		
120	C1	1,03	4,47	4,47	3,7	29,04	11,14	21,75	37,7
	C2	2,16	4,04	4,32	4,5	26,16	9,06		
MÉDIA		2,34	2,34	4,31	4,45	31,21	13,18	24,6	39,5
DESVIO PADRÃO		1,55	1,55	0,56	0,52	3,77	4,54	2,8	1,8

4.3.2 Análise microestrutural

A junta soldada é o principal foco desta etapa de estudo, onde apesar das inspeções visual e por END é necessário avaliar através da Metalografia, a visualização das imagens

dos metais utilizando equipamentos óticos e eletrônicos, examinando o efeito da deposição sobre as transformações metalúrgicas do metal de solda e da zona afetada pelo calor. A partição térmica evidencia as zonas formadas pelos ciclos de temperatura ao qual o material foi submetido, formando as regiões da ZTA e da ZF bem definidas e distintas. Para análises do metal de solda de processos convencionais como o FCAW tem-se apenas a confirmação dos resultados por ser um metal de solda exaustivamente estudado. A grande questão fica para a captura de imagens de metais de solda de técnicas variantes como o CW-FCAW onde as microestruturas apresentam uma leve variação nos seus constituintes, o que influencia nas propriedades mecânicas e químicas.

4.3.2.1 Microestruturas e Fração Volumétrica

Por convenção, considerou-se que as microestruturas da etapa 01 são as mesmas para as três sequências estudadas já que foram produzidas utilizando o mesmo processo e parâmetros de soldagem, alterando apenas a sequência, o que não altera ou influencia em mudanças metalúrgicas significativas, assim foram capturadas e analisadas imagens de uma amostra retirada do painel soldado com a SEQ03. Da mesma forma acontece com as microestruturas do CW-FCAW, porém serão apresentadas a seguir.

A análise micrográfica geralmente visa à identificação das microestruturas presentes, a fração volumétrica e suas características, além de identificar a presença de descontinuidades. Os principais fatores que afetam a microestrutura de uma junta soldada segundo BHADESHIA e SVENSSON (1993) são: a composição química do metal de solda; a taxa de resfriamento entre 800 e 500° C ($\Delta T_{800-500}$); o percentual de oxigênio e o tamanho de grão austenítico.

Para a microestrutura do MB, por se tratar de um aço carbono, suas imagens microestruturais são bem disseminadas e conhecidas na literatura como indicado na Figura 4.50(d), mostrando uma formação predominante de grãos grosseiros internamente compostos de perlita (regiões escuras) e ferrita primária (regiões mais claras). No caso da ZTA, ocorrem pequenas alterações quando se compara esta região para soldas FCAW e CW-FCAW. Porém, o que mais é importante observar é o

refinamento dos grãos do MB que são influenciados pelo calor do arco que é absorvido pela peça, provocando alterações nas formas dos grãos, gerando a ZTA, como pode ser visualizado na Figura 4.50(d) e (e). Através das imagens de mesmo aumento tem a ideia de que a granulometria da ZTA quase não é alterada quando comparada FCAW (Figura 4.53a) e CW-FCAW (100 cm/min) (Figura 4.53b). Considerou-se que a ZTA para condições de CW-FCAW (120 cm/min) possui pouca ou nenhuma alteração significativa, por isso não foi mostrada.

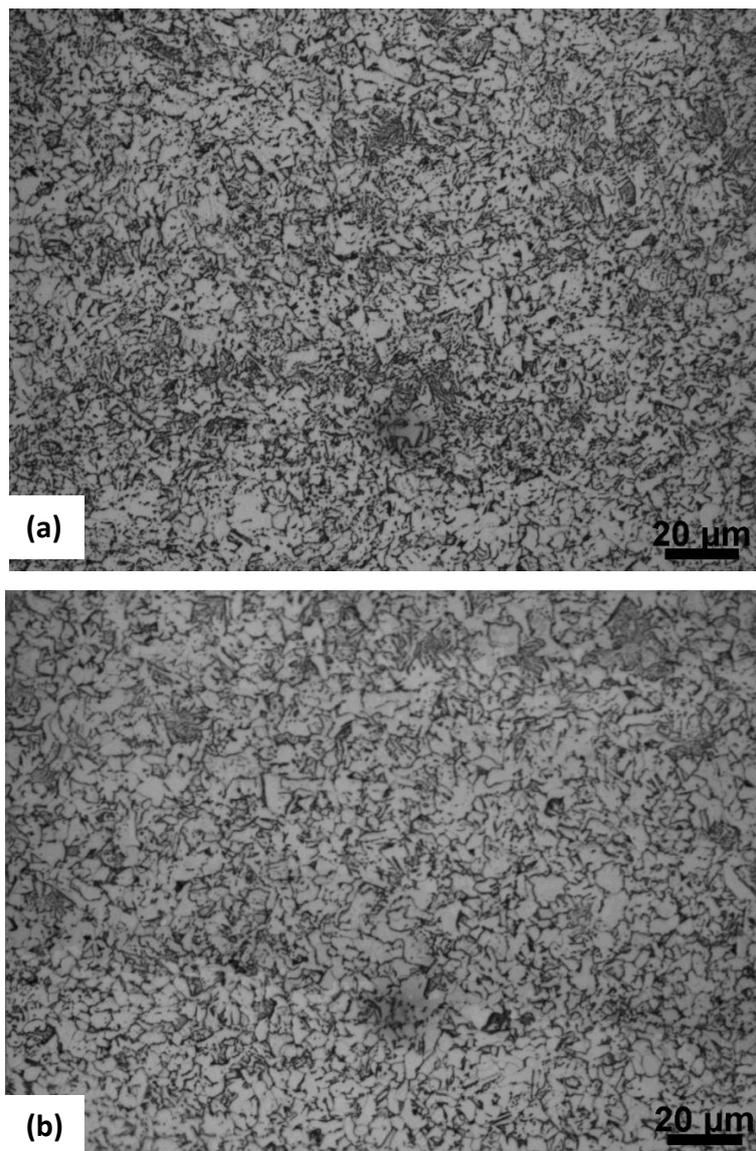


Figura 4.53 – Granulometria da ZTA (a) FCAW (b) CW-FCAW (100 cm/min). Ataque com Nital 2% + Picral 4% e aumento de 500X. MO. Fonte: Autor

A parte mais significativa para o estudo microestrutural na teoria é a zona fundida (ZF) ou metal de solda (MS). Pois devido a mudança da composição química do metal depositado interagindo com as taxas de resfriamento, mesmo sendo aço carbono, a microestrutura é totalmente diferente da ZTA e do MB. A presença de fases diferenciadas é sua principal característica, onde destaca-se a ferrita acicular (AF), sendo a mais desejada por suas melhores propriedades mecânicas. Outras formas de ferritas também surgem como a ferrita de contorno de grão - PF(G), ferrita intragranular poligonal PF(I), ferrita de Widmanstatten (WF), além de outras ferritas de segunda fase e agregados de carbonetos. Existe chance da presença de Martensita (M) e Bainita (B), mas não é o caso do aço carbono do estudo vigente. Nas imagens de microscopia ótica abaixo são apresentadas uma imagem do metal de solda FCAW (Figura 4.54a) e outras duas com CW-FCAW com as velocidades de 100 cm/min (Figura 4.54b) e 120 cm/min (Figura 4.54c). Onde pode-se perceber que as microestruturas presentes são muito similares, variando pequenos percentuais de uma ou outra fase. As microestruturas são similares mesmo utilizando parâmetros diferentes, o que também confirma os resultados de STARLING, MODENESI e BORBA (2009).

Fica acentuada a presença de ferrita acicular - (AF) em todas as imagens, além de ferrita de contorno de grão - PF(G) e ferrita de Widmanstatten (WF) na Figura 4.54b. Vale lembrar que a AF e WF possuem crescimento competitivo, isso quer dizer que, se uma cresce elimina a presença da outra quando muito próximas (THEWLIS, 2004 e BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2017). As imagens da Figura 4.55 foram realizadas utilizando o MEV capturada da amostra de CW-FCAW 120 cm/min, por considerar um elevado nível de similaridade entre todos os metais vistos da zona fundida, onde na Figura 4.55a pode-se ver a presença de inclusões e o desenvolvimento da AF. Isto reforça a teoria de que a AF nucleia a partir das inclusões de TiO_2 , como citado por KUO (2003). Já a Figura 4.55b mostra no centro da imagem a presença de uma microestrutura PF(G) junto com as ripas da WF. THEWLIS (2004) conclui que a WF deve ser considerada uma ferrita de segunda fase não alinhada – FS(NA).

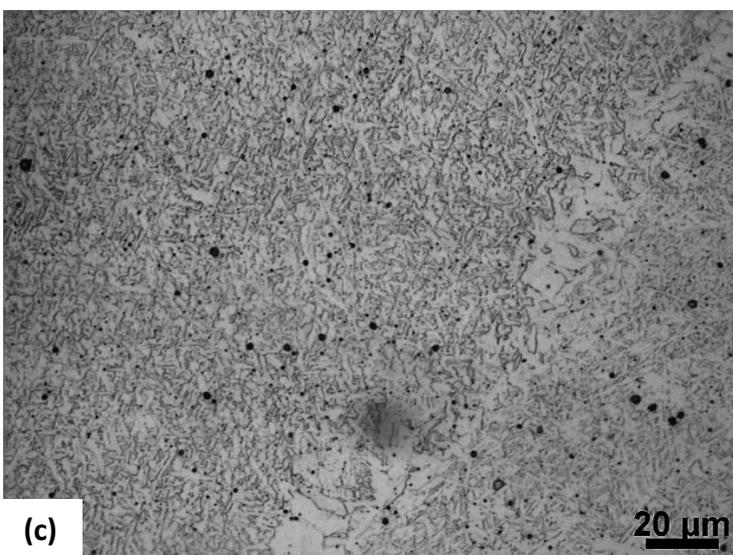
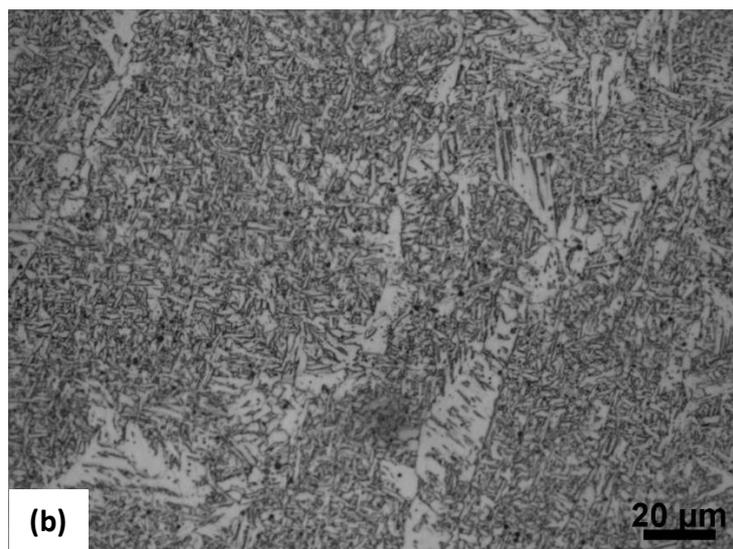
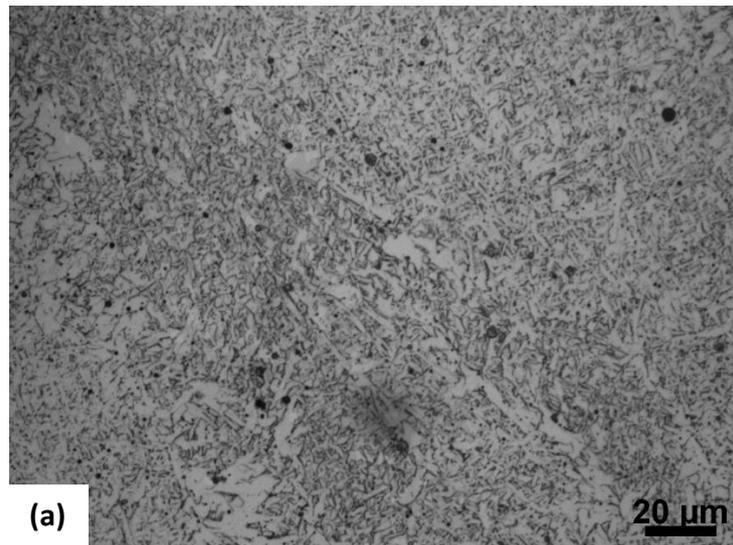


Figura 4.54 – Micrografias do metal de solda (a) FCAW (b) CW-FCAW 100 cm/min e (c) CW-FCAW 120 cm/min. Ataque Nital 2% + Picral 4%. Aumento de 500X. MO. Fonte: Autor

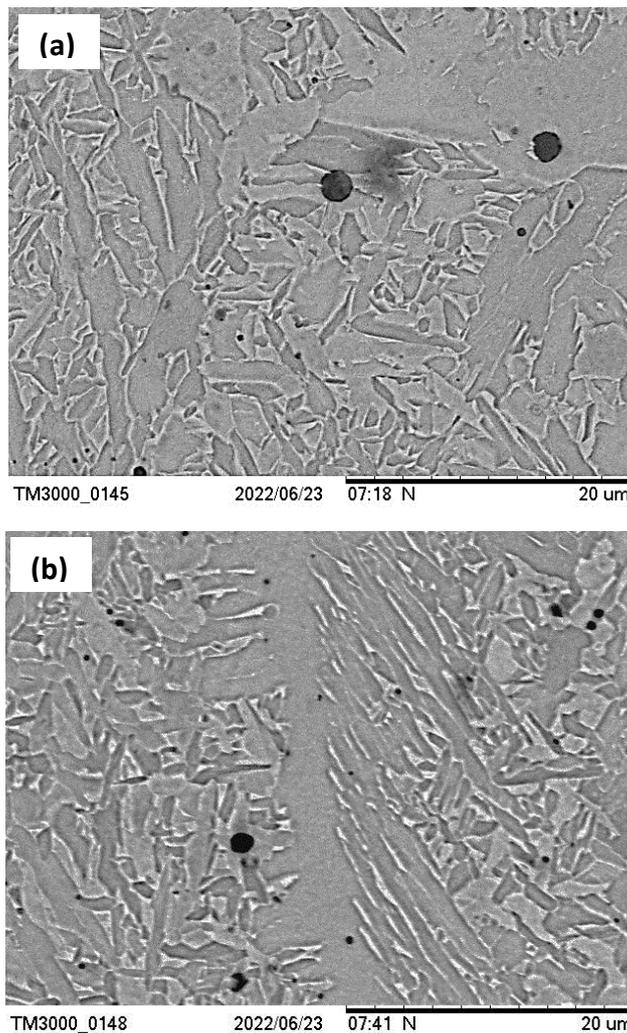


Figura 4.55 – Micrografias realizadas por MEV utilizando a peça de CW-FCAW 120 cm/min. (a) Nucleação da AF a partir de uma inclusão não metálica. (b) Presença da PF(G) e WF. Fonte: Autor.

Entretanto, além de poder visualizar e identificar as fases presentes como realizado anteriormente, torna-se também importante a quantificação das microestruturas, pois fazendo o produto cada percentual e suas respectivas propriedades mecânicas tem-se uma prévia das propriedades gerais da peça. Assim, através da norma do IIW já mencionada no procedimento experimental foram medidos os percentuais de cada fase pelo método de quantificação por imagem, utilizando como apoio o trabalho de THEWLIS (2004). Na Tabela 4.16 apresenta os resultados percentuais de cada fase. As principais fases presentes são ferrita acicular (AF) e ferritas primárias (alotriomórfica,

idiomórfica e de contorno de grão) e ferritas de segunda fase em geral (podem ser identificadas como alinhada e não alinhada). Em média, a AF possui 47,3% das fases presentes e em seguida ferrita de segunda fase com média de quase 30%.

Quanto a AF os valores estão um pouco acima da média dos trabalhos de ASSUNÇÃO (2013) e FERREIRA (2014) que também mediram as frações volumétricas dos processos GMAW e CW-GMAW. Porém, esta diferença de percentual de fases são influenciadas por diversos fatores, o que foge do escopo deste trabalho. No entanto, de maneira geral, pode-se dizer que o aumento da velocidade de soldagem com 40% de arame frio ajuda a aumentar o percentual de ferrita acicular. Como não foram utilizados percentuais de arame frio diferentes, mas ainda pode-se afirmar que com o aumento do percentual de arame frio aumenta a presença de AF, como constatado pelos autores acima citados.

Tabela 4.16 – Fração Volumétrica das fases presentes no metal de solda

FASES	FCAW	CW-FCAW 100	CW-FCAW 120	MÉDIA	DP
AF	35	51	56	47,3	8,96
FS	47	22	20	29,7	12,28
PF(G)	15	21	17	17,7	2,49
WF	3	6	7	5,3	1,70

Portanto, no gráfico da Figura 4.56 é claramente visível o aumento do percentual de AF entre os processos de soldagem, ocorrendo o decaimento do percentual de FS e a quase estabilidade da fase PF(G). A presença de WF é menos notada pelo crescimento competitivo com a AF. Portanto, vale ressaltar que o metal de solda do CW-FCAW é similar a do FCAW garantindo suas propriedades mecânicas básicas.

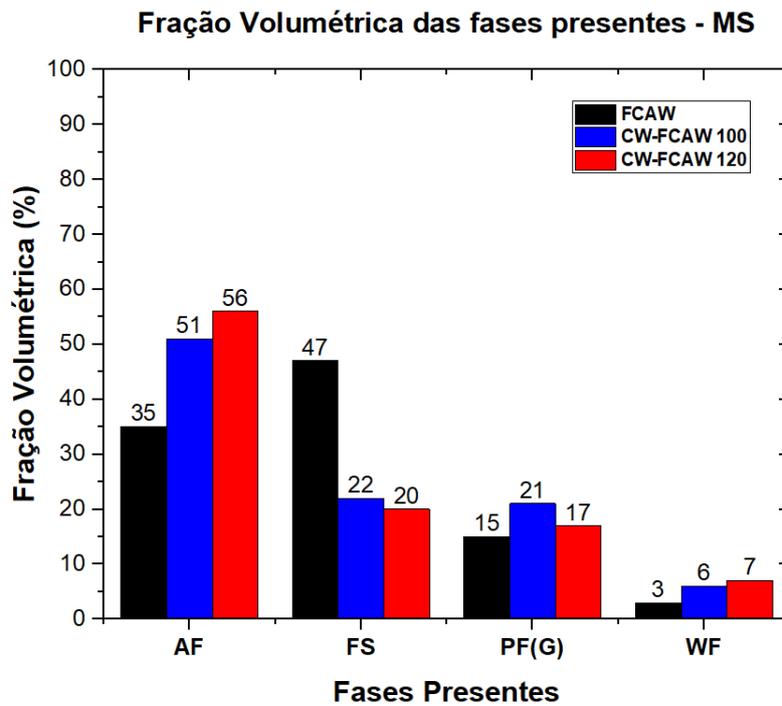


Figura 4.56 – Fração volumétrica das fases presentes no metal de solda (MS). Fonte: Autor

4.3.3 Microdureza

a) FCAW robotizada

Os valores de microdureza encontradas estão na Figura 4.57, onde foram plotados os valores em linha, apesar de se ter medido em zonas conforme o esquema da Figura 4.19. Esta disposição gráfica, foi elaborada a fim de se obter uma imagem que facilitasse o efeito comparativo e o entendimento dos valores obtidos conforme as regiões da junta soldada. De maneira geral, é possível observar que os valores obtidos apresentam bastante similaridades, já que apenas as sequências de deposição dos cordões de solda são diferentes, mas as propriedades são as mesmas.

MICRODUREZA JUNTA SOLDADA FCAW ROBOT X SEQUÊNCIAS DE SOLDAGEM

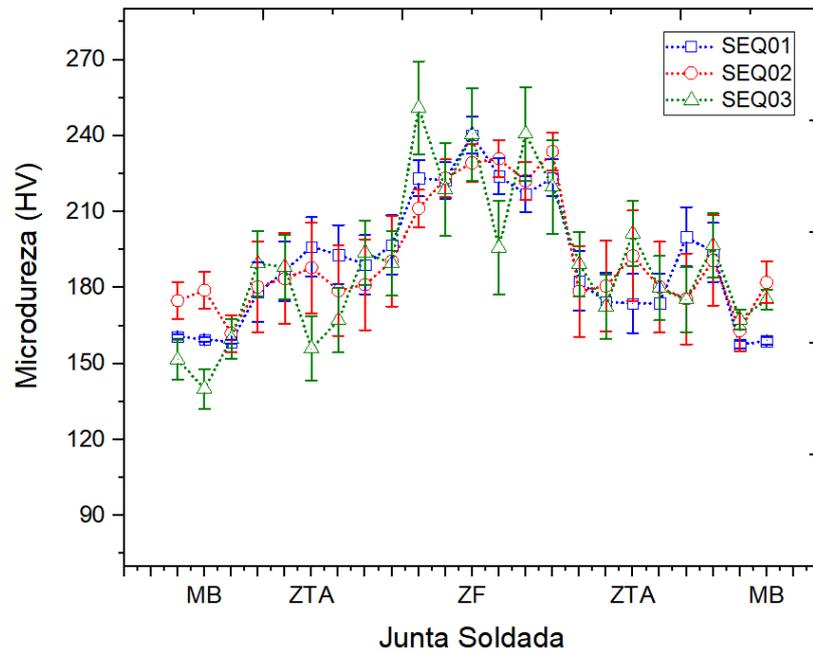


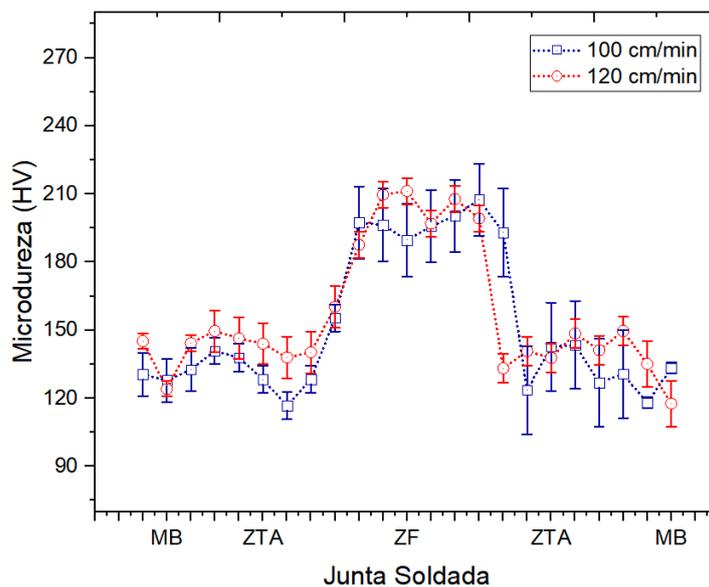
Figura 4.57 – Representação gráfica do perfil de microdureza da junta soldada das 03 sequências de soldagem dos painéis. Fonte: Autor

Analisando os resultados é possível observar que, o valor máximo de microdureza encontrado, 251 HV, localiza-se no metal de solda (zona fundida) da junta da Sequência 3, devido o metal possuir uma composição química com elementos de liga adquiridos através da fusão do metal mais o fluxo que aumentam a resistência mecânica. O tratamento térmico produzido pelo calor da fonte térmica de soldagem gerou uma microdureza média de 185 HV, na zona termicamente afetada (ZTA). De outro modo, os valores de microdureza, tanto os picos (encontrados na ZF) quanto a ZTA e MB, são similares aos resultados obtidos por RODRIGUES (2011) e MARQUES et al. (2017) mesmo soldando com GMAW, com uma variação de 10 a 15 HV considerando a relação dos dados. Comparando a zona fundida soldada com FCAW e GMAW, observa-se que o metal daquela zona possui maior microdureza que esta, justificada pelo maior percentual de elementos de liga, em torno de 30 HV.

b) CW-FCAW

Para os valores de microdureza (HV), os perfis das curvas são parecidos considerando os parâmetros utilizados de 100 cm/min e 120 cm/min como as velocidades de soldagem adicionando 40% de arame frio. O perfil simétrico das curvas evidencia as características mecânicas de cada região da partição térmica da junta soldada, ou seja, o pico de microdureza está presente na zona fundida com aproximadamente 210 HV, caindo para valores médios de 120 HV na ZTA e 150 HV no MB e ZTA, como pode ser visto na Figura 4.58. A queda da microdureza em relação aos valores medidos nas amostras soldadas com o processo convencional deve-se a alterações químico-metalúrgicas. Mas que não possuem discussões significativas que levem a grandes influências nos resultados encontrados.

MICRODUREZA JUNTA SOLDADA CW-FCAW X VELOCIDADES DE SOLDAGEM



CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES

Etapa 01 – FCAW

- Constatou-se a possibilidade de soldar painéis navais com FCAW robotizado para as 03 sequências diferentes;
- A medição das distorções por quadrantes dos painéis para as 03 sequências de soldagem mostraram grande diferenças nos níveis de distorções com valores na redução de até 68% das distorções quando comparado a de menor (sequência 03) com a de maior nível (sequência 01), a sequência 02 obteve nível intermediário.
- A medição das tensões residuais por difração de raios X mostrou que os níveis de tensões podem diminuir até 59% nas TR longitudinais e 86% nas TR transversais quando comparados a sequência de menor nível (sequência 03) com a de maior nível de tensões (sequência 01).
- Os perfis geométricos das soldas foram compatíveis com o processo FCAW e os parâmetros utilizados apresentaram uma diluição média de 54,2%;
- As fases presentes e a fração volumétrica evidenciaram a presença significativa de ferrita acicular;
- Os valores de microdureza são compatíveis com o material da junta soldada e os parâmetros do processo utilizado;
- Com todos os dados coletados, a melhor sequência para solda na etapa 02 foi a sequência 03 usando o comparativo das distorções e tensões residuais.

Etapa 02 – CW-FCAW

- Constatou-se a possibilidade de soldar painéis navais com CW- FCAW para uma sequência de soldagem otimizada;
- A medição das distorções por quadrantes dos painéis mostraram que o nível do painel soldado com a velocidade de 120 m/min é 13% menor que o nível do outro soldado com 100 m/min.

- A medição das tensões residuais por birrefringência acústica mostrou que os níveis de tensões podem diminuir até 30% nas diferenças TR(Long.-Transv.) quando comparados os painéis soldados com a velocidade de soldagem de 120 m/min de menor para o de maior nível ($V_s=100$ m/min);
- Os perfis dos cordões CW-FCAW ficaram compatíveis com as velocidades de soldagem 100 cm/min e 120 cm/min e o percentual de arame frio usado, sendo a diluição de 41% e 37%, respectivamente.
- As fases presentes e a fração volumétrica evidenciaram a presença significativa de ferrita acicular e outras ferritas des segunda fase em diversas formas diferentes;
- Os valores de microdureza são compatíveis com o material da junta soldada e os parâmetros do processo utilizado CW-FCAW mesmo para as duas diferentes velocidades de soldagem, com uma pequena diminuição de 30HV na zona fundida quando comparada com o FCAW.
- Comparativamente os melhores resultados de distorções foram do painel soldado com a sequência 03 e FCAW, assim como as tensões residuais em ambas as direções L e T.
- De maneira geral, pode-se concluir que o processo CW-FCAW pode ser utilizado como uma alternativa de soldagem de painéis enrijecidos, desde que sejam realizadas pequenas adequações do processo para reduzir mais significativamente o nível das distorções e tensões residuais em ambas as direções de medição L-T.

CAPÍTULO VI

6 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar outros arranjos de sequência e tipo de soldas diferentes quanto ao tamanho dos cordões como soldas intermitentes e alternadas nos painéis;
- Simular as condições de soldagem dos painéis;
- Alterar os perfis dos enrijecedores soldados;
- Verificar com a melhor sequência soldada outros parâmetros de soldagem que alterem as distorções e tensões como voltagem, corrente, chanfro, espessura da chapa, gás de proteção, restrição aos painéis etc.
 - Medir as distorções e tensões residuais de soldagem após cada passe de soldagem aplicado ao painel;
 - Alterar os percentuais de arame frio do processo CW-FCAW e verificar sua influência nas distorções e TR's dos painéis.
 - Utilizar o processo CW-FCAW no modo robotizado e avaliar as alterações nas distorções e TR's de soldagem;
 - Medir a influência das distorções e TR's em estruturas seguintes a montagem com painéis enrijecidos.

CAPÍTULO VII

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID, M.; SIDDIQUE, M.; MUFTI, R. A. Prediction of welding distortions and residual stresses in a pipe–flange joint using the finite element technique. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 13, n. 3, p. 455, 2005.

ALBUQUERQUE, L.C.S. **Metodologia para a determinação das constantes acustoelásticas em trilhos ferroviários**. 2019. 56pgs. TCC. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, UFPA. Belém.

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.

ASIFA, Khurram et al. Parametric study of welding temperature distribution in t-joint fillet weld using fem. **In: Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications Ltd, 2011. p. 492-496.

ASSUNÇÃO, P.D. Estudo da viabilidade do processo de soldagem GMAW-DCW (double cold wire). 180 pags. Dissertação de Mestrado – PPGEM/UFPA – Universidade Federal do Pará, 2013.

AS, D. G. DNVGL-CG-0051: Non-destructive testing. **Ultrasonic Testing Norway**, 2015.

ASTM A131, **Standard Specification for Structural Steel for Ships**, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01. West Conshohocken, PA, USA, 2014.

_____ANSI / AWS. **A5.20 Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding**. USA: [s.n.]. 1995. 41p.

_____ASTM A 384. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**: Annual Book of ASTM Standards. vol 03.01. USA: [s.n.]. 2044. 24p.

_____ASTM E165. **Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination**: Annual Book of ASTM Standards. vol 03.01. USA: [s.n.]. 2004. 20p.

_____ANSI / AWS. **B1.10 Guide for the Nondestructive Examination of Welds**. USA: [s.n.]. 1999. 45p.

_____ANSI / AWS. **B1.11 Guide for the Visual Examination Of Welds**. USA: [s.n.]. 2000. 40p.

SPECIFICATIONS, Standard Welding Procedure. **ASM Handbook, Volume 6A: Welding Fundamentals and Processes**. Materials Park, OH: ASM International, 2011.

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.

BOEKHOLT, Richard. **Welding Mechanisation and Automation in Shipbuilding Worldwide: Production Methods and Trends Based on Yard Capacity**. Elsevier, 1996.

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.

CABRAL, T. dos S.; BRAGA, E. M.; MENDONÇA, E. A. M.; SCOTTI, A. Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. **In: Welding International**. 2015. Selected from Soldagem & Inspeção 2013 18(4) 339–348 <http://dx.doi.org/10.1080/09507115.1714.932993>

CARLSEN, C. A. and CZUJKO, J.: The specification of tolerances for post welding distortion of stiffened plates in compression. **Struct. Eng.** 56 A(10), (1978).

CARVAJAL, Linton et al. Acoustic Birefringence and Poisson's Ratio Determined by Ultrasound: Tools to Follow-Up Deformation by Cold Rolling and Recrystallization. **Materials Research**, v. 20, p. 304-310, 2017.

CHAU, T. T. Welding Effects On Thin Stiffened Panels. In: **Residual Stress and Its Effects on Fatigue and Fracture**. Springer, Dordrecht, 2006. p. 117-137.

CHEN, Z.; CHEN, Z.; SHENOI, R. A. Influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure. **Ocean Engineering**. 2015. 106: 271–280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.013>

CHEN, BQC.; GUEDES SOARES, C. Effect of welding sequence on temperature distribution, distortions, and residual stress on stiffened plates. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2016; 86: 3145–3156.

CHO, S.-H.; KIM, J.-W. Analysis of residual stress in carbon steel weldment incorporating phase transformations. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 7, n. 4, p. 212-216, 2002.

CHUJUTALLI, J. A. H. Flambagem Torcional de Enrijecedores em Painéis de Navios Tanques Submetidos à Compressão Axial/ John Alex Hernández. **Dissertação de Mestrado**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010

CHUVAS, T.C.; CASTELLO, D.A.; CINDRA FONSECA, M.P. Residual stress relief of welded joints by mechanical vibrations. **J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.** (2016) 38: 2449. <https://doi.org/10.1007/s40430-016-0516-8>

COFIÑO, RACHEL CRISTINA. Análise das tensões residuais em uma junta soldada em Condição Overmatch. **FEI, São Bernardo do Campo**, 2010.

COLEGROVE, P. IKEAGU, C. THISTLETHWAITE, A. WILLIAMS, S. NAGY, T. SUDER, W. STEUWER, A. and PIRLING, T. Welding process impact on residual stress and distortion. **Science and Technology of Welding and Joining**. 2009. 14(8):717-725. DOI 10.1179/136217109X406938.

COSTA, ES.; ASSUNÇÃO, PDC et al. Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**. 2017. 22:8, 706-713.

CRUZ JÚNIOR; CABRAL, T. S. **Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas**. 2008. 78p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará. Instituto de tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém.

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

DAVIES, C. M. et al. The influence of pre-existing deformation on GMA welding distortion in thin steel plates. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 24, n. 1, p. 261-273, 2015.

DENG, Dean. Influence of deposition sequence on welding residual stress and deformation in an austenitic stainless steel J-groove welded joint. **Materials & design**, v. 49, p. 1022-1033, 2013.

DEO, M.V., MICHALERIS, P. & SUN, J. Prediction of buckling distortion of welded structures. **Science and Technology of Welding and Joining**. 2003. Vol. 8(1):55-61.

DO AMARAL, Diogo; ESTEFEN, Segen. Distorções de fabricação na construção naval e offshore. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2004. Salvador, Brasil.

DNVGL-RU-SHIP, Pt. Ch. 7. **Rules for classification: Ships**, 2018.

ESTEFEN, T. P. Influência das distorções de fabricação no comportamento estrutural de painéis enrijecidos de plataforma semissubmersíveis sob compressão axial. 2009. **Dissertação de Mestrado**, COPPE/UFRJ, Brasil.

ESTEFEN, Segen et al. Análise de evolução do estado das tensões residuais de soldagem. In: **Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção. Centro de Tecnologia SENAI-RJ-CTS Solda**. 2008.

ESTERMAN, Marcos et al. Robust design for fatigue performance: shot peening. In: **Proceedings of the 1990 ASME Engineering Technical Conference and Computer on Experimental mechanics Engineering Conference**. 1996.

FERREIRA, A.S. A influência do teor de silício na microestrutura e propriedades mecânicas do aço ASTM 131-grau A soldado por GMAW-CW e GMAW-DCW. 104 pags. **Dissertação de Mestrado** – PPGEM/UFPA – Universidade Federal do Pará, 2014.

FITZPATRICK, M. E. et al. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction-Issue 2, Measurement Good Practice Guide No. 52. **Teddington: National Physical Laboratory**, 2005.

FLEWITT, P. E. J.: The impact of secondary and residual stresses on structural integrity. **Int. J. Press. Vessel. Pip.** 85(3), 117 (2008).

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.

FREITAS, Elaine. N. Estudo Operacional de Manipulador Robótico Aplicado ao Processo de Soldagem FCAW Na Construção Naval. 126 pags. **Dissertação de Mestrado** – PPGEM/UFPA – Universidade Federal do Pará, 2014.

FU, G. LOURENÇO, MI. DUAN, M. ESTEFEN, SF. Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures. **Marine Structures**. 2016. 46: 30-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.07.008>

FU, Guangming et al. Numerical and experimental studies of residual stresses in multipass welding of high strength shipbuilding steel. **Journal of Ship Research**, v. 59, n. 03, p. 133-144, 2015.

GAO, H. et al. Pass-by-pass stress evolution in multipass welds. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 19, n. 3, p. 256-264, 2014.

GASPAR, B. TEIXEIRA, A. P. GUEDES SOARES, C. and WANG, G. Assessment of IACS-CSR implicit safety levels for buckling strength of stiffened panels for double hull tankers. **Mar. Struct.** 24(4), 478 (2011).

GERY, D.; LONG, H.; MAROPOULOS, P. Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding. **Journal of Materials Processing Technology**. 2005. 167:393–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.018>

GOLDAK, John; CHAKRAVARTI, Aditya; BIBBY, Malcolm. A new finite element model for welding heat sources. **Metallurgical transactions B**, v. 15, n. 2, p. 299-305, 1984.

GRAY, Tom; CAMILLERI, Duncan; MCPHERSON, Norman. **Control of welding distortion in thin-plate fabrication: design support exploiting computational simulation**. Elsevier, 2014.

GUEDES SOARES, C. SOREIDE, T. H.: Behaviour and Design of Stiffened Plates Under Predominantly Compressive Loads. **Int. Shipbuild. Prog.** 30(341), 13 (1983).

GUO, N. et al. Effects of heat input on welding buckling distortion by experimental measurement method. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 22, n. 5, p. 381-388, 2017.

GUROVA, Tetyana; QUARANTA, Francisco; ESTEFEN, Segen. Monitoramento do estado das tensões residuais durante a fabricação de navios. In: **21º Congresso nacional de transporte aquaviário, construção naval e offshore. Anais... Rio de Janeiro**. 2006.

HANDBOOK, Welding. Welding science and technology. **American Welding Society**, v. 1, p. 9, 2001.

HASHMI, Saleem. **Comprehensive materials processing**. Newnes, 2014.

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

HIRAO, Masahiko; OGI, Hirotsugu. **Electromagnetic acoustic transducers**. Tokyo, Japan:: Springer, 2017.

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

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

ISO, E. N. et al. Welding-Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded)—Quality levels for imperfections. **ISO**, v. 5817, p. 2014, 2014.

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

JAVADI, Yashar. Investigation of clamping effect on the welding residual stress and deformation of monel plates by using the ultrasonic stress measurement and finite element method. **Journal of Pressure Vessel Technology**, v. 137, n. 1, 2015.

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

JAVADI, Yashar et al. Using ultrasonic and finite element for residual stress evaluation of a gas transmission pipeline. **Materials Evaluation**, v. 76, n. 2, p. 192-202, 2018.

KEIVANI, R., JAHAZI, M., PHAM, T., KHODABANDEH, A R., AFSHAR, M R., Predicting residual stresses and distortion during multisequence welding of large size structures using FEM. **Int J Adv Manuf Technol**. 2014. 73:409–419.

KENNO, S Y.; DAS, S.; KENNEDY, J B.; ROGGE, R B.; GHARGHOURI, M. Residual stress distributions in ship hull specimens. **Marine Structures**. 2010. 23:263–273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2010.07.001>

KHEDMATI, MR.; GHAVAMI, K.; RASTANI, M. A comparative study on three diferente construction methods of stiffened plates strength behavior and ductility characteristics. **Revista Escola de Minas**. 2007. 60(2): 365-379.

KNOEDEL, Peter; GKATZOGIANNIS, Stefanos; UMMENHOFER, Thomas. Practical aspects of welding residual stress simulation. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 132, p. 83-96, 2017.

KUNDU, Tribikram (Ed.). **Nonlinear ultrasonic and vibro-acoustical techniques for nondestructive evaluation**. Springer, 2018.

LAMEIRA, P. D. O. – Estudo de planejamento e análise de processos de fabricação com aplicação de um braço robótico na fabricação de embarcações fluviais. **Dissertação Mestrado**. 157 pags. PPGEM UFPA - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

LAWRENCE, A. R.; MICHALERIS, P. Effects of thermal transport in computation of welding residual stress and distortion. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 16, n. 3, p. 215-220, 2011.

LEE, S.-Y. et al. Precision and accuracy of stress measurement with a portable X-ray machine using an area detector. **Journal of Applied Crystallography**, v. 50, n. 1, p. 131-144, 2017.

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

LESTER, H. H.; ABORN, R. H. Behaviour under stress of iron crystal in steel. **Army Ordnance**, v. 6, n. 6, p. 120-127, 1925.

LI, A. et al. Surface roughness effects on stress determination by the X-ray diffraction method. **Experimental Techniques**, v. 19, n. 2, p. 9-11, 1995.

LIANG, Wei; DENG, Dean. Influences of heat input, welding sequence and external restraint on twisting distortion in an asymmetrical curved stiffened panel. **Advances in engineering software**, v. 115, p. 439-451, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.11.002>

LINDGREN, E.A.; JONES, T.S.; BERGER H. et al; *Determining residual stress in plates with Rayleigh Waves*, **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**, pp. 2039-2046, Plenum Press, New York, 1994.

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

MACHADO, Ivan Guerra. Novos paradigmas para especificação de juntas soldadas. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, p. 278-288, 2012.

MACHERAUCH, Eckard; HAUKE, Viktor (Ed.). **Residual stresses in science and technology**. IR Publications, Limited, 1987.

MANDAL, Nisith R. **Ship construction and welding**. Springer Singapore, 2017.

MANDAL, N R.; PRABU, S K.; KUMAR, S. Buckling of Stiffened Panels and Its Mitigation. **Journal of Ship Production & Design**. 2014. Vol. 30(4): 201–206. <http://dx.doi.org/10.5957/JSPD.30.4.130058>

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.

MASUBUCHI, Koichi. **Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences**. Elsevier, 2013.

MATOS, A. O., BITTENCOURT, M. D. S. Q., GONÇALVES FILHO, O. J. A., & PAYÃO FILHO, J. D. C. (2005). Avaliação de tensões internas por ultra-som usando a técnica da birrefringência. International Nuclear Atlantic Conference (INAC). Santos, SP, Brazil. Agosto 2005.

MICHALERIS, Pan (Ed.). **Minimization of welding distortion and buckling: modelling and implementation**. Elsevier, 2011.

MIKAMI, Y. et al. Angular distortion of fillet welded T joint using low transformation temperature welding wire. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 14, n. 2, p. 97-105, 2009.

MISHCHENKO, Andrii et al. Analysis of residual stresses resulting from the surface preparation for X-ray diffraction measurement. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 2, p. 94, 2018.

MISHCHENKO, Andrii; OLIVEIRA, Bruno José de; SCOTTI, Américo. Preparação de Superfície para Medição de Tensões Residuais em Soldagem por DRX. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, p. 497-507, 2016.

MOORE, P. L. The importance of welding quality in ship construction. **Analysis and Design of Marine Structures**, v. 1, p. 357, 2009.

MURAKAWA, H. et al. Effect of low transformation temperature weld filler metal on welding residual stress. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 15, n. 5, p. 393-399, 2010.

NIKITINA, N. Ye; OSTROVSKY, L. A. An ultrasonic method for measuring stresses in engineering materials. **Ultrasonics**, v. 35, n. 8, p. 605-610, 1998.

NITSCHKE-PAGEL, T. DILGER, K. Sources and Consequences of Residual Stresses due to Welding. **Materials Science Forum**. 2014. 783-786: 2777-2785.

NITSCHKE-PAGEL, Thomas; WOHLFAHRT, Helmut. Residual stresses in welded joints—sources and consequences. In: **Materials science forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2002. p. 215-226.

NOYAN, Ismail C.; COHEN, Jerome B. **Residual stress: measurement by diffraction and interpretation**. Springer, 2013.

OKANO, S.; TSUJI, H.; MOCHIZUKI, M. Temperature distribution effect on relation between welding heat input and angular distortion. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 22, n. 1, p. 59-65, 2017.

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.

OTT, Michael H.; LÖHE, Detlef. The influence of surface roughness on the refraction of X-rays and its effect on Bragg peak positions. **Advances in X-ray Analysis**, v. 46, p. 232, 2003.

PAIK, Jeom Kee. **Ultimate limit state analysis and design of plated structures**. 2ª Ed. John Wiley & Sons, 2018.

PAIK, Jeom Kee; THAYAMBALLI, Anil Kumar; LEE, Jae Myung. Effect of initial deflection shape on the ultimate strength behavior of welded steel plates under biaxial compressive loads. **Journal of ship research**, v. 48, n. 1, p. 45-60, 2004.

PAMNANI, Rishi et al. Residual stress studies on arc welding joints of naval steel (DMR-249A). **Journal of Manufacturing Processes**, v. 20, p. 104-111, 2015.

PANDEY, C.; GIRI, A.; MAHAPATRA, M. M. On the prediction of effect of direction of welding on bead geometry and residual deformation of double-sided fillet welds. **International journal of steel structures**, v. 16, n. 2, p. 333-345, 2016.

PARK, J. U.; LEE, H. W. Effects of Initial Condition of Steel Plate on Welding Deformation and Residual Stress due to Welding. *Journal of Mechanical Science and Technology*. (2007). 21: 426-435.

PARK, J. U.; AN, G.; WOO, W. The effect of initial stress induced during the steel manufacturing process on the welding residual stress in multi-pass butt welding. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v. 10, n. 2, p. 129-140, 2018.

PODDER, Debabrata; DAS, Sreekanta; MANDAL, Nisith R. Distortions in Large Stiffened Ship Panels Caused by Welding: An Experimental Study. **Journal of Ship Production and Design**, v. 35, n. 3, p. 250-262, 2019.

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.

RADAJ, D. **Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion**. Springer Science & Business Media, 1993.

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.

REDDY, G. Madhusudhan; MOHANDAS, T. Ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments. **Journal of materials processing technology**, v. 57, n. 1-2, p. 23-30, 1996.

RODRIGUES, Lino Alberto Soares. **Caracterização Microestrutural e de Propriedades Mecânicas de Soldas do Aço ASTM A 131 pelos Processos FCAW Convencional e com Adição de Arame Frio. 2011. 144 f.** 2011. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)—Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

RODRIGUES, Lino AS et al. Welding procedures influence analysis on the residual stress distribution and distortion of stiffened panels welded via robotized FCAW. **Thin-Walled Structures**, v. 141, p. 175-183, 2019.

ROOKS, Brian. Robot welding in shipbuilding. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 24, n. 6, p. 413-417, 1997

ROSENTHAL, Daniel. The theory of moving sources of heat and its application of metal treatments. **Transactions of ASME**, v. 68, p. 849-866, 1946.

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.

SATTARI-FAR, I.; JAVADI, Y. Influence of welding sequence on welding distortions in pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 85, n. 4, p. 265-274, 2008.

SCHAJER, Gary S. (Ed.). **Practical residual stress measurement methods**. John Wiley & Sons, 2013.

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

SCHROEPFER, Dirk; KROMM, Arne; KANNENGIESSER, Thomas. Engineering approach to assess residual stresses in welded components. **Welding in the World**, v. 61, n. 1, p. 91-106, 2017.

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 e Inspeção**, v. 19, n. 1, 2014.

SHAMA, Mohamed. **Buckling of ship structures**. Springer Science & Business Media, 2012.

SHARPE, William N. (Ed.). **Springer handbook of experimental solid mechanics**. Springer Science & Business Media, 2008.

SHIRZADI, A. A.; BHADESHIA, H. K. D. H. Accumulation of stress in constrained assemblies: novel Satoh test configuration. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 15, n. 6, p. 497-499, 2010.

SIRISATIEN, Tanawat; MAHABUNPHACHAI, Sasawat; SOJIPHAN, Kittichai. Effect of submerged arc welding process with one-side one-pass welding technique on distortion behavior of shipbuilding steel plate ASTM A131 grade A. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 3, p. 9543-9551, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.136>

SLUZALEC, Andrzej. **Theory of thermomechanical processes in welding**. Springer Science & Business Media, 2005.

SONG, Z K.; LI, Z Y.; XU, J.; SUN, Y C. Effects of heat source model and welding speed on welding temperature field for a plan carbon steel plant. **Applied Mechanics and Materials**. 2014. Vols 488-489: 83-89. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.488-489.83

STUPELLO, B.; CARDOSO, J. S.; ANDERSON, V. L. Desenvolvimento e aplicação de método para definição da estrutura de produto de um navio tanque (SUEZMAX) com aplicação de Planejamento, **Programação e Controle da Produção num estaleiro**. 2007. Disponível em: <<http://www.gestaonaval.org.br>> Acesso em: 24 Nov. 2018.

SZELAŹEK, J. Ultrasonic measurement of thermal stresses in continuously welded rails. **NDT & E International**, v. 25, n. 2, p. 77-85, 1992.

TEKGOZ, M. GARBATOV, Y. and GUEDES SOARES, C. Ultimate strength assessment of welded stiffened plates. **Eng. Struct.** 84, 325 (2015).

TENG, T-L. FUNG, P-F. CHANG, P-H YANG, W-C. Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *Elsevier*. 2001. 78: 523–538.

TENG, TL.; CHANG, PH.; TSENG, WC. Effect of welding sequences on residual stresses. **Computers and Structures**. Elsevier. 2003. 81: 273–286.

TENG, Tso-Liang; LIN, Chih-Cheng. Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds. **International Journal of Pressure vessels and piping**, v. 75, n. 12, p. 857-864, 1998.

THEWLIS, G. Classification and quantification of microstructures in steels. **Materials Science and technology**, v. 20, n. 2, p. 143-160, 2004.

THOMAS, SH.; LIU S. Analysis of low transformation temperature welding (LTTW) consumables – distortion control and evolution of stresses. **Science and Technology of Welding and Joining**. 2014. 19:5, 392-401.

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.

TORRES, M. A. S.; VOORWALD, H. J. C. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 24, n. 8, p. 877-886, 2002.

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

TSAI, C. L.; PARK, S. C.; CHENG, W. T. Welding distortion of a thin-plate panel structure. **Welding Journal-New York-**, v. 78, p. 156-s, 1999.

TUSEK, J. et al. Influence of type of welded joint on welding efficiency. **Science and technology of welding and joining**, v. 8, n. 3, p. 157-164, 2003.

VANLI, O. A.; MICHALERIS, P. Distortion analysis of welded stiffeners. **Journal of ship production**, v. 17, n. 4, p. 226-240, 2001.

WERNER, Benjamin et al. The influence of weld joints on the failure mechanism of scaled double hull structures under collision load in finite element simulations. **Procedia materials science**, v. 3, p. 307-312, 2014.

WITHERS, P. J. Residual stress and its role in failure. **Reports on progress in physics**, v. 70, n. 12, p. 2211, 2007.

WITHERS, P. J. et al. Recent advances in residual stress measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 85, n. 3, p. 118-127, 2008.

WITHERS, PJ.; BHADESHIA, HKDH. Residual stress. Part 2 –Nature and origins. **Material Science Technology**. 2001; 17:366–375.

YAN, Z. L. Influences of Welding Residual Stresses on Performance of Steel Structures and Methods for their Elimination. **Advanced Materials Research**. 2014. Vols 971-973 pp 889-892.

YANG, Y. P. et al. Development of weld residual stress measurement method for primed steels. In: **ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference**. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2017.

YANG, Yu-Ping et al. Weld Residual Stress Measurement Using Portable XRD Equipment in a Shipyard Environment. **Journal of Ship Production and Design**, v. 35, n. 3, p. 231-240, 2019.

YANG, Y. P.; JUNG, G. Advancement in prediction and control of welding residual stress and distortion. In: **Materials science forum**. Trans Tech Publications, 2007. p. 3943-3948.

ZHANG, C. Li, S., Sun, J., Wang, Y., & Deng, D. Controlling angular distortion in high strength low alloy steel thick-plate T-joints. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 267, p. 257-267, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.023>

ZHANG, J.; LIU, K.; ZHAO, K.; LI, X.; LIU, Y.; ZHANG, K. A study on the relief of residual stresses in weldments with explosive treatment. **International Journal of Solids and Structures**. 2005. 42: 3794–3806. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.11.017>

ANEXOS

ANEXO I – DADOS DE MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS DOS PAINÉIS SOLDADOS COM FCAW ROBOTIZADO. CONSIDRANDO AS SEQUÊNCIAS DE SOLDAGEM

- TR's medidas nas chapas de referência, em MPa

CHAPA DE REFERÊNCIA				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	TENSÕES RESIDUAIS (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	30	-4,4	35	23,4
2	60	4,1	-10	-10,6
3	90	2,1	43,8	-4,3
4	120	-4	7,4	21,2
5	150	-17,3	40,6	3,1
6	180	-19	28,1	-16,1
7	210	-2,5	-28,3	16,4
8	240	-7,9	56,6	-16,9
9	270	21,2	41,2	-0,9
10	300	-0,3	7,9	0,1
11	330	-20,6	-24,7	14,1
12	360	59,6	-26	-10,5
13	390	-1,9	33,5	-13,8
14	420	43,4	19	14,6
15	450	13,6	-11,9	55,4
16	480	29,2	-48,4	3,7
17	510	20,3	50,9	-1,9
18	540	39,9	41,8	48,9
19	570	39,9	-3,3	20,5
20	600	46,8	31,9	46,6
21	630	35,8	-6,6	26,3
22	660	-9	42	50,3
23	690	5,5	62,9	34,2
24	720	11,3	41,4	27,3
25	750	20	-12,7	10,3
26	780	-4,9	1,2	0,1
27	810	15,4	-12,6	39
28	840	33,2	0,9	20,3
29	870	33,1	20,3	48,8
30	900	39,2	-17,4	34,3
31	930	7,9	-2,2	48,8

32	960	55,5	-2,5	40,7
33	990	-0,6	44,6	40,8
34	1020	-4,4	35	23,4
35	1050	4,1	-10	-10,6
36	1080	2,1	43,8	-4,3
37	1110	-4	7,4	21,2
38	1140	-17,3	40,6	3,1
39	1170	-19	28,1	-16,1
MÉDIA		16,1	8,4	23,7

Dados de medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y^{TR}) do painel soldado com a Sequência01.

Fonte: Autor

PAINEL SOLDADO - SEQUÊNCIA01				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	TR'S LONGITUDINAIS (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	-319,3	-326,6	-308
2	170	-313,7	-314,4	-311,4
3	190	-328,5	-311,1	-294,6
4	210	-236,9	-320,6	-317,3
5	220	-310,2	-303,4	-304,8
6	230	-129,3	-209,1	-179,6
7	235	155,7	192,4	149,4
8	240	--	--	--
9	245	280	217	286,6
10	250	-82,1	-241,5	-157,8
11	260	-282,7	-300,1	-277,7
12	270	-276,1	-318,9	-266,6
13	290	-352	-300,8	-323,6
14	310	-318,6	-331,3	-291,5
15	360	-325,4	-323,6	-299,9
16	410	-322,6	-254,8	-326,9
17	430	-315,6	-232,6	-319,4
18	450	-184,7	-303,1	-325,5
19	460	-118,5	-278,6	-335,5
20	470	-182,8	-259,5	-260,2
21	475	157,8	124,1	129,7
22	480	--	--	--
23	485	135,9	172,1	175,5
24	490	-300	-302,4	-207,3
25	500	-284	-326,9	-302,1
26	510	-385,9	-301,1	-309,6
27	530	-255,4	-337,4	-330,6
28	550	-325,5	-326,9	-310,6
29	600	-333,4	-320,7	-321,2

30	650	-334,0	-313	-319,4
31	670	-330,9	-324,3	-302,9
32	690	-320,5	-260,1	-293,2
33	700	-211,9	-195,7	-273,6
34	710	-134,5	-146,5	-118
35	715	126,0	198,7	105,3
36	720	--	--	--
37	725	247,5	181,7	149,3
38	730	-158,5	-135,2	-149,6
39	740	-270,2	-258,9	-284,4
40	750	-314,8	-224,6	-299,5
41	770	-285,3	-311,0	-325,9
42	790	-333,4	-295,5	-248,4
43	840	-340,0	-299,2	-296,4
44	890	-323,9	-300	-309
45	910	-323,4	-298,7	-301,5
46	930	-321,3	-299,1	-312,6
47	940	-279,8	-299	-306,5
48	950	-183,8	-229,4	-194,1
49	955	200,8	210,1	111,7
50	960	--	--	--
51	965	276,5	244,2	230
52	970	-95,8	-148,8	-221,5
53	980	-117,5	-257	-299,7
54	990	-302,9	-205,3	-201,1
55	1010	-293,8	-143,4	-312,7
56	1030	-333,6	-186,9	-317,7
57	1080	-307,4	-170,7	-309,1

Dados de medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y^{TR}) do painel soldado com a Sequência02.

Fonte: Autor

PAINEL SOLDADO - SEQUÊNCIA02				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	TR'S LONGITUDINAIS (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	-239,9	-281,4	-240,2
2	170	-263,8	-292,4	-298,9
3	190	-256	-298,8	-244,8
4	210	-182,8	-244,3	-265,4
5	220	-219	-263,2	-288
6	230	-153	-168,7	-201,3
7	235	171,8	156	168,3
8	240	--	--	--

9	245	195,3	184,4	198,4
10	250	-200,4	-87,2	-250,4
11	260	-169,1	-223,1	-169,1
12	270	-294,3	-313,4	-287,6
13	290	-315,2	-302,1	-333,2
14	310	-279,4	-270	-287,5
15	360	-287,6	-284,8	-290
16	410	-266,1	-262,8	-273,2
17	430	-274,3	-231,2	-280,6
18	450	-236,9	-247	-230,2
19	460	-260,3	-276,1	-257,6
20	470	-215,9	-202,5	-229,3
21	475	160,8	175,1	185,7
22	480	--	--	--
23	485	158,2	166,4	149,9
24	490	-284,3	-261	-226,6
25	500	-289,9	-266,9	-275,4
26	510	-242,5	-291,7	-263,3
27	530	-289,5	-295,9	-289,8
28	550	-301,3	-284	-287,1
29	600	-285,5	-271,7	-284,5
30	650	-271,2	-299,6	-301,3
31	670	-272	-266,3	-289,5
32	690	-281,6	-265,6	-242,5
33	700	-292,2	-225,6	-289,9
34	710	-207,4	-234,3	-284,3
35	715	225,3	179,1	158,2
36	720	--	--	--
37	725	220,2	238,5	196,9
38	730	-305,2	-244,1	-271,1
39	740	-310,1	-291,1	-274,6
40	750	-319,6	-259,6	-266,9
41	770	-322	-268,3	-298
42	790	-342	-277,9	-286,6
43	840	-313,5	-268,1	-307,7
44	890	-344	-287,2	-268,1
45	910	-326,4	-269,5	-271,3
46	930	-323,6	-235,7	-268,2
47	940	-337,5	-216,9	-294,7
48	950	-313,2	-250,6	-250,9
49	955	189,7	156,8	290,7
50	960	--	--	--
51	965	120,1	194	107,4
52	970	-312,2	-230	-269,4
53	980	-364	-269,6	-268
54	990	-365,3	-292,7	-292,3

55	1010	-332,8	-277,7	-302,2
56	1030	-359,1	-281,8	-273,5
57	1080	-313,1	-270,9	-265

Dados de medições das Tensões Residuais Longitudinais (σ_y^{TR}) do painel soldado com a Sequência03.

Fonte: Autor.

PAINEL SOLDADO - SEQUÊNCIA03				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	TR'S LONGITUDINAIS (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	-16,4	-67,4	-35,3
2	170	-108	-83	-40,9
3	190	-55,2	-39,8	-29
4	210	-90,8	-60,4	-39,2
5	220	-145	-34,5	-54,7
6	230	-168,8	-55,2	-38,2
7	235	98	189,4	184,8
8	240	--	--	--
9	245	132,8	108,9	134,5
10	250	-92	-23,7	-39,4
11	260	-140,5	-98,8	-107,2
12	270	-149	-98,8	-59,7
13	290	-129	-69,9	-48,9
14	310	-147,3	-93,2	-78,6
15	360	-126,1	-82,6	-64,5
16	410	-129,3	-57,4	-37,8
17	430	-120,9	-83,4	-72,5
18	450	-90,5	-92,6	-106,3
19	460	-182,2	-74,5	-116
20	470	-154,3	-72	-99,5
21	475	163,3	155,1	145,3
22	480	--	--	--
23	485	184,2	163,8	147
24	490	-166,2	-45,2	-32,8
25	500	-124,3	-21,6	-50,1
26	510	-112,6	-92,8	-63
27	530	-98,4	-64,8	-46,3
28	550	-125,6	-93,2	-75
29	600	-122,2	-108,9	-52,7
30	650	-152,8	-66,8	-57,2
31	670	-161,9	-73,3	-86,8
32	690	-100,5	-88	-107,8

33	700	-185,6	-42,4	-18,6
34	710	-178,4	-44,7	-23,9
35	715	122,6	176	174,9
36	720	--	--	--
37	725	97,3	150,3	123,8
38	730	-200,1	-63,9	-17,6
39	740	-117,3	-97,9	-43,4
40	750	-98,7	-61,5	-15,9
41	770	-142,2	-76,1	-60,8
42	790	-115,2	-69,2	-57,8
43	840	-116,2	-96,5	-70,6
44	890	-153,2	-48,6	-55,5
45	910	-83,4	-94,8	-109,9
46	930	-159,7	-97,9	-120,3
47	940	-146,9	-69,4	-21,4
48	950	-200,9	-42,8	-19,1
49	955	144,7	198,7	162,4
50	960	--	--	--
51	965	142,7	182,6	160,1
52	970	-107,8	-41,1	-63,5
53	980	-126,7	-40,6	-67,1
54	990	-58,5	-35,4	-72,8
55	1010	-66	-50,5	-25,5
56	1030	-67,7	-80,6	-84,2
57	1080	-36,6	-49,7	-36,2

Tabela 5.6 – Dados de medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x^{TR}) do painel soldado com a Sequência01. Fonte: Autor.

PAINEL SOLDADO - SEQUÊNCIA01				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	TR'S TRANSVERSAIS (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	-205,3	-210,8	-209
2	170	-201,3	-202,2	-211,1
3	190	-220,5	-218,6	-219,6
4	210	-190,3	-155,4	-181,1
5	220	-178,6	-182,2	-157
6	230	-196,7	-65,9	-139,5
7	235	122,2	122,1	147,6
8	240			
9	245	148,7	190,8	112,6
10	250	-162,8	-202,2	-111,7
11	260	-181,7	-167,3	-137,5
12	270	-111,1	-188,7	-180,9
13	290	-198,4	-179,9	-193,1
14	310	-206,7	-189,5	-205,3

15	360	-221,3	-175,6	-192,9
16	410	-211,6	-196,9	-183,2
17	430	-208,2	-105,7	-234
18	450	-167,8	-175,3	-209,5
19	460	-134,6	202,6	-229,4
20	470	-159,1	-166,6	-121,8
21	475	179,3	135,6	148,2
22	480			
23	485	140	188,1	140,6
24	490	-188,8	-57,6	-139,3
25	500	-186,5	-154,5	-201,4
26	510	-150,1	-169,4	-189,4
27	530	-119,1	-186	-190,3
28	550	-210,2	-201,4	-192
29	600	-224,4	-209,4	-197,3
30	650	-208,2	-208,7	-170,3
31	670	-230,1	-188,6	-186,5
32	690	-194	-188,5	-187
33	700	-199,8	-202	-121
34	710	-77,1	-43,3	-175,1
35	715	128,7	181,4	132,3
36	720			
37	725	112,8	140,2	137,2
38	730	-108,1	6,6	-131,6
39	740	-155,9	-131,2	-202,3
40	750	-193,5	-87,4	-195,8
41	770	-157	-205,7	-209,8
42	790	-209,7	-183,5	-179,8
43	840	-195,7	-201,5	-201,9
44	890	-192,2	-201,9	-183,4
45	910	-234,6	-118,6	-196,8
46	930	-190,6	-208,4	-187,1
47	940	-192,3	-196,2	-185,9
48	950	-81,9	-161	-190,7
49	955	183,4	193,4	124,5
50	960			
51	965	114,1	116,8	179,4
52	970	68	-111,5	-126,5
53	980	58,5	-148,2	-128,7
54	990	-128,1	-180,2	-132,5
55	1010	-184,5	-65,3	-195,4
56	1030	-214,3	-119,7	-217,2
57	1080	-210,2	-78,3	-187,4

Tabela 5.8 – Dados de medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x^{TR}) do painel soldado com a Sequência02. Fonte: Autor

PAINEL SOLDADO - SEQUÊNCIA02				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	TR'S TRANSVERSAIS(MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	-170,5	-157,6	-197,1
2	170	-185,6	-175,1	-165,4
3	190	-190,5	-198,8	-161,5
4	210	-196,5	-192,2	-175,6
5	220	-187,6	-199	-151,7
6	230	-152,3	-108,2	-184,1
7	235	95,4	119,4	143,9
8	240			
9	245	139,1	118,1	119,3
10	250	-44,6	-39,8	-49,7
11	260	-135,3	-88,9	143
12	270	-170,8	-174,1	-164,5
13	290	-200,6	-248,8	-188,9
14	310	-199,7	-206,4	-207
15	360	-228,4	-192,8	-181,6
16	410	-187,6	-183,5	-200,6
17	430	-188,9	-175	-196,2
18	450	-145,8	-137,9	-130
19	460	-165,7	-199,5	-144,3
20	470	16,2	23,7	-120,5
21	475	148,7	152,7	105,1
22	480			
23	485	155,3	159,7	142,9
24	490	-33,6	-10,5	-119,1
25	500	-110,36	-134,7	-187,1
26	510	-169,3	-130,5	-185,2
27	530	-179,2	-198,7	-189,2
28	550	-190,5	-201,6	-165,2
29	600	-201,6	-230,1	-165,8
30	650	-198,3	-174,7	-195,6
31	670	-175,3	-166,2	-121,9
32	690	-144,3	-159,4	-164,3
33	700	-139,1	-152,2	-129,2
34	710	-56,3	-65,8	-109,9
35	715	119,5	119,7	193,1
36	720			
37	725	133,9	165,3	172,6
38	730	-197,6	-214,3	-210,2
39	740	-236,9	-251,1	-256,2
40	750	-237,4	-235,6	-250
41	770	-229,3	-236,9	-263,2

42	790	-238,9	-247,9	-259,4
43	840	-257,8	-268,3	-237,1
44	890	-249,3	-247,3	-251,3
45	910	-241,6	-239,5	-231,3
46	930	-217,2	-201,3	-221,1
47	940	-199,6	-195,3	-230,6
48	950	-134,6	-156,4	-120,4
49	955	127,8	126,9	170,1
50	960			
51	965	115,6	138,9	154,3
52	970	-166,8	-172,3	-190,6
53	980	-199,7	-196,3	-265
54	990	-201	-220,1	-259,3
55	1010	-212,3	-234,1	-260,4
56	1030	-228,5	-241,9	-253,1
57	1080	-237,2	-247,6	-254

Tabela 5.10 – Dados de medições das Tensões Residuais Transversais (σ_x^{TR}) do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor.

PAINEL SOLDADO - SEQUÊNCIA03				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	TR'S TRANSVERSAIS (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	64,3	69,8	75,9
2	170	142,3	84,9	96,8
3	190	124,9	149,3	92,7
4	210	112,5	139,6	140
5	220	82,3	75,9	94,3
6	230	111,9	137,6	119,4
7	235	142,3	188,4	138,4
8	240			
9	245	186,3	132,6	163,2
10	250	191	114,6	133
11	260	206,2	87	138
12	270	127,3	194,4	188,4
13	290	194,9	127,3	114,3
14	310	66	127,8	60,4
15	360	29,3	64,8	74
16	410	85,4	80,6	61,5
17	430	100,8	75,9	52,5
18	450	158	74,1	75,9
19	460	165,5	61,4	19
20	470	185,6	174,4	94,2
21	475	133	235,1	171,4
22	480			
23	485	132,7	181,3	170,7

24	490	208,9	166,4	161,9
25	500	189,7	231,9	166,1
26	510	155	188,4	123
27	530	114,9	93,9	77,1
28	550	65	81,8	84,4
29	600	-52	96,2	67,7
30	650	-0,8	65,6	72,8
31	670	110,6	57,6	34,5
32	690	15,2	68,5	38,5
33	700	135,6	121,5	27,1
34	710	-35,5	115,9	78,2
35	715	143,7	148	187,1
36	720			
37	725	101,6	90,2	164,4
38	730	63,2	71,6	86,8
39	740	145	66,3	98,3
40	750	119,5	59,8	84,1
41	770	66,8	123,6	44
42	790	32,9	25,4	74,1
43	840	21,1	-11,3	39,7
44	890	43,5	98	109,8
45	910	51,6	76,5	132,7
46	930	98,4	115,5	115,6
47	940	102,3	84,7	61,9
48	950	68,2	90,6	120,7
49	955	107,2	133,4	128,6
50	960			
51	965	194,4	188,6	109,8
52	970	109,5	135	235
53	980	142,3	154,4	165,3
54	990	165,4	143,7	144,3
55	1010	166,9	124,6	69,2
56	1030	48,4	84,2	89,7
57	1080	35,4	59,2	49,5

ANEXO II - DADOS OBTIDOS PELA MEDIÇÃO COM BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA

CHAPA DE REFERÊNCIA				
PONTO	DISTANCIA (mm)	($\sigma_y - \sigma_x$) (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	-3,64	-40,84	47,49
2	240	-19,50	-34,58	6,16
3	360	17,06	-90,65	44,34
4	480	-15,65	-0,93	49,02
5	600	34,94	-112,60	103,38
6	720	-0,77	-42,50	0,57
7	840	-20,28	59,58	26,17
8	960	28,95	31,15	59,85
9	1080	17,47	-20,67	-6,67

Tabela 5.12 – Dados de medições das Tensões Residuais do painel soldado com a Sequência03. Fonte: Autor.

PAINEL SOLDADO – FCAW ROBOTIZ. (SEQ03)				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	($\sigma_y - \sigma_x$) (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	-27,66	69,97	150,17
2	134	-157,09	24,87	252,57
3	148	-178,42	15,44	166,19
4	162	-150,40	-9,14	173,25
5	174	-403,10	24,44	252,69
6	186	-112,45	37,06	181,22
7	198	-272,17	289,29	122,06
8	210	-51,98	404,12	182,74
9	222	327,68	311,63	430,90
10	258	-160,48	166,10	267,98
11	270	-392,04	51,13	51,61
12	282	-103,17	-69,58	36,24
13	294	-127,63	-239,00	9,72
14	306	-297,35	-125,60	163,76
15	318	-171,28	-59,24	77,96
16	332	-148,19	-37,82	182,51
17	346	-107,33	-14,04	149,84
18	360	-380,72	-81,02	147,91
19	374	-213,80	-73,47	149,34
20	388	-148,16	-103,60	151,59
21	402	-141,13	-55,68	142,03
22	414	-248,95	-82,08	65,49

23	426	-247,75	-42,24	92,02
24	438	-240,11	-4,02	89,14
25	450	-236,67	-55,24	58,11
26	462	-146,46	133,56	261,55
27	498	-88,06	66,35	134,56
28	510	-473,06	-61,77	75,36
29	522	-303,03	-157,43	6,52
30	534	16,13	-161,35	140,11
31	546	-171,89	-140,47	52,19
32	558	-263,66	-121,26	166,25
33	572	-250,94	-141,37	167,22
34	586	-38,78	-192,42	168,24
35	600	-287,91	-109,64	170,71
36	614	-242,14	-135,99	227,63
37	628	-221,02	-168,98	178,06
38	642	-273,33	-45,38	256,18
39	654	-253,60	-4,84	112,53
40	666	-292,82	-81,85	94,39
41	678	-201,86	56,41	34,28
42	690	-256,90	87,60	51,89
43	702	-490,08	-109,17	225,30
44	738	1,78	192,08	374,88
45	750	-138,92	-132,08	51,34
46	762	-276,22	16,11	59,17
47	774	-187,65	-149,61	104,03
48	786	-229,19	-151,03	69,66
49	798	-268,51	96,52	94,02
50	812	-225,11	-194,73	105,67
51	826	-209,03	-139,47	125,47
52	840	-31,38	-231,59	178,76
53	854	-20,70	-99,47	306,49
54	862	-220,58	-178,31	314,81
55	882	-171,04	-160,73	234,47
56	894	-122,47	-80,20	142,24
57	906	-218,34	-78,55	44,91
58	918	-200,15	-23,00	55,51
59	930	-268,78	69,89	153,59
60	942	22,49	143,82	284,83
61	978	158,92	315,09	495,08
62	990	-136,15	99,58	274,25
63	1002	-159,85	-74,90	27,18
64	1014	-153,59	-75,67	127,59
65	1026	-247,28	17,18	118,54
66	1038	-85,31	-56,52	377,13
67	1052	-226,78	-127,74	141,83
68	1066	-125,81	-124,91	100,74

69	1080	-114,18	-76,76	117,78
-----------	------	---------	--------	--------

Tabela 6.xx – Dados de medições das Tensões Residuais do painel soldado com a CW-FCAW (100 m/min). Fonte: Autor.

PAINEL SOLDADO – CW-FCAW (100 m/min)				
PONTO	DISTÂNCIA (mm)	($\sigma_y - \sigma_x$) (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	302,07	220,90	105,88
2	134	252,81	211,16	154,38
3	148	263,09	201,05	84,89
4	162	254,49	249,35	56,93
5	174	253,96	256,66	41,83
6	186	248,98	173,03	-21,01
7	198	259,32	187,31	-57,74
8	210	166,49	199,73	25,88
9	222	385,30	332,56	133,46
10	258	271,32	408,29	85,65
11	270	137,17	305,99	-6,74
12	282	164,11	219,33	0,89
13	294	222,29	185,95	84,35
14	306	223,38	200,38	56,71
15	318	317,26	265,05	106,61
16	332	258,28	196,51	69,28
17	346	347,83	264,58	83,54
18	360	321,60	347,29	50,91
19	374	326,07	265,81	102,24
20	388	272,03	247,95	138,64
21	402	286,71	282,73	90,63
22	414	307,95	163,87	54,69
23	426	241,74	202,12	-8,87
24	438	263,24	282,20	-3,39
25	450	224,13	229,36	20,15
26	462	403,41	478,94	127,07
27	498	390,52	425,04	46,07
28	510	221,73	388,61	-76,94
29	522	293,62	240,84	22,08
30	534	325,81	226,14	17,04
31	546	336,27	241,66	75,27
32	558	321,30	265,77	65,50
33	572	375,28	263,31	15,56
34	586	387,28	213,98	-11,84
35	600	409,17	315,26	54,21
36	614	452,15	316,88	26,55
37	628	400,26	253,58	5,83
38	642	349,55	305,28	17,46

39	654	347,42	243,65	35,92
40	666	290,42	277,56	19,13
41	678	311,18	232,98	-28,72
42	690	288,92	306,15	-31,51
43	702	277,77	430,85	77,43
44	738	407,80	479,10	99,81
45	750	246,73	276,26	-13,52
46	762	194,36	210,58	6,34
47	774	284,22	164,71	63,25
48	786	320,72	180,09	43,15
49	798	384,86	272,71	62,89
50	812	408,77	219,19	74,82
51	826	381,28	266,84	88,33
52	840	309,42	251,31	34,44
53	854	371,08	217,01	105,96
54	862	403,88	207,15	16,21
55	882	373,29	265,38	74,91
56	894	403,42	275,04	40,69
57	906	298,82	258,76	-2,58
58	918	370,71	226,56	-4,41
59	930	356,24	266,53	-31,92
60	942	380,04	308,76	110,07
61	978	503,35	440,46	132,55
62	990	281,54	277,62	19,72
63	1002	266,44	175,31	14,88
64	1014	235,46	257,74	4,81
65	1026	310,14	162,58	38,30
66	1038	296,56	281,18	26,43
67	1052	288,38	294,18	17,74
68	1066	388,45	198,53	70,43
69	1080	368,94	220,97	21,03

Tabela 6.xx – Dados de medições das Tensões Residuais do painel soldado com a CW-FCAW (120 m/min). Fonte: Autor.

PAINEL SOLDADO – CW-FCAW (120 m/min)				
PONTO	DISTANCIA (mm)	($\sigma_y - \sigma_x$) (MPa)		
		LINHA 01	LINHA 02	LINHA 03
1	120	230,81	152,83	-99,18
2	134	246,58	111,41	-132,04
3	148	222,24	143,93	-135,02
4	162	213,48	129,31	-145,28
5	174	192,26	79,71	-196,86
6	186	149,22	96,70	-210,45
7	198	195,54	145,32	-245,09
8	210	135,43	107,97	-247,24

9	222	314,53	185,09	-61,95
10	258	248,98	192,88	-112,34
11	270	212,31	68,39	-103,16
12	282	154,07	23,56	-129,61
13	294	234,92	99,51	-164,88
14	306	187,64	45,79	-139,43
15	318	218,73	59,37	-197,55
16	332	209,36	117,14	-184,33
17	346	220,83	58,18	-117,91
18	360	220,04	41,75	-160,15
19	374	245,61	15,08	-89,63
20	388	240,07	60,23	-118,23
21	402	221,58	87,20	-174,49
22	414	176,14	73,49	-212,11
23	426	177,29	94,79	-216,46
24	438	125,14	27,62	-205,43
25	450	128,93	97,12	-204,46
26	462	255,06	234,31	-138,26
27	498	259,59	156,08	-218,98
28	510	112,95	90,45	-284,79
29	522	127,77	60,44	-197,94
30	534	156,71	96,96	-249,22
31	546	136,89	50,05	-187,92
32	558	132,61	86,88	-174,33
33	572	186,31	51,73	-183,39
34	586	196,15	72,97	-159,89
35	600	214,06	80,00	-166,61
36	614	251,70	47,00	-205,79
37	628	215,66	74,02	-110,82
38	642	212,80	83,80	-199,87
39	654	272,02	81,41	-288,83
40	666	180,49	83,90	-280,85
41	678	193,24	102,34	-250,54
42	690	131,38	122,52	-292,13
43	702	139,00	224,45	-101,10
44	738	178,14	275,79	-69,12
45	750	123,73	140,58	-251,30
46	762	150,32	73,80	-237,66
47	774	137,91	70,76	-303,59
48	786	221,84	82,41	-203,95
49	798	154,79	65,49	-164,75
50	812	225,85	76,48	-193,47
51	826	241,39	92,10	-151,45
52	840	191,58	166,70	-184,84
53	854	252,60	106,65	-167,85
54	862	173,08	109,24	-231,91

55	882	196,46	149,66	-245,60
56	894	190,39	76,86	-212,23
57	906	133,27	59,01	-141,88
58	918	82,81	76,75	-230,31
59	930	146,61	95,96	-187,39
60	942	184,90	275,13	-263,42
61	978	230,51	253,13	-95,79
62	990	200,72	132,70	-256,13
63	1002	130,75	134,92	-241,41
64	1014	174,68	150,99	-274,10
65	1026	168,77	117,30	-179,51
66	1038	161,44	127,29	-240,20
67	1052	242,97	166,59	-270,75
68	1066	216,28	101,53	-237,00
69	1080	217,60	123,48	-164,16