

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ISRAEL LIRA GONÇALVES

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TRATAMENTO DE ALÍVIOS DE
TENSÕES EM UMA JUNTA SOLDADA BASEADO NO MÉTODO DPC

RECIFE
2015

ISRAEL LIRA GONÇALVES

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TRATAMENTO DE ALÍVIOS DE
TENSÕES EM UMA JUNTA SOLDADA BASEADO NO MÉTODO DPC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Fabricação

Orientador: Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira

Co-orientador: Oscar Olímpio de Araújo Filho

RECIFE

2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

G635i Gonçalves, Israel Lira.
Influência da temperatura no tratamento de alívios de tensões em uma junta soldada baseado no método DPC / Israel Lira Gonçalves. - Recife: O Autor, 2015.
88 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.
Coorientador: Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Tratamento de alívios de tensões. 3. Soldagem GMAW. 4. Deslocamento de Pontos Coordenados. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti. (Orientador). II. Araújo Filho, Oscar Olímpio de (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-197

26 de junho de 2015

“INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TRATAMENTO DE ALÍVIOS DE
TENSÕES BASEADO NO MÉTODO DPC”

ISRAEL LIRA GONÇALVES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. OSCAR OLÍMPIO DE ARAÚJO FILHO
CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

Prof. Dr. OSCAR OLÍMPIO DE ARAÚJO FILHO (UFPE)

Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (UFPE)

Prof. Dr. TIAGO DE SOUSA ANTONINO (UFPE)

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Sou grato a todos os professores, alunos e funcionários desta Universidade que participaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti e ao meu co-orientador Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho, responsáveis pela realização deste trabalho.

Agradeço aos colegas de laboratório Roberto Alécio, Tiago Antonino, Euclides Cabral e principalmente ao grande Paternak Barros, ao professor Tiago Leite Rolim e aos técnicos Ivaldo e Janaína na realização dos experimentos.

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus amados pais Armando Gonçalves da Silva e Rosineide Lira Gonçalves que me apoiaram durante todo percurso acadêmico e ao meu ídolo e irmão Armando Gonçalves da Silva Júnior que me proporcionaram a melhor formação possível, tanto em caráter quanto intelectual, sem deixar de lado a ética e amor que tanto contribuiu para me motivar em todos os desafios.

Agradeço também a meus amigos e familiares em especial a Eronita, Turde, Danillo, Isabella, Miguel, Rosilda, Thiago, Dd, Lena, Vado, Sergio, Sheily, Leka, Deise, Eltinho, Estelita, Elton, Ana, Jéssica, Mariza, André, Flávia, Cássio, Bruna, Kelly, Célio, Walber, Brenno, Jopa, Lucas, Rogério, Marcelo, Suseanne, Teresa, Laura, Cleber, Luana, Jamilly, Germana, Adson, Polly, Sof's, Jacqueline, Paulo, Claudete, Israel, Flaviana, Guilherme, Rodolfo...

Finalmente, agradeço a Camila Meneghini, pela paciência, pelo incentivo, pela força e principalmente pelo amor. Valeu a pena todo tempo, toda distância, todo sofrimento, todas as renúncias... Valeu a pena esperar... Pois hoje estamos colhendo, juntos, os frutos do nosso empenho!

RESUMO

Este estudo analisou a influência da temperatura no tratamento de alívios de tensões, tendo como base o método de deslocamento de pontos coordenados (DPC), e a importância do sentido de soldagem no deslocamento dos pontos coordenados em uma chapa de aço naval (ASTM A-131 de grau AH-36), retangular, de dimensões 200 mm x 65 mm e 14 mm de espessura pelo processo de soldagem GMAW. Nos tratamentos térmicos foram utilizadas temperaturas de 580°C, 630°C e 680°C durante intervalos de tempo restritos e resfriados ao ar. A medição do alívio das tensões residuais foi realizada através do método alternativo de deslocamento de pontos coordenados e validada através da difração de raios-X, que por meio da variação das distâncias dos furos, provocada pelo tratamento térmico, permite medir as tensões residuais pontuais presentes nas juntas. Com a variação das temperaturas ensaiadas obteve-se um perfil de alívio de tensão residual maior utilizando temperaturas de tratamento térmicas mais elevadas.

Palavras-chave: Tratamento de alívios de tensões. Soldagem GMAW. Deslocamento de Pontos Coordenados.

ABSTRACT

This study aims to analyze the influence of the temperature in treatment of stress relief used in DCP method (Displacement of Coordinated Point) and the importance of welding direction in displacement of the coordinate points, using a naval steel sheet (ASTM A 131 grade AH36) with rectangular dimensions of 200 mm X 70 mm and 14 mm thick, the GMAW process was performed considering the welding direction after welding different points were previously mapped using a coordinated measurement machine. The residual stresses were carried out through this alternate method considering displacement of coordinated point produced by heat treatment in temperature of 580°C, 630°C and 680°C. Before heat treatment, the residual stresses in previously mapped points were measured by X-Ray diffraction. The results showed that the temperature of heat treatments increase the displacement of the points: higher temperature produced higher displacement and in consequence higher apparent residual stress. X-Ray diffraction showed a good agreement with DCP method in sheet heat treated at 680°C compared to the other temperatures.

Keywords: Treatment of relief of tensions. GMAW welding. Displacement of Coordinate Points

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Processo de Soldagem MIG/MAG.....	20
Figura 3.2 – Esquema do processo GMAW.....	22
Figura 3.3 – Tipos de transferência. (a) Curto circuito. (b) Globular. (c) Aerossol. ..	22
Figura 3.4 – Esquema de interação mecânica/térmica/metalmúrgica de origem das tensões residuais.....	26
Figura 3.5 – Superposição das Tensões Residuais dos Tipos I, II e III.....	28
Figura 3.6 – Tensões residuais típicas em soldagem de chapas. (a) perfil “T”. (b) perfis “H”. (c) caixa soldada. Tensão de compressão (-); tensão de tração (+).	31
Figura 3.7 – Desenvolvimento de TR longitudinais durante a soldagem.	32
Figura 3.8 – Distribuição típica de TR em uma solda de topo. (a) Sistema de coordenadas e tensões. (b) Tensões longitudinais. (c) Tensões transversais (linha tracejada: distribuição de tensões quando a solda faz parte de uma estrutura e está sujeita a tensões de reação).....	33
Figura 3.9 – Difração de Raios-X pelos átomos (A-A’ e B-B’).....	37
Figura 3.10 – Varredura da superfície da amostra.....	37
Figura 3.11 – Deslocamento dos picos de difração.	38
Figura 3.12 – Modelo de tensões no estado plano.	39
Figura 3.13 – Marcação superficial na chapa.	41
Figura 3.14 – (a) Representação da variação do LR e LE em função da temperatura. (b) Alívio de tensões quando se aquece o material.	43
Figura 3.15 – Princípio de Medição por coordenadas.....	47
Figura 3.16 – Composição MMC.	48
Figura 4.1 – Chapa de aço ASTM AH-36.	49
Figura 4.3 – Máquina Semiautomática de Corte a Gás CG1-30.....	52
Figura 4.3 – Corpo de Prova Soldado.(a) Método 1.(b) Método 2.	53
Figura 4.4 – Procedimento de Soldagem.....	54
Figura 4.5 – Marcação dos Pontos Coordenados. (a) Marcação para o método 1. (b) Marcação para o método 2.....	55
Figura 4.6 – Máquina de Medição por Coordenadas, modelo CRYSTA 574.	56
Figura 4.7 – Forno Mufla JUNG Micro Processado – LF2312.	57
Figura 4.8 – Sistema da decapagem eletrolítica.	59
Figura 4.9 – Esquema dos pontos estudados para a chapa ensaiada pelos dois métodos.....	59
Figura 4.10 – Conjunto tubo de raios-X/detector (UFCEG -PB).....	60
Figura 5.1 – Gráfico Temperatura x Fluxo de Calor, obtido por DSC.....	62

Figura 5.2 – Gráfico comparativo das tensões residuais transversais obtidas por DR-X e pelo método DPC.	64
Figura 5.3 – Comportamento da Chapa 1 para o Tratamento Térmico de 580°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) Tensões Residuais longitudinais [MPa].	65
Figura 5.4 – Comportamento da Chapa 2 para o Tratamento Térmico de 630°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) Tensões Residuais longitudinais [MPa].	66
Figura 5.5 – Comportamento da Chapa 3 para o Tratamento Térmico de 680°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) Tensões Residuais longitudinais [MPa].	67
Figura 5.6 – Comportamento da Chapa 4 para o Tratamento Térmico de 680°C a 60 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) Tensões Residuais longitudinais [MPa].	68
Figura 5.7 – Comportamento da Chapa 6 para Tratamento Térmico de 580°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) TR longitudinais [MPa]. (c) TR transversais [MPa].	69
Figura 5.8 – Comportamento da Chapa 7 para Tratamento Térmico de 680°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) TR longitudinais [MPa]. (c) TR transversais [MPa].	70
Figura 5.9 – Macrografia da JS para o tratamento térmico de 580°C.	73
Figura 5.10 – Micrografia do Metal de Base. (a) Sem tratamento térmico. (b) Tratada termicamente a 580°C. (c) Tratada termicamente a 630°C. (d) Tratada termicamente a 680°C	74
Figura 5.11 – Micrografia da Interface MB e ZTA. (a) Sem tratamento térmico. (b) Tratada termicamente a 580°C. (c) Tratada termicamente a 630°C. (d) Tratada termicamente a 680°C.	75
Figura 5.12 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 01.	76
Figura 5.13 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 02.	77
Figura 5.14 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 03.	78
Figura 5.15 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 04.	78
Figura 5.16 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 05.	79
Figura 5.17 – Comportamento dos pontos coordenados.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Processos de soldagem por fusão.	18
Quadro 3.2 – Comparação dos principais métodos não destrutivos para medição das TRs.	35
Quadro 3.3 – Diferenças entre os métodos de medição.	46
Quadro 4.2 – Composição Química do aço ASTM AH-36.	50
Quadro 4.1 – Propriedades Mecânicas do aço ASTM AH-36.	50
Quadro 4.3 – Composição Química do metal de adição, %massa.	50
Quadro 4.4 – Propriedades Mecânicas mínimas do metal de adição.	51
Quadro 4.5 – Parâmetros de Soldagem.	54
Quadro 4.6 – Temperaturas e tempos de tratamento.	57
Quadro 5.2 – Tensões residuais transversais obtidas por DR-X e pelo método DPC.	63
Quadro 5.2 – TR longitudinais obtidas pelo método DPC com CP tratado a 580°C e 30 minutos.	64
Quadro 5.3 – TR longitudinais obtidas pelo método DPC com CP tratado a 630°C e 30 minutos.	65
Quadro 5.4 – TR longitudinais obtidas pelo método DPC com CP tratado a 680°C e 30 minutos.	66
Quadro 5.5 – TR longitudinais obtidas pelo método DPC com CP tratado a 680°C e 60 minutos.	67
Quadro 5.6 – TR obtidas pelo método DPC para o CP tratado a 580°C e 30 minutos.	68
Quadro 5.7 – TR obtidas pelo método DPC para o CP tratado a 680°C e 30 minutos.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al – Alumínio

ASM – American Society for Materials

ASME – American Society for Mechanical Engineers

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AWS – American Welding Society

C – Teor de carbono em peso do material

CNC – Computer Numerical Control

CP – Corpo de Prova

Cr – Cromo

Cu – Cobre

DPC – Deslocamento de Pontos Coordenados

DR-X – Difração de Raios-X

DSC – *Differential Scanning Calorimetry*

E – Módulo de elasticidade de material

Eq. – Equação

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

H_t – Energia de soldagem (aporte térmico)

JS – Junta Soldada

LE – Limite de Escoamento

LR – Limite de Resistência

MAG – *Metal Active Gás*

MIG – *Metal Inert Gás*

MB – Metal de base

MMC – Máquina de medir por Coordenadas

Mn – Manganês

n – Um número inteiro

Nb – Nióbio

Ni – Níquel

P – Fósforo

S – Enxofre

Si – Silício

Sn – Estanho

SUAPE – Complexo Industrial Portuário de Pernambuco

TMC – Tecnologia de medição por coordenadas

TR – Tensões Residuais

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

V – Tensão elétrica em volts

V – Vanádio

v – velocidade de soldagem

x, y, z – Coordenadas ortogonais

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

θ – Ângulo de difração

ε_x – Deformação na direção da solda

ε_y – Deformação na normal a linha da solda

λ – Comprimento de onda do feixe incidente de raios-X

σ – Tensão residual

σ_x – Tensão residual longitudinal - direção da solda

σ_y – Tensão residual transversal - direção normal à linha da solda

ν – Coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	<i>OBJETIVO GERAL.....</i>	<i>17</i>
2.2	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</i>	<i>17</i>
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	<i>SOLDAGEM.....</i>	<i>18</i>
3.1.1	Soldagem GMAW.....	19
3.1.2	Energia de Soldagem para o Processo GMAW	25
3.2	<i>TENSÕES RESIDUAIS.....</i>	<i>26</i>
3.2.1	Origem das Tensões Residuais.....	29
3.2.2	Tensões Residuais Devido ao Processo de Soldagem.....	29
3.3	<i>MÉTODOS DE MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS</i>	<i>34</i>
3.3.1	Método de Difração de Raios-X.....	36
3.3.2	Método DPC.....	40
3.4	<i>TRATAMENTO TÉRMICO NO ALÍVIO DE TENSÕES (TTAT)</i>	<i>42</i>
3.5	<i>MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS</i>	<i>44</i>
3.5.1	Diferença Entre a Tecnologia de Medição Por Coordenadas e os Métodos Convencionais	44
3.5.2	Princípio da Medição por Coordenadas	47
3.5.3	Composição básica de máquinas de medir por coordenadas	48
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
4.1	<i>MATERIAIS</i>	<i>49</i>
4.1.1	Metal de Base	49
4.1.2	Consumíveis da Soldagem	50
4.1.2.1	Metal de Adição.....	50
4.1.2.2	Gás de Proteção.....	51
4.2	<i>MÉTODOS</i>	<i>51</i>
4.2.1	Equipamentos e acessórios	51
4.2.1.1	Fonte de Soldagem	51

4.2.1.2	Sistema de Deslocamento	52
4.2.2	Procedimentos de Soldagem	53
4.2.2.1	Cálculo da Energia de soldagem	54
4.2.3	Procedimento de Marcação para a Medição por Coordenadas.....	55
4.2.4	Procedimento de Tratamento Térmico	56
4.2.5	Caracterização Metalográfica	57
4.2.6	Ensaio pelo Método de Difração de Raios-X.....	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1	<i>RESULTADOS</i>	61
5.1.1	Determinação das Temperaturas de Tratamento Térmico de Alívios de Tensões.....	61
5.1.2	Determinação das tensões residuais longitudinais aliviadas no TTAT	62
5.1.2.1	Tensões residuais obtidas através de DR-X e pelo Método DPC.....	62
5.1.2.2	Tensões residuais obtidas pelo método DPC com soldagem unidirecional.	64
5.1.2.3	Tensões residuais obtidas pelo método DPC com soldagem nas duas direções.....	68
5.2	<i>DISCUSSÕES</i>	71
5.2.1	Validação do Método DPC	71
5.2.2	Análise Macroscópica	72
5.2.3	Evolução Microestrutural	73
5.2.3.1	Microestruturas do Metal de Base	74
5.2.3.2	Microestruturas da interface Metal de Base e ZTA.....	75
5.2.4	Avaliação da influência do TTAT na junta soldada	76
5.2.5	Avaliação da influência do sentido de soldagem e da temperatura	79
6	CONCLUSÃO	81
	REFERENCIAS.....	86
	APÊNDICE	86

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o mais importante e comum processo de fabricação disponível para unir elementos mecânicos. Sua vasta gama de procedimentos oferece grande versatilidade, cuja aplicação pode variar desde pequenos componentes até a indústria de construção naval, tendo em cada método peculiaridades a serem cuidadosamente escolhidas para uma aplicação específica em projetos.

Os processos de soldagem são utilizados visando também à recuperação de peças desgastadas, para a formação de revestimentos com características especiais sobre superfícies metálicas e para cortes. Tal sucesso está adjunto a diversos fatores, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional. Entretanto, a soldagem pode ser muitas vezes um processo “traumático”, envolvendo, em geral, a aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume do material, o que leva a distorções e alterações estruturais (MODENESI, MARQUES, 2006).

Devido às buscas constantes na melhoria da qualidade dos procedimentos de manufatura, as empresas começaram a valorizar fatores não considerados determinantes no seu regime produtivo, como por exemplo, as tensões residuais (TR) oriundas dos processos, com repercussão direta na vida útil de seus equipamentos. Com isso os tratamentos térmicos são os mais aplicados para reduzir tais TR ou distorções, no qual são fatores necessários para manter ou restaurar as propriedades do metal de base afetado. A eficiência destes tratamentos depende basicamente da temperatura e do tempo de permanência a fim de minimizar ou reduzir o estado de tensões.

Macherauch & Kloos (1987), definiram TR como “tensões autoequilibradas existentes nos materiais na ausência de carregamento externo, deslocamentos ou gradientes de temperatura”. A determinação das tensões residuais pode ser realizada por diversos procedimentos experimentais, tais como as técnicas baseadas no furo cego, difração de raios-X, método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC), difração de nêutrons e ultrassom,

que podem envolver procedimentos não destrutivos ou destrutivos (CALLE, 2004).

Sob o aspecto metrológico pode-se dizer que tensões residuais são grandezas macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas, cujos valores variam de zero até valores superiores à tensão de escoamento do material. Estes campos de TR oriundos de boa parte dos processos de fabricação podem ser trativos ou compressivos e variam de ponto para ponto. Na prática as grandezas usualmente medidas são as duas tensões principais atuantes na superfície da peça e em sua direção principal (SIQUEIRA FILHO *et al.*, 2013).

Sendo necessário conhecer o nível de TR para a qualificação dos procedimentos que introduzem grande quantidade de tensões residuais, tais quais jateamento, soldagem, granalhamento, trabalho a frio, fundição, usinagem, tratamentos térmicos, entre outros. A maneira mais simples de determinar o nível de TR existente em um componente seria através de modelos analíticos ou numéricos. Entretanto as desconsiderações das variações mecânicas ou metalúrgicas nos métodos teóricos geram grandes variações, por isso na maioria das situações de soldagem, a determinação analítica ou numérica torna-se inviável e os métodos experimentais assumem grande importância.

Para tal, neste trabalho, foi aplicada a metodologia de DPC, uma alternativa de baixo custo e de fácil aplicação ao método do furo cego. Validada pela técnica de raios-X, no qual a presente contribuição refere-se ao estudo da influência da temperatura do tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) e da direção da soldagem no estado de tensões residuais de uma junta soldada (JS). Tal análise é realizada em quatro etapas, processo de soldagem, medição dos pontos coordenados, TTAT e a remedição dos pontos após deslocamento. Com a realização experimental e o desenvolvimento do modelo, procedeu-se a comparação dos mesmos para sua validação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como escopo principal o estudo da influência da temperatura do tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) no estado de tensões residuais de uma junta soldada (JS) do aço ASTM AH-36 através da metodologia de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC) e validá-la por meio de comparações com o método de difração de raios-X (DR-X).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo proposto foi definido um conjunto de objetivos específicos que foram importantes para o desenvolvimento desta pesquisa.

- Soldagem de corpos de prova pelo processo GMAW;
- Determinar as coordenadas dos pontos em uma Máquina de Medir por coordenadas e medir seus deslocamentos após tratamento térmico;
- Verificar a influência da temperatura no tratamento térmico de alívio de tensões;
- Calcular os valores das tensões residuais aliviadas através dos deslocamentos dos pontos coordenados e validar pelo método de DR-X;
- Observar a evolução microestrutural para as diversas temperaturas de tratamento térmico;
- Verificar se há influência do sentido de soldagem sobre os resultados de medições.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SOLDAGEM

De acordo com a AWS, a soldagem visa obter a coalescência localizada produzida através do aquecimento, até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão ou materiais de adição. Porém, muitos processos de soldagem ou variações são usados para a deposição de material sobre uma superfície visando à recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com os de soldagem são utilizados para o corte ou para o recobrimento de peças, no qual vários aspectos dessas operações de recobrimento e cortes são similares à soldagem e por isso, muitos aspectos destes processos são juntamente abordados (MODENESI, MARQUES, 2006).

Dentre os diversos processos existentes, destaca-se um número de processos por fusão os quais podem ser separados em subgrupos de acordo com o tipo de fonte de energia utilizada. O Quadro 3.1 mostra os principais processos de soldagem por fusão e suas principais características e aplicações.

Quadro 3.1 – Processos de soldagem por fusão.

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletroescória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática ou semiautomática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO ₂	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semiautomático	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O ₂ , Argônio + CO ₂ , CO ₂	Automática. ou semiautomática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição

Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constricto por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ($\approx 10^{-4}$ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Como acima. Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Chama oxiacetilênica		Gás (CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O)	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Fonte: Modenesi, Marques (2000).

3.1.1 Soldagem GMAW

A soldagem a Arco Gás-Metal (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW) utiliza o calor de um arco elétrico entre um eletrodo nu alimentado de maneira contínua e o metal de base (MB). O calor proveniente do arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (consumível) e a peça, funde o final do eletrodo e a superfície do metal de base para formar a solda. De acordo com Barbosa (2007) a proteção do arco e da poça de solda fundida vem inteiramente de um gás alimentado externamente, o qual pode ser inerte, ativo ou mistura destes. Portanto dependendo do gás podem-se ter os seguintes processos:

- Processo MIG (*Metal Inert Gas*): injeção de gás inerte.

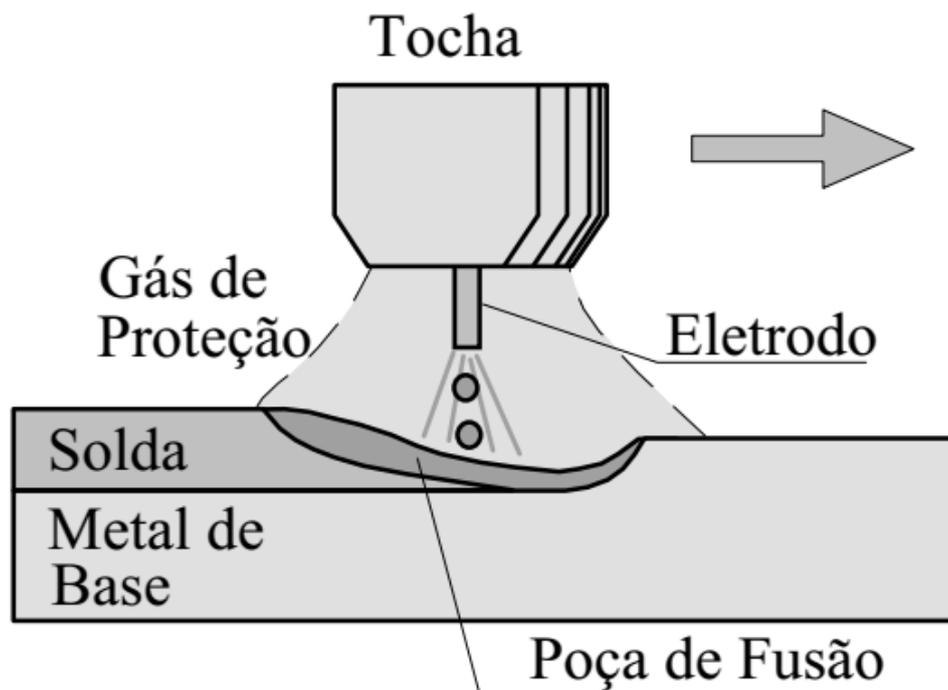
O gás pode ser:

- Argônio
- Hélio
- Argônio + 1 a 3% de O₂

- Processo MAG (*Metal Active Gas*): injeção de gás ativo ou mistura de gases que perdem a característica de inertes, quando parte do metal de solda é oxidado. Os gases utilizados são:
 - CO_2
 - $\text{CO}_2 + 5 \text{ a } 10\% \text{ O}_2$
 - Argônio + 15 a 30% CO_2
 - Argônio + 5 a 15% O_2
 - Argônio + 25 a 30% N_2

O processo de soldagem GMAW, também conhecido por MIG/MAG pode ser exemplificado esquematicamente como ilustra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Processo de Soldagem MIG/MAG.



Fonte: Modenesi, Marques (2000).

O grande diferencial do processo de soldagem GMAW comparado com os processos de soldagem com eletrodo revestido e a arco submerso é a não formação de escória, pois neste processo não se utiliza fluxo. No entanto, um filme vítreo (que tem o aspecto de vidro) de Sílica se forma de eletrodos de alto Silício, o qual deve ser tratado como escória.

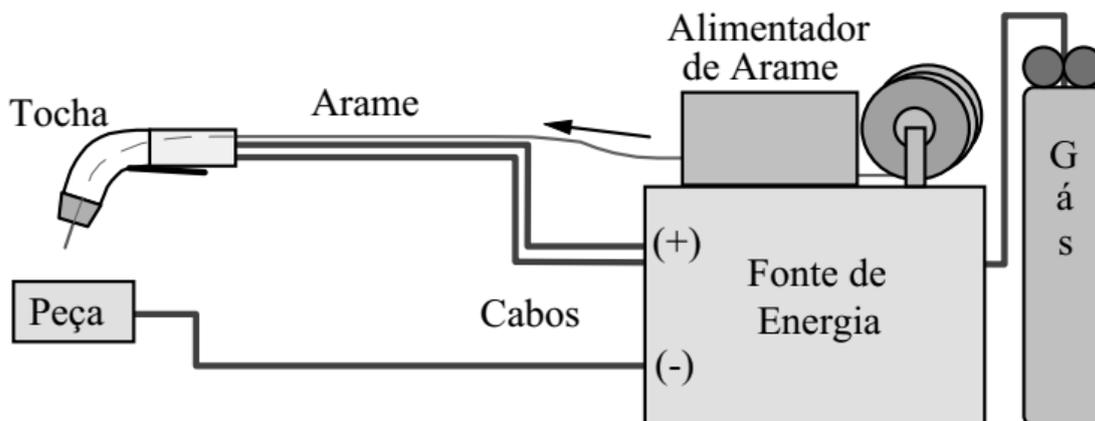
De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011) o arco elétrico pode ser definido como uma descarga elétrica, mantida pela ionização de um gás, a elevada temperatura, denominada plasma. A energia térmica produzida é suficiente para fundir as peças a serem unidas e o arame eletrodo, que é transferido para a junta constituindo o metal de adição. Assim a soldagem a arco elétrico se caracteriza pela diferença de potencial entre a peça e o eletrodo, bem como pela corrente circulante entre estes dois pólos.

De acordo com Fogagnolo (2011) o arranjo dos pólos durante a soldagem define o processo de três diferentes formas:

- Corrente contínua e polaridade inversa (CC+) quando o eletrodo está ligado ao pólo positivo, propiciando uma maior penetração e uma menor taxa de deposição;
- Corrente contínua e polaridade direta (CC-), no qual o eletrodo está ligado ao pólo negativo, gerando uma menor penetração e uma maior taxa de deposição;
- Corrente alternada usada para solda de materiais com camadas de óxido, alumínio e magnésio.

O equipamento básico do processo GMAW consiste em uma fonte de energia, uma pistola (tocha) de soldagem, a fonte de gás de proteção e um sistema de acionamento de arame conforme esquematizado na Figura 3.2. De acordo com Barbosa (2007) a soldagem MIG/ MAG é um processo normalmente semi-automático, em que a alimentação do arame é feita através de um alimentador motorizado, e o soldador é apenas responsável pela iniciação e interrupção da soldagem como também a movimentação da tocha ao longo da junta. A manutenção do arco se dá pela alimentação contínua do arame e o comprimento do arco é mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, independentemente dos movimentos do soldador.

Figura 3.2 – Esquema do processo GMAW.

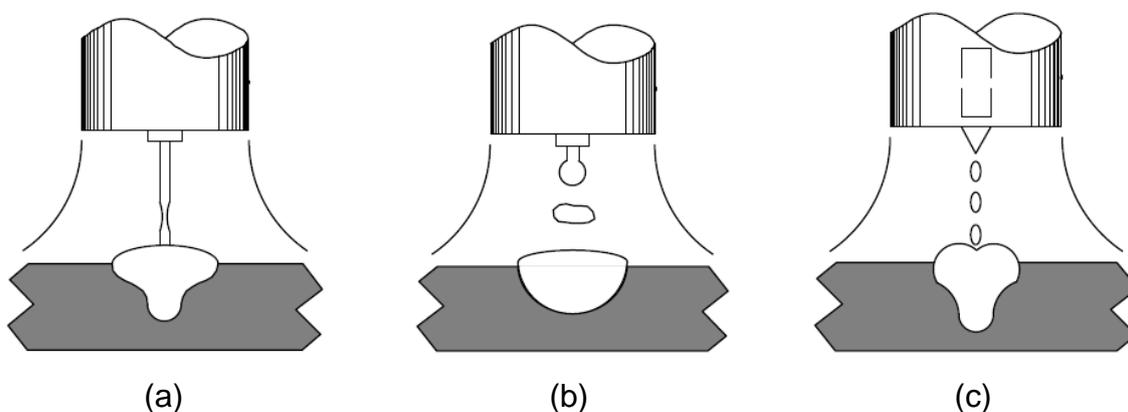


Fonte: Modenesi e Marques (2006).

A principal finalidade do gás protetor na soldagem MIG/ MAG é proteger a solda da contaminação atmosférica. O gás protetor também influi no tipo de transferência, na profundidade de penetração, no formato do cordão, velocidade máxima de soldagem, tendência ao aparecimento de mordeduras e custo da soldagem. Os gases inertes puros são usados principalmente na soldagem de metais não ferrosos, particularmente os mais reativos, como o alumínio e o magnésio. Na soldagem de ferrosos, a adição de pequenas quantidades de gases ativos melhora sensivelmente a estabilidade do arco e a transferência de metal.

Wainer, Brandí e Melo (2004) citam os três principais modos de transferência de metal no processo GMAW, mostrados na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Tipos de transferência. (a) Curto circuito. (b) Globular. (c) Aerossol.



Fonte: Miler (2014).

- Curto-circuito: A transferência se dá através do contato entre o eletrodo e a poça de fusão por gotejamento.
- Globular: Similar à transferência por curto circuito, este tipo de transferência se caracteriza por gotas aproximadamente esféricas com o diâmetro do eletrodo. Mas diferentemente da transferência por curto circuito, as gotas se desprendem do eletrodo antes de alcançarem a poça de fusão.
- Aerossol: Este caso se aproxima da transferência globular, no entanto os glóbulos possuem um diâmetro inferior ao diâmetro do eletrodo.

Barbosa (2007) cita as principais vantagens presentes nos processos de soldagem MIG/MAG:

- Alta taxa de deposição em relação a soldagem com eletrodo revestido;
- Menos gás e fumaça na soldagem;
- Alto fator de trabalho do soldador (tempo de arco aberto sobre tempo total de soldagem);
- Alta versatilidade quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis;
- Não existência de fluxos de soldagem e, conseqüentemente, ausência de operações de remoção de escória;
- Larga capacidade de aplicação;
- Exigência de menor habilidade do soldador, quando comparada com a soldagem por eletrodo revestido;
- A soldagem pode ser executada em todas as posições.

De acordo com Barbosa (2007) a principal limitação da soldagem GMAW é sua sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, os quais influenciam diretamente a qualidade do cordão de solda. Além da necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para a solda. A determinação destes

parâmetros de soldagem é dificultada pela forte interdependência destes e por sua influência no resultado final da solda produzida. Outras limitações do processo são:

- Maior custo de equipamento;
- Maior necessidade de manutenção dos equipamentos;
- Menor variedade de consumíveis;
- Maiores velocidades de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a ocorrência de trincas, principalmente no caso de aços temperáveis.

Marques, Modenesi e Bracarense (2011) citam as principais descontinuidades presentes nos processos de soldagem:

- Porosidade: A entrada de gases durante a solidificação da poça de fusão pode levar a bolhas de gás aprisionadas dentro do metal solidificado. Esta descontinuidade pode ocorrer de maneira uniformemente distribuída, em grupos, alinhada, ou de forma vermicular (linhas de vazios);
- Falta de Fusão: Ausência de continuidade metálica entre o metal depositado e o metal existente (seja ele o metal de base ou seja de algum passe anterior). Suas principais causas são o aquecimento inadequado do metal de base ou a presença de óxidos, os quais impedem a passagem da corrente e formação do arco elétrico;
- Falta de Penetração: Preenchimento ou fusão ineficaz da raiz da solda;
- Trincas: Incapacidade do material em suportar as tensões decorrentes do processo. Atuam como concentradoras de tensão e podem levar a uma fratura frágil da junta;
- Mordedura: Ocorre quando o material na margem do cordão ou na base se funde sem a ocorrência de preenchimento, provocando uma redução na área útil e concentrações de tensões, além de reduzir à resistência a fadiga;

- Inclusões de Escória: Quando presentes entre passes, este defeito atua como concentrador de tensão e facilita a formação de trincas.

3.1.2 Energia de Soldagem para o Processo GMAW

O interesse térmico na operação de soldagem é, sobretudo, o de consentir a interpretação e prevenção dos fenômenos metalúrgicos no qual a operação esta englobada. Nos processos de soldagem, o cordão de solda e a zona termicamente afetada passam por ciclos térmicos que variam de acordo com suas disposições em relação à fonte de calor ou ao arco formado. Os pontos mais próximos da fonte de calor experimentam temperaturas mais elevadas e por tempos mais longos e todo esse efeito é medido a partir do cálculo da energia de soldagem, ou aporte térmico.

O aporte térmico (*heat input*) total é definido pela Equação 3.1.

$$H_t = \frac{V \cdot I}{v} \quad (3.1)$$

Onde:

H_t → Aporte de calor [J/mm];

V → Tensão no arco [V];

I → Corrente de soldagem [A];

v → Velocidade de soldagem [mm/s].

Entretanto, a energia produzida na soldagem não é totalmente transferida para a peça. Para cada processo define-se um coeficiente η de eficiência de transferência de energia, que para o caso específico da soldagem a GMAW com gás ativo, relata se uma eficiência de 77%, $\eta=0,77$ segundo o manual da ESAB. Assim, o aporte de calor líquido é definido por:

$$H_t = \eta \frac{V \cdot I}{v} \quad (3.2)$$

Onde:

H_t → Aporte de calor [J/mm];

η → Eficiência térmica do processo;

V → Tensão no arco [V];

I → Corrente de soldagem [A];

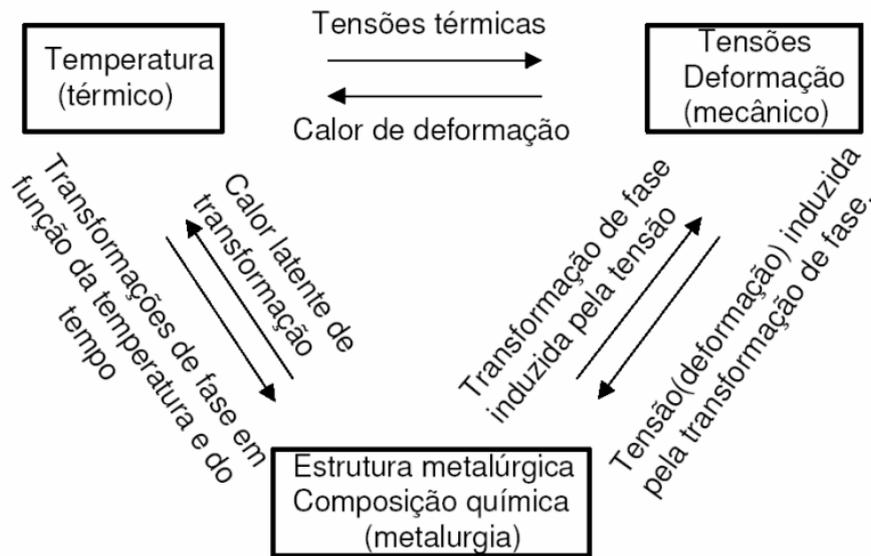
v → Velocidade de soldagem [mm/s].

3.2 TENSÕES RESIDUAIS

Macherauch & Kloos (1987), definiram tensões residuais como tensões autoequilibradas existentes nos materiais na ausência de carregamento externo, deslocamentos ou gradientes de temperatura. Portanto, todas as tensões residuais tem origem em deformações plásticas distribuídas de forma irregular, e estas podem ser geradas de forma mecânica, térmica ou metalúrgica (CALLE, 2004).

De acordo com Calle e Alves (2009) as tensões residuais em um material são geradas de forma mecânica, produzidas por deformações plásticas não uniformes provocadas por processos de esforço mecânico. As de origem térmica são consequência do aquecimento ou esfriamento não homogêneo do material provocado pelos gradientes de temperatura. As de forma metalúrgica estão associadas com reações químicas, precipitações e transformações de fase não uniformes produzidas por tratamentos térmicos e a exposição a produtos químicos na superfície do material. Porém, estas três fontes podem interagir entre si, de maneira que as tensões residuais podem ser consequência de mais de uma delas, Figura 3.4.

Figura 3.4 – Esquema de iteração mecânica/térmica/metalúrgica de origem das tensões residuais.



Fonte: Calle (2004).

É possível agrupar as tensões residuais em três tipos principais de acordo com a porção de material na qual elas podem ser observadas no qual a classificação mais comum dos tipos de tensões residuais existentes está definida na literatura quanto à área de abrangência (CHUVAS, 2012):

- Tensões Residuais do Tipo I:

São Tensões Residuais a níveis Macroscópicos, consideradas quase homogêneas na escala de vários grãos e equilibradas nos limites de todo os materiais. Os exemplos típicos destas tensões residuais são apresentados em sua maioria em materiais deformados plasticamente de maneira não uniforme, como barras sujeitas a dobramento além do limite elástico, processos de laminação, gradientes térmicos e têmpera em aço.

- Tensões Residuais do tipo II:

São Tensões Residuais a níveis Microscópicos, consideradas quase homogêneas na escala de um grão e equilibrados nos limites dos contornos de

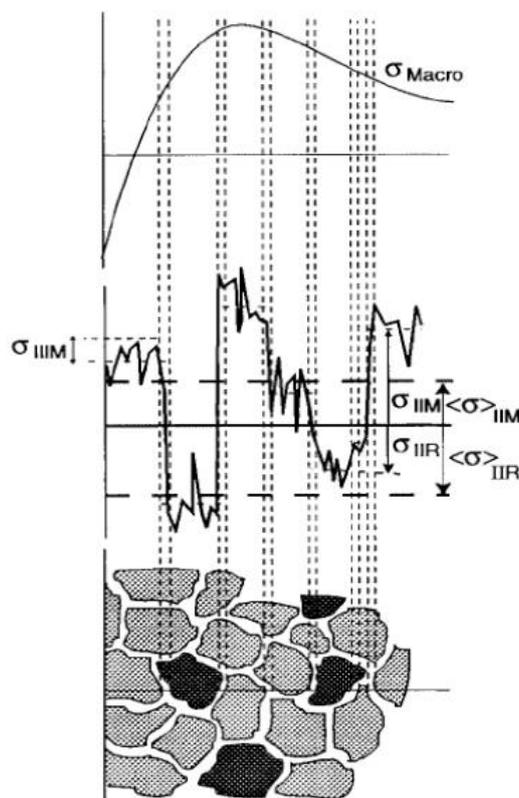
alguns grãos do material. Podem ocorrer em interfaces entre fases e partículas precipitadas e a matriz.

- Tensões Residuais do tipo III:

São Tensões Residuais a níveis Submicroscópicos, heterogêneas na escala de algumas distâncias interatômicas e equilibradas nos limites de algumas células unitárias. Ocorrem nos materiais metálicos sujeitos a processos que produzam descontinuidades na rede cristalina, tais como, vazios, impurezas e falhas de empilhamento, entre outros.

A superposição das Tensões Residuais dos tipos I, II e III determina o estado total de tensões residuais em um ponto particular do material conforme a Figura 3.5.

Figura 3.5 – Superposição das Tensões Residuais dos Tipos I, II e III.



Fonte: Chuvas (2012).

3.2.1 Origem das Tensões Residuais

De acordo com Macherauch & Kloos (1987) a origem das tensões residuais é variada e pode ser decomposta em três categorias:

- Processamento ou carregamento mecânico:

São as tensões residuais geralmente causadas por gradiente de deformação plástica devido à ação mecânica.

- Transformação de fase:

São as tensões residuais que ocorrem quando há variação heterogênea de volume causada por mudanças de fases.

- Efeitos térmicos:

São as tensões residuais decorrentes da deformação plástica heterogênea durante aquecimento ou resfriamento não uniforme.

As tensões residuais ainda podem ser ocasionadas por diversas solicitações atuando de forma combinada ou individualmente.

3.2.2 Tensões Residuais Devido ao Processo de Soldagem

De acordo com Welding Handbook – AWS (1994), as tensões residuais na soldagem são tensões existentes nas junções soldadas sem a atuação de forças ou momentos externos e formam-se com o decorrer do processo de soldagem e durante o resfriamento, como consequência de deformações temporárias, locais e heterogêneas, em escala macroscópica e microscópica do cordão de solda, na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) e no material de base (MB).

As tensões residuais intrínsecas ao processo de soldagem são funções de diversas variáveis como os parâmetros utilizados na execução do cordão, o número de passes a serem depositados, aplicações a geometria do cordão e da junta, composição química dos metais de base e de adição, restrição à dilatação térmica, etc.

De acordo com Silva (2005) durante o processo de soldagem e o início da solidificação da poça de fusão criam-se tensões térmicas nas regiões vizinhas ao cordão de solda, devido aos grandes gradientes de temperatura que variam com a posição e o tempo. Com a continuidade do resfriamento da junção soldada, as tensões térmicas continuam variando com a posição e o tempo e tendendo a aumentar, mas são sempre limitadas pela tensão de escoamento a quente do material na temperatura local a cada instante. Durante o resfriamento até a temperatura ambiente, com variações de temperatura e tensões térmicas, ocorrem também fenômenos metalúrgicos e mecânicos tais como: deformação plástica e transformação de fase. Todos estes efeitos podem gerar tensões residuais na junção soldada.

Genericamente, pode-se dizer que a determinação do nível de tensões residuais geradas por um processo de soldagem em uma geometria determinada torna-se, portanto, uma tarefa complexa e necessariamente possível de análise pelos aspectos da simulação numérica, associados com resultados experimentais.

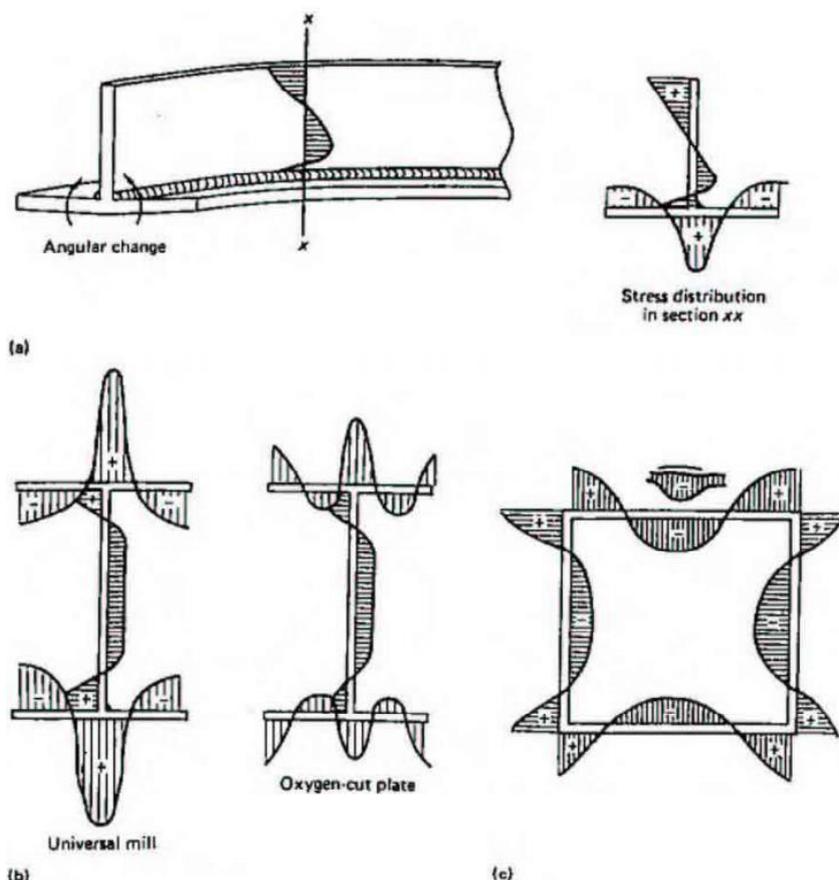
As três principais fontes de geração de TR em soldagem são:

- Restrição a contração e a dilatação, durante o resfriamento do material com diferentes temperaturas e níveis de plastificação devido à operação de soldagem;
- Resfriamento mais acelerado das superfícies da peça soldada (altas taxas de resfriamento);
- Transformação de fases metalúrgicas.

As tensões residuais nas soldagens podem ter dois efeitos principais: produção de distorções e/ou causar falha prematura do material. As distorções são originadas quando o calor da região de solda contrai não uniformemente,

causando contração em uma parte da solda, gerando tensões na secção do cordão de solda. As tensões elásticas de soldagem, em resposta a essas tensões, provocam distorções. As tensões residuais e a distorção afetam o comportamento dos materiais em relação à fratura, contribuindo para a flambagem e o trincamento quando estas falhas ocorrem nas aplicações de baixos níveis de tensão. Isso significa que tensões residuais podem contribuir nas falhas por fadiga do material (SILVA, 2005). As típicas tensões residuais em soldagem de chapas são mostradas na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Tensões residuais típicas em soldagem de chapas. (a) perfil “T”. (b) perfis “H”. (c) caixa soldada. Tensão de compressão (-); tensão de tração (+).

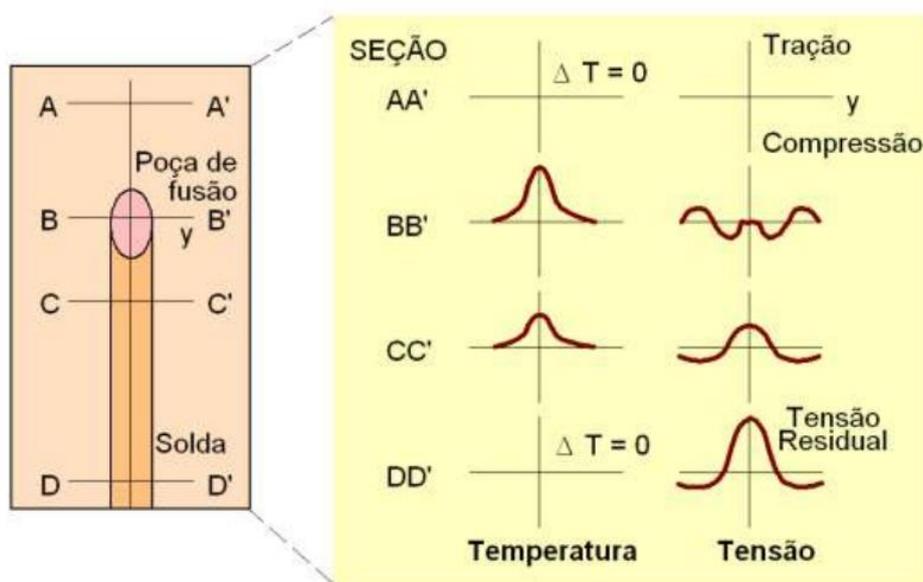


Fonte: ASM HANDBOOK (1994).

A Figura 3.7 ilustra o desenvolvimento de tensões devido ao aquecimento não uniforme de uma junta soldada. Na seção AA', que não é afetada pelo calor devido a distância da poça de fusão, a mesma está isenta de tensões. Na seção BB', junto à poça de fusão, o material aquecido tende a se expandir sendo,

entretanto, restringido pelas regiões mais frias da peça, gerando, assim, tensões de compressão em regiões próximas à ZF e tensões de tração nas regiões um pouco mais afastadas. Quando o seu limite de escoamento é atingido, o material aquecido deforma-se plasticamente de forma compressiva. Na poça de fusão, como o material está no estado líquido, às tensões são nulas. Com o resfriamento e após a solidificação da solda, o material passa a se contrair, sendo novamente impedido pelas regiões mais frias e afastadas da solda. Assim, na seção CC' surgem tensões de tração junto ao cordão e de compressão nas regiões mais afastadas. Estas tensões aumentam de intensidade levando ao escoamento da região aquecida. Após o resfriamento completo, seção DD', as tensões no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material (MODENESI e MARQUES, 2012).

Figura 3.7 – Desenvolvimento de TR longitudinais durante a soldagem.



Fonte: Modenesi e Marques (2012).

A distribuição de tensões residuais longitudinais e transversais em uma solda de topo pode ser ilustrada esquematicamente pela Figura 3.8. A distribuição de tensões longitudinais discutida anteriormente pode ser aproximada empiricamente, como citado por Okumura e Tanigusgi (2002):

$$\sigma_x = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (3.3)$$

$$\sigma_y = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (3.4)$$

Onde:

σ_x → Tensão residual longitudinal - direção da solda [Pa];

σ_y → Tensão residual transversal - direção normal à linha da solda [Pa];

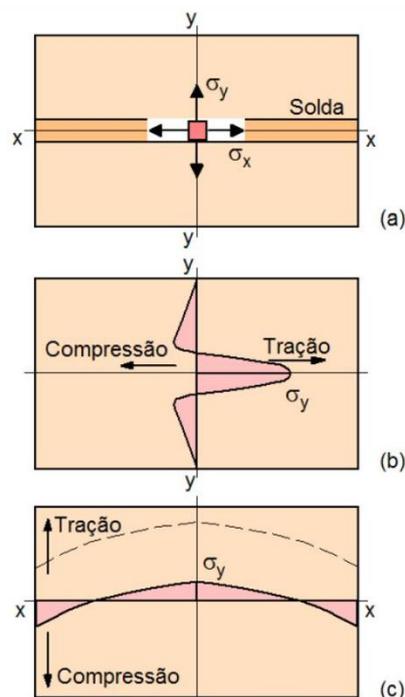
E → Módulo de elasticidade [Pa];

ε_x → Deformação na direção da solda;

ε_y → Deformação na normal a linha da solda;

ν → Coeficiente de Poisson.

Figura 3.8 – Distribuição típica de TR em uma solda de topo. (a) Sistema de coordenadas e tensões. (b) Tensões longitudinais. (c) Tensões transversais (linha tracejada: distribuição de tensões quando a solda faz parte de uma estrutura e está sujeita a tensões de reação).



Fonte: Modenesi e Marques (2012).

De acordo com Okumura e Tanigugsi (2002) os valores das tensões residuais σ_x e σ_y são obtidas pela medição de ε_x e ε_y , que são as deformações residuais nos pontos onde se deseja conhecer as tensões residuais

3.3 MÉTODOS DE MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS

A existência de tensões residuais pode melhorar o desempenho dos materiais frente às agressividades do meio externo e reduzir as falhas por fadiga. Entretanto as mesmas podem gerar distorções no componente, tornando necessária à introdução de uma etapa posterior encarecendo o processo. Assim, para alcançar uma melhoria significativa no controle do produto e desempenho de componentes mecânicos é necessário incorporar informações em relação das tensões residuais e ampliar métodos confiáveis para a sua determinação (CALLE e ALVES, 2009).

Existem diversas técnicas de medição da tensão residual e a mesma deve ser selecionada com base em uma série de parâmetros, tais quais o material, a geometria do componente, o tipo de tensão residual, o máximo gradiente de tensão residual, a localização onde será a medição (em campo ou no laboratório), o tipo de intervenção (método destrutivo ou não-destrutivo), a precisão, o tempo de resposta, a repetitividade e o custo (CALLE, 2004).

Calle e Alves (2009) subdividiu as técnicas de medição em três grandes grupos em função da natureza do mecanismo que utilizam para medir as tensões:

- Técnicas baseadas no relaxamento de tensões

Técnicas não destrutivas e semi-destrutivas:

- Furo passante;
- Furo cego incremental;
- Fotoelasticidade;
- Holografia.

Técnicas destrutivas:

- Curvatura;
- Rosenthal e Norton;
- Gunnert;
- Ueda.

- Técnicas de difração:
 - Raios-X;
 - Synchrotron;
 - Nêutrons;
 - Elétrons.

- Técnicas baseadas na sensibilidade de algumas propriedades do material à tensão:
 - Magnéticos;
 - Ultrassom;
 - Raman;
 - Termo-elástico.

O Quadro 3.2 exibe as vantagens e desvantagens dos principais métodos não destrutivos utilizados para a medição de tensões residuais.

Quadro 3.2 – Comparação dos principais métodos não destrutivos para medição das TRs.

Método	Furo cego	Difração de Raios-X	Difração de nêutron	Ultrassônico	Magnético
<i>Hipóteses básicas</i>	Tensão biaxial uniforme na superfície do furo	Padrão: isotrópico, homogêneo, material policristalino	Isotrópico, homogêneo, material policristalino	Isotrópico, material homogêneo, tensões homogêneas na trajetória acústica entre o transmissor e o receptor.	Material ferromagnético
<i>Tipo de tensão analisada</i>	Tipo 1	Tipos 1, 2 e 3	Tipos 1 e 2	Tipos 1, 2 e 3	Tipos 1, 2 e 3
<i>Parâmetros de medição</i>	Deformação superficial ou deslocamentos	Alteração no espaçamento interplanar de materiais policristalinos	Alteração no espaçamento interplanar de materiais policristalinos	Variações da velocidade da onda ultrassônica	Amplitude do efeito "Barkhausen" ou permeabilidade magnética
<i>Zona mínima de análise</i>	0,5 mm ²	0,5 mm ²	4 mm ³	De 0,1 mm ² para método de alta frequência a 30 mm ² para método convencional	
<i>Problemas para o caso de grãos grandes e textura grosseira</i>	Não	Sim	Não	Sim	Sim
<i>Sensibilidade para endurecimento por deformação plástica</i>	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta
<i>Precisão normal</i>	± 20 MPa	± 20 MPa	± 30 MPa	10 a 20 MPa	10 a 20 MPa
<i>Profundidade da Inspeção</i>	0,02 a 15 mm	1 a 50µm	2mm a 50mm	0,015 a 3mm	0,1 a 1 mm

Fonte: Lu (1996).

3.3.1 Método de Difração de Raios-X

O método de Difração de Raios-X (DR-X) é uma técnica baseada na difração de Raios-X, no qual a deformação causada na superfície é obtida pela razão da variação da distância interplanar com e sem deformação, convertida em tensão, segundo equações derivadas da teoria da elasticidade (LIMA, 1991). Ou seja, a variação no retículo cristalino, induzida pela presença de tensões é medida com base na lei de Bragg (Eq. 3.5) e as tensões são calculadas assumindo-se que a distorção ocorre no regime linear elástico. Esta técnica é considerada não destrutiva, devido à forte absorção dos raios-X pela matéria, é limitada às camadas superficiais onde estes percorrem distâncias da ordem de 10 μm a 20 μm (MARTINS *et al.*, 2004).

Quando um feixe de raios-X é dirigido para superfície de um corpo, uma parte desses raios é absorvida pelos átomos enquanto outra parte é enviada de volta em todas as direções da área irradiada, como ilustra a Figura 3.9. Esse método mede basicamente a intensidade máxima de raios difratados para um determinado ângulo de varredura. A partir desse ângulo é possível obter o espaçamento interplanar dos planos de difração (SOUZA, 2012).

$$n\lambda = 2d.\text{sen}(\theta) \quad (3.5)$$

Onde:

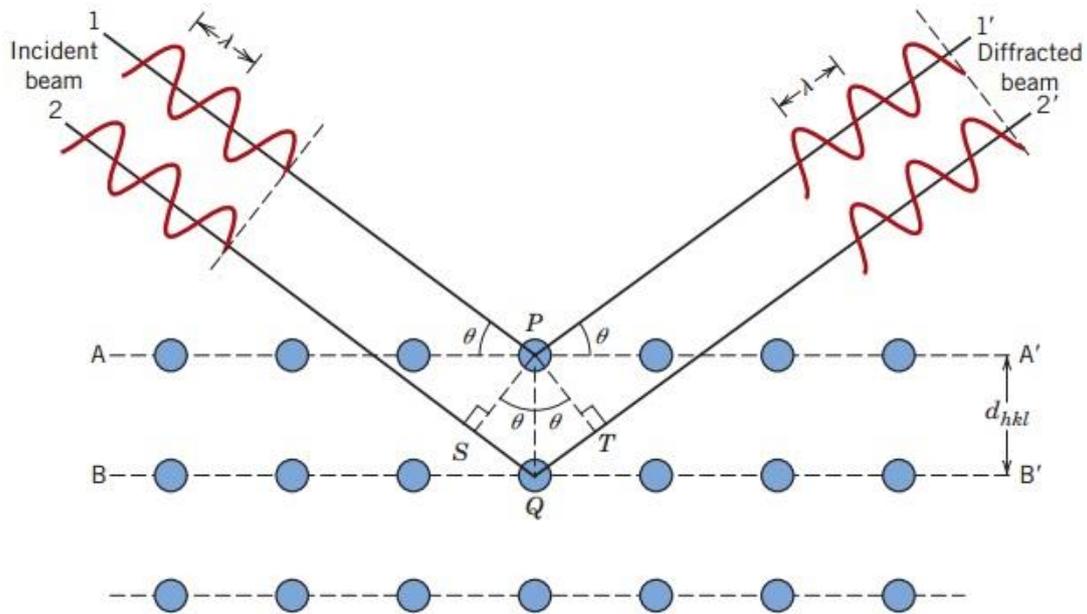
$n \rightarrow 1,2,3..$ (denota a ordem da difração) residual longitudinal;

$\lambda \rightarrow$ Comprimento de onda dos raios-X;

$d \rightarrow$ Distância interplanar do cristal;

$\theta \rightarrow$ Ângulo de Incidência.

Figura 3.9 – Difração de Raios-X pelos átomos (A-A' e B-B').

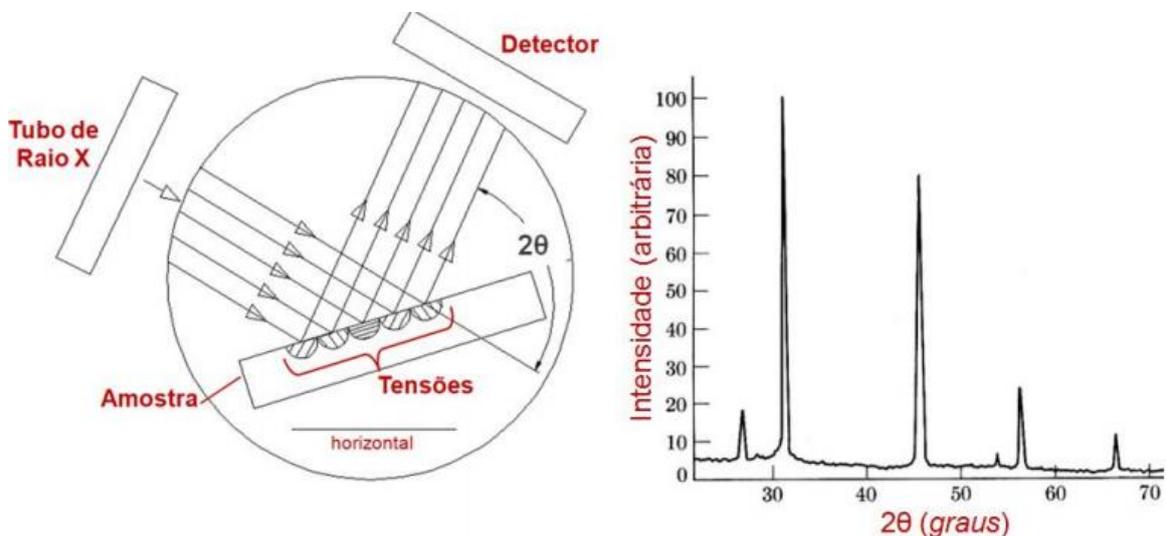


Fonte: Callister (2002).

Portanto, qualquer mudança na distância interplanar implica na mudança do ângulo de difração indicando se a superfície está sobre tração ou compressão.

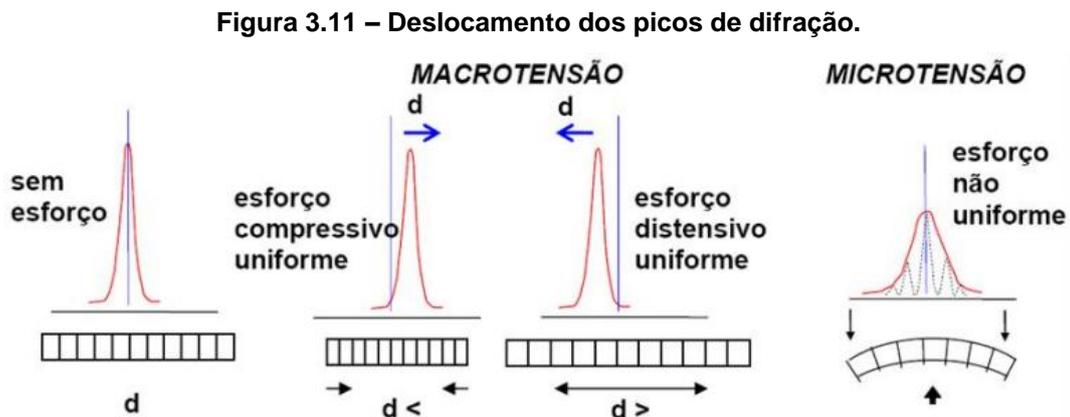
Quando a varredura é feita da superfície de um material utilizando esse método, é obtido um espectro que mostra os picos de difração, os quais são característicos para cada material (Figura 3.10).

Figura 3.10 – Varredura da superfície da amostra.



Fonte: Souza (2012).

A Figura 3.11 exemplifica a comparação entre os picos de um mesmo material, sendo um sem deformação e o outro com deformação plástica. Para ângulos maiores, a distância interplanar é menor quando comparado com o material sem deformação plástica, logo a tensão residual será de compressão. No entanto, se os ângulos forem menores a distância interplanar será maior, logo a tensão residual será de tração.

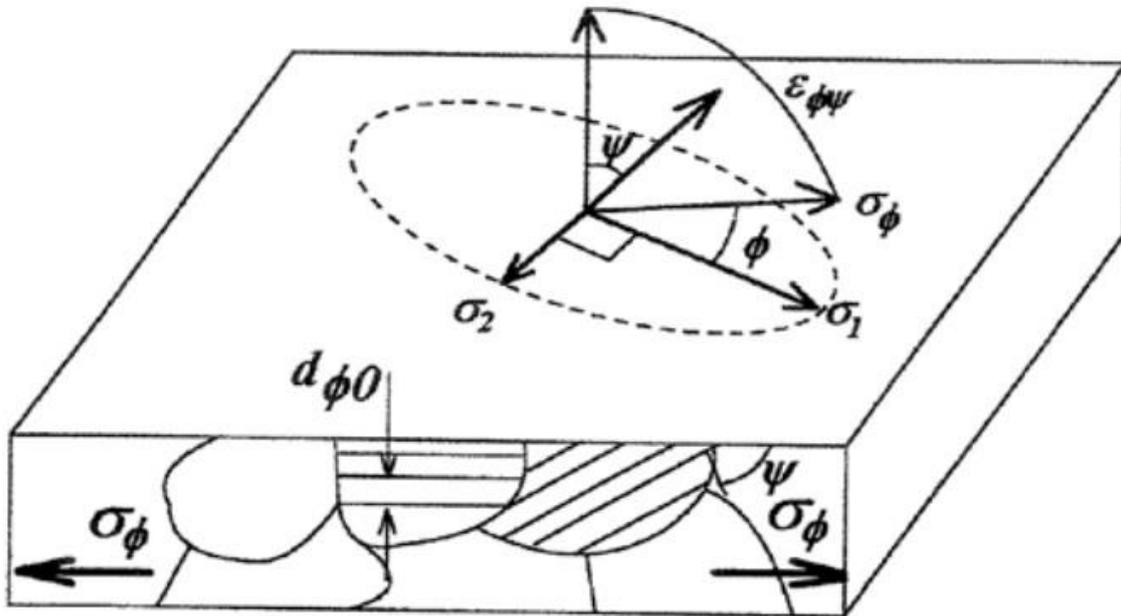


Fonte: Souza (2012).

Então, com o ângulo de difração pode-se estimar o valor da deformação do cristal e, em consequência, o valor da tensão residual existente naquela região da amostra.

As tensões residuais são calculadas a partir de equações de deformação correlacionadas com a tensão e deformação no regime elástico. A Figura 3.12 apresenta o modelo de tensões no estado plano. Sendo assim, admite-se duas tensões principais (σ_1 e σ_2), e apesar de não ter tensão normal na superfície é admitido uma deformação no sentido normal ($\epsilon_{\phi\psi}$), pois é considerado o coeficiente de Poisson.

Figura 3.12 – Modelo de tensões no estado plano.



Fonte: Prevéy (1986).

Souza (2012) fornece um detalhamento do modelo da seguinte maneira:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2) \right] - \left[\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (3.6)$$

$$\alpha_1 = \cos \phi \cdot \text{sen } \psi \quad \text{e} \quad \alpha_2 = \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \psi \quad (3.7)$$

Substituindo a Eq. 3.5 na Eq. 3.4, teremos:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \text{sen}^2 \phi) \text{sen}^2 \psi \right] - \left[\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (3.8)$$

Quando $\psi = 90^\circ$, o vetor deformação apresenta-se sobre a superfície da amostra e a tensão na superfície (σ_ϕ) é obtida por:

$$\sigma_\phi = \sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \text{sen}^2 \phi \quad (3.9)$$

Substituindo a Eq. 3.6 na Eq. 3.7 (PREVÉY,1986):

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} \text{sen}^2\psi \right] - \left[\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (3.10)$$

Se ($d_{\phi\psi}$) é a distância interplanar conforme ilustrado na Figura 3.12, então (d_o) é distância interplanar do corpo de prova padrão (ANDEROGLU, 2004).

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} + d_o}{d_o} \quad (3.11)$$

Resultando em:

$$\frac{d_{\phi\psi} + d_o}{d_o} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} \text{sen}^2\psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.12)$$

Por não haver carregamento sobre o corpo, a tensão residual pode ser expressa pela Eq. 3.13.

$$\frac{d_{\phi\psi} + d_o}{d_o} = \frac{\nu}{E} \sigma_{\phi} \quad (3.13)$$

De acordo com a Eq. 3.13 o aumento da distância interplanar em relação a uma amostra sem tensão residual corresponde a um valor positivo, e conseqüentemente a uma força trativa. No caso da diminuição da distância interplanar em relação a uma amostra sem tensão residual, o valor correspondente é negativo, logo a força é compressiva (CALLISTER, 2002).

3.3.2 Método DPC

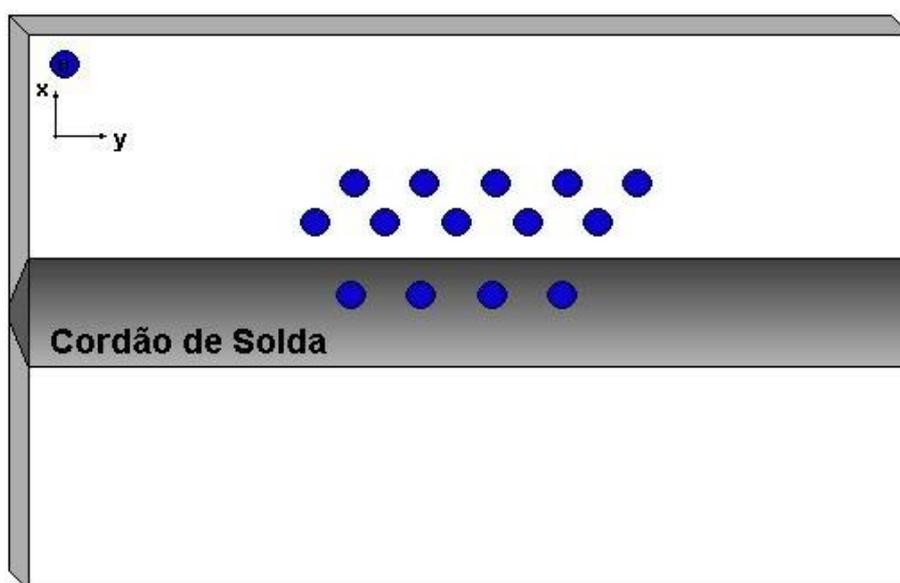
A tecnologia de medição pelo método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC) desenvolvido pelo grupo de Desenvolvimento de Novos Materiais Metálicos da UFPE tem como grande vantagem, em relação às demais metodologias, sua sensibilidade aos efeitos de anisotropia da chapa do painel e sua capacidade na medição de tensões residuais a baixo custo.

Esta metodologia alternativa foi usada em substituição ao método do furo cego que parte do princípio do deslocamento de pontos depois de realizado um furo passante numa chapa (fina) para aliviar as tensões. Através de um extensômetro deslocamentos os deslocamentos são medidos para o posterior cálculo das tensões. Devido às restrições apresentadas pelo método de furo cego, e tratando-se de chapas espessas e soldadas em múltiplos passes pode-se utilizar o método de medição por coordenadas, que é bem mais operacional e econômico. Pois se trata de um método no qual as tensões no estado plano são medidas através de deslocamento de pontos pela deformação (SIQUEIRA FILHO *et al.*, 2013).

Tal método consiste na marcação superficial sobre o cordão e sobre a zona termicamente afetada (ZTA), paralelamente ao cordão como é exemplificado na Figura 3.13. As marcas depois de produzidas são referenciadas em uma máquina de medição por coordenadas e em seguida é feito tratamentos térmicos para alívio de tensão em temperaturas próximas à recristalização. Depois do tratamento térmico as chapas são novamente referenciadas na mesa de coordenadas (SIQUEIRA FILHO *et al.*, 2013).

Conhecendo-se a distância dos deslocamentos das marcas, as tensões residuais podem ser mensuradas através das Eq. 3.3 e da Eq. 3.4.

Figura 3.13 – Marcação superficial na chapa.



3.4 TRATAMENTO TÉRMICO NO ALÍVIO DE TENSÕES (TTAT)

Vários tratamentos térmicos ou mecânicos são sempre aplicados para reduzir as tensões residuais ou distorções sendo necessários para manter ou restaurar as propriedades do metal de base afetado. O alívio de tensões depende fundamentalmente da temperatura e do tempo de permanência e como principais objetivos tem-se o aumento da ductilidade, diminuição da dureza tanto da zona fundida quanto da zona termicamente afetada, redução de distorções, aumento da resistência à fadiga e aumento da resistência à corrosão sob tensão.

De acordo com Modenesi (2001) e Fortes (2004), a presença de tensões residuais afeta significativamente os fenômenos que ocorrem com baixos níveis de tensão (inferiores ao limite de escoamento do material), como a fratura frágil, a fragilização por hidrogênio e a corrosão sobtensão. O alívio de tensões residuais pós-soldagem pode ser realizado por métodos mecânicos e térmicos.

Os métodos mecânicos consistem no martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após a soldagem, o encruamento, que é a deformação plástica da junta soldada pela aplicação de cargas de tração, e a vibração, que se trata da aplicação de vibrações na estrutura causando uma ressonância de baixa frequência ocasionando deformação plástica parcial da estrutura, são exemplos de mecanismos de alívio de tensões pós-soldagem por método mecânico. (MODENESI, 2001).

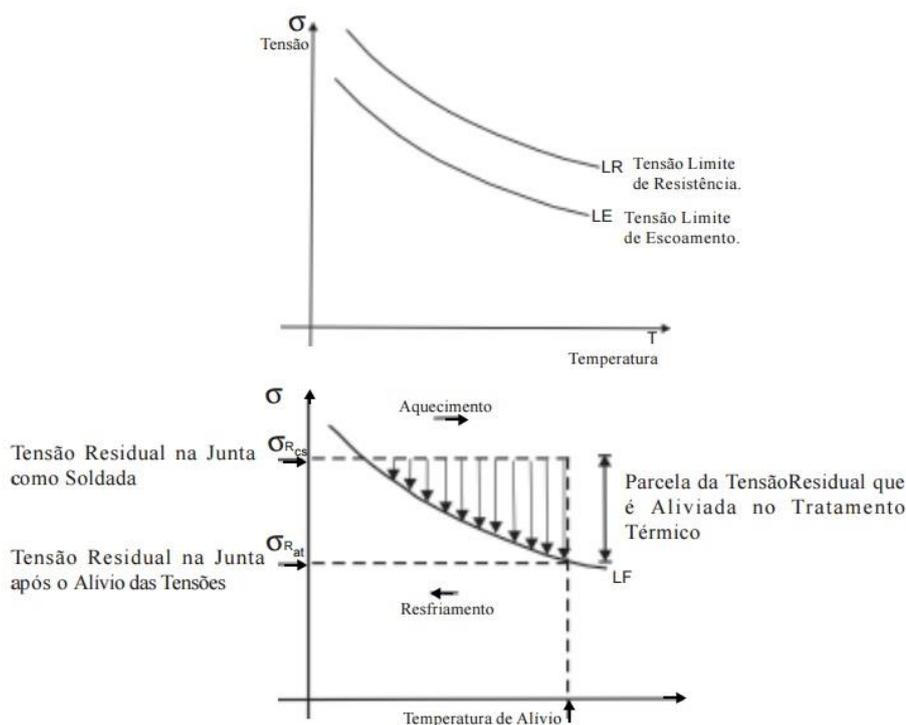
Os métodos mecânicos usados para alívio de tensões podem ser eficazes, porém, conforme Modenesi (2001), o método mais utilizado atualmente para aliviar as TRs causadas, é o recozimento, também conhecido como tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), neste as peças, ou parte delas, são aquecidas a temperaturas elevadas, porém inferiores à temperatura crítica de transformação do material por um período de tempo sendo resfriadas a taxas não superiores a 150°C/h contemplando as principais etapas operacionais do alívio de tensões (KWOFIE, 2009).

De acordo com Zeemann (2003) apud Morais JR (2008), o alívio de tensões residuais por tratamento térmico ocorre da seguinte maneira: a tensão

limite de escoamento (LE), assim como a tensão limite de resistência (LR), diminui com a temperatura, conforme a Figura 3.14(a), significando que o material pode ser deformado em menores níveis de tensão.

Quando um material cuja tensão residual se aproxima ao limite de escoamento, é aquecido, esta tensão ultrapassa o limite de escoamento gerando uma deformação e por consequência o alívio da tensão, como pode ser observado na Figura 3.14(b). Como o aquecimento durante o TTAT é generalizado e não localizado, e as taxas de aquecimento e resfriamento são controladas, não existindo a geração de tensões residuais no resfriamento, garantindo menor nível de tensões ao final do TTAT.

Figura 3.14 – (a) Representação da variação do LR e LE em função da temperatura. (b) Alívio de tensões quando se aquece o material.



Fonte: Zeemann (2003).

O tempo e a temperatura são variáveis importantes do TTAT, e dependem principalmente do material e espessura da junta (ZEEMANN, 2003). Em aços é normalmente realizado à temperatura entre 550°C - 675°C por uma hora para cada 25 milímetros de espessura, seguido por um resfriamento lento e uniforme até a temperatura ambiente (FORTES 2004 apud MORAIS JR, 2008).

3.5 MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Por meio de métodos convencionais, é difícil obter uma medição confiável, dentro de bons padrões de tolerância, de uma superfície complexa, devido as suas limitações. Com isto, máquinas de medir por coordenadas surgiram como uma solução para esse problema (LUCENA, 2009). A tecnologia de medição por coordenadas (TMC) é hoje uma ferramenta já consolidada nos processos de garantia da qualidade dimensional de produtos em indústrias dos mais diversos setores produtivos.

A aplicação racional da tecnologia de medição por coordenadas tornou-se viável com o sucesso desta tecnologia por possuir a alta flexibilidade sendo aplicada com sucesso em processos caracterizados por pequenos lotes, alta produtividade quando inseridas em ciclos de produção com elevado grau de automatização, alta informatização devido à facilidade de integração com sistemas de garantia da qualidade, alta precisão e alta confiabilidade comparados a qualquer outro processo de controle dimensional.

3.5.1 Diferença Entre a Tecnologia de Medição Por Coordenadas e os Métodos Convencionais

As máquinas de medição por coordenadas vêm substituindo os métodos convencionais de medição por suas vantagens estratégicas, como a redução do tempo necessário das medições e menor exigência de conhecimento dos diferentes métodos por parte do usuário, permitindo o controle dos mais diversos tipos de geometrias em um único equipamento (BOSCH, 1995 apud LUCENA, 2000, p. 25).

De acordo com Sousa (2000) os métodos convencionais de inspeção metrológica apresentam vantagens e desvantagens. As desvantagens são:

- Grande dificuldade de integração com ambientes automatizados;

- Os instrumentos possuem pouca ou nenhuma flexibilidade;
- Maior tempo, custo e menor confiabilidade na medição de peças com formas complexas.

As principais vantagens dos métodos convencionais são:

- Menor qualificação exigida do operador;
- Menor custo de investimento.

De acordo com Werner (1998) as vantagens que podem ser relacionadas à Máquina de Medição por Coordenadas são:

- Fácil adaptação às mais diferentes tarefas de medição;
- Medições obtidas por meio de modelos matemáticos;
- Maior confiabilidade em tarefas com alto grau de complexidade;
- Menor tempo e custo para a medição de peças com formas complexas;
- Maior facilidade na integração de ambientes automatizados.

Podem-se citar em relação aos métodos de medição por coordenadas as seguintes desvantagens:

- Maior qualificação do operador, inclusive com a necessidade de uma atualização constante do seu conhecimento;
- Maior custo de investimento.

O Quadro 3.3 explica, de forma comparativa os métodos de medição convencionais e o método de medição por coordenadas indicando suas vantagens e desvantagens:

Quadro 3.3 – Diferenças entre os métodos de medição.

Medição Convencional	Medição por Coordenadas
Alinhamento manual e lento da peça	Não é necessário o alinhamento manual da peça
Instrumentação dedicada e pouco flexível	Flexibilidade e adaptação simples às tarefas de medição
Determinação separada de dimensões, desvios de forma e posição, utilizando diferentes instrumentos de medição	Determinação conjunta de dimensão, forma e posição, na maior parte das vezes, em uma única medição
Menor confiabilidade em tarefas complexas	Maior confiabilidade em tarefas complexas
Dificuldade de integração em ambientes automatizados	Possibilidade de integração em ambientes com automação flexível
Maior tempo de inspeção para grande quantidade de peças complexas	Menor tempo de inspeção para grande quantidade de peças (possibilidade de programação CNC)
Maior custo de inspeção de peças com Geometrias complexas	Menor custo de inspeção de peças com Geometrias complexas
Menor custo de investimento	Maior custo de investimento
Menor qualificação do operador	Maior qualificação do operador

Fonte: Souza (2000).

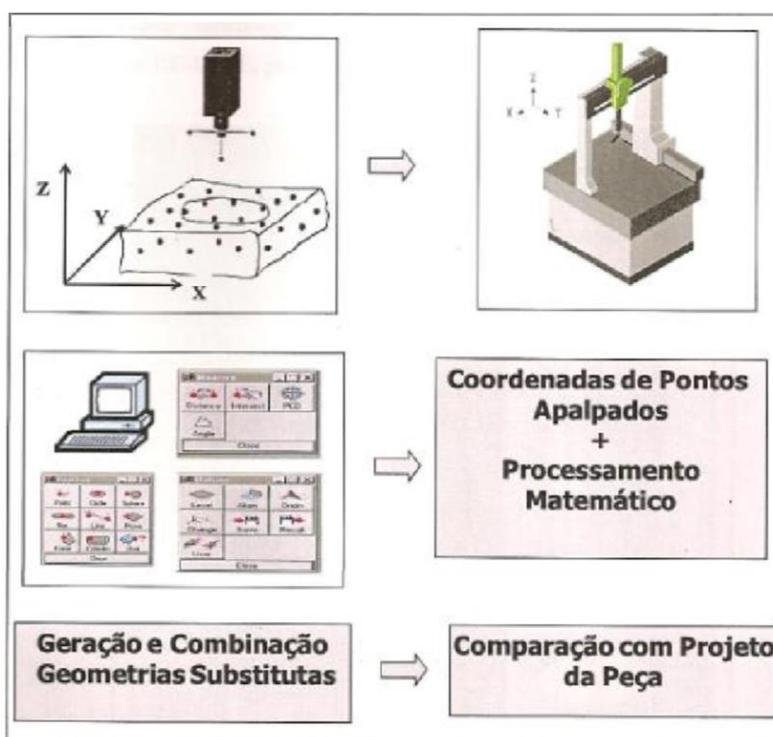
De acordo com Lucena (2000) devido aos comparativos e observando que a tecnologia de medição por coordenadas possibilita uma ampla interação com o ambiente de produção dando extrema facilidade de integração ao ambiente industrial e a agilidade de medição, as máquinas de medir por coordenadas apresentam vantagem em relação aos sistemas convencionais que atualmente já não conseguem acompanhar a evolução tecnológica da manufatura.

3.5.2 Princípio da Medição por Coordenadas

Uma máquina de medição de coordenadas é um dispositivo para medir as características físicas geométricas de um objeto que toma como base para a medição o sistema cartesiano, utilizando a representação de cada ponto num sistema ortogonal de coordenadas (x_i, y_i, z_i) . A partir desta informação de posição, registrada diretamente do componente, é possível avaliar as características dimensionais do projeto através de procedimentos matemáticos.

Na medição por coordenadas com contato, a informação sobre a geometria da peça é obtida a partir do contato com a superfície em pontos de medição discretos e as coordenadas desses pontos são expressas num sistema de referência predeterminado como exemplificado na Figura 3.15. Entretanto, não é possível avaliar os desvios geométricos da peça diretamente pelas coordenadas dos pontos medidos, sendo utilizado o método dos mínimos quadrados para ajustar os pontos coordenados para obtenção das geometrias substitutas tais como cilindros, planos, etc. (ROLIM, 2003).

Figura 3.15 – Princípio de Medição por coordenadas.



Fonte: Rolim (2003) apud Siqueira Filho *et al.* (2013).

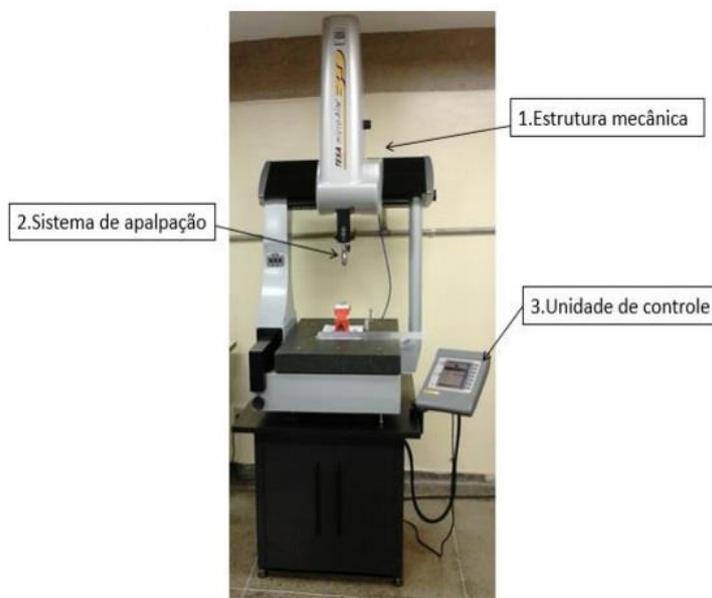
3.5.3 Composição básica de máquinas de medir por coordenadas

Uma MMC é formada basicamente por equipamentos mecânicos (mesa de coordenadas, estrutura de sustentação, mancais, eixos guia e acionamentos), equipamentos eletrônicos (controladores, cabeçote apalpador, servomotores e circuito de controle), e equipamentos ópticos (escalas de medição optoeletrônicas), com o funcionamento gerenciado por um computador e de funcionamento computacional para medição (ROLIM, 2003).

A Figura 3.16 exemplifica o posicionamento de cada um desses componentes em uma máquina de medir por coordenada disponível comercialmente com destaque para os principais componentes da mesma, sendo eles:

- Estrutura mecânica da MMC propriamente dita;
- Sistema de apalpação, ou seja, elemento que entra em contato com a superfície da peça;
- Unidade de controle, que irá fornecer as informações metrológicas e as coordenadas do objeto inspecionado.

Figura 3.16 – Composição MMC.



4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa: as propriedades dos materiais de base e de adição, os equipamentos utilizados na soldagem, a metodologia empregada para a preparação dos experimentos, os procedimentos de soldagem, o tratamento térmico de alívio de tensões e a técnica DPC, a fim de determinar as tensões residuais introduzidas nos corpos de prova.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Metal de Base

O metal utilizado para o trabalho experimental foram chapas de aço naval de classificação ASTM AH-36, fornecidas pelo Estaleiro Atlântico Sul, localizado no Porto de Suape - Cabo de Santo Agostinho - PE, com dimensões de 200,00 mm x 65,00 mm x 14,00 mm, bipartidas, ângulos do bisel de 25°. Neste processo, o sentido da laminação coincide com o sentido do chanfro para o processo de soldagem GMAW. Conforme a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Chapa de aço ASTM AH-36.



Fonte: O Autor.

As especificações ASTM para a composição química e as propriedades mecânicas do metal de base são representadas nos Quadros 4.1 e 4.2, respectivamente.

Quadro 4.1 – Composição Química do aço ASTM AH-36.

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Sn	Cu	V	Al	Nb
ASTM A 131 Grau AH36	0.130	1.418	0.023	0.007	0.346	0.012	0.026	0.002	0.015	0.056	0.028	0.020

Fonte: Total Matéria.

Quadro 4.2 – Propriedades Mecânicas do aço ASTM AH-36.

	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
ASTM A 131 Grau AH36	315 mín	490-620	22 mín

Fonte: Total Matéria.

4.1.2 Consumíveis da Soldagem

4.1.2.1 Metal de Adição

O metal de adição consumido na soldagem pelo processo GMAW foi o arame de classificação ER70S-6 (OK AUTROD 12.51), conforme a Norma AWS / ASME SFA – 5.18, com diâmetro de 1,2 mm.

A composição química e as propriedades mecânicas do metal de adição estão representadas nos Quadros 4.3 e 4.4, respectivamente.

Quadro 4.3 – Composição Química do metal de adição, %massa.

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.06 - 0.15	0.8 - 1.15	1.40 - 1.85	0.025	0.035	0.500

Fonte: AWS/ASME SFA - 5.18.

Quadro 4.4 – Propriedades Mecânicas mínimas do metal de adição.

Limite de Escoamento – LE (Mpa)	Limite de Resistência – LR (Mpa)	Alongamento (%)	Charpy V - 29°C (J)
400	480	22	27

Fonte: AWS /ASME SFA - 5.18.

4.1.2.2 Gás de Proteção

O processo de soldagem escolhido para este trabalho foi o GMAW utilizando-se como gás de proteção a mistura de 25% CO₂ + 75% argônio (Ar), ou seja, um processo MAG.

4.2 METODOS

4.2.1 Equipamentos e acessórios

A descrição dos equipamentos e acessórios empregados têm como objetivo informar as características de cada dispositivo e suas aplicações no processo de soldagem GMAW.

4.2.1.1 Fonte de Soldagem

Foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica multiprocesso (modelo Smashweld 318 TopFlex). Tal fonte pode ser operada nos processos MIG/MAG e com arames tubulares. As informações técnicas da fonte utilizada estão listadas a seguir:

- Tensão em vazio: 18 V – 45 V;

- Faixa de Corrente / Tensão: 50 A / 17 V;
400 A / 34 V;
- Cargas autorizadas: 220 A / 25 V @ 100%;
270 A / 27 V @ 60%;
315 A / 29,8 V @ 35%;
- Potência aparente: 7,3 kVA;
- Tensão de alimentação 3 ϕ , 220 / 380 / 440 V;

4.2.1.2 Sistema de Deslocamento

O sistema de deslocamento da tocha foi realizado de maneira automatizada, utilizando uma máquina de Corte a Gás CG1-30, conforme a Figura 4.3. Nesta condição foram definidos os parâmetros do processo, como:

- Velocidade de soldagem: 4,7mm/s para as chapas 1, 4, 5, 6, e 7;
6,7 mm/s para as chapas 2 e 3;
- Tensão: 18,2 – 19,2 V;
- Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min;
- Vazão de Gás: 18 l/min.

Figura 4.2 – Máquina Semiautomática de Corte a Gás CG1-30.



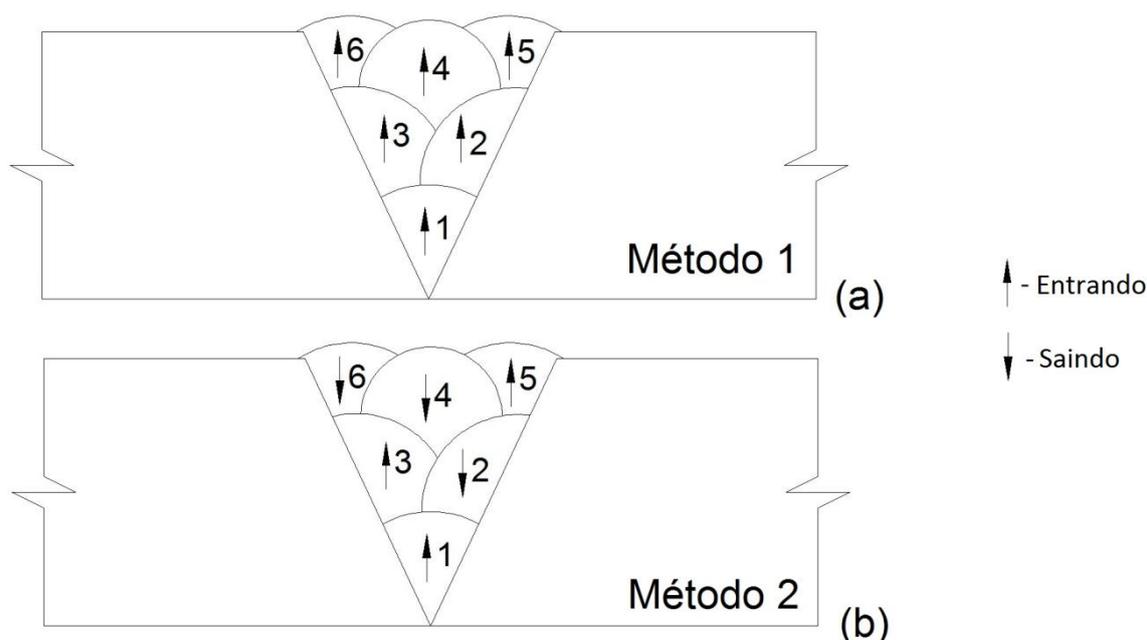
Fonte: O Autor

4.2.2 Procedimentos de Soldagem

O processo de soldagem GMAW foi executado pelo Laboratório de Termometria e Simulações Termomecânicas localizado no departamento de Engenharia Mecânica da UFPE – LTSTM – PE, em juntas de topo com chanfro em V e ângulo do bisel 25°, sendo composta por seis passes.

Duas metodologias de soldagem foram utilizadas, tendo como primeiro método o deslocamento em um único sentido, no qual foi executado nas chapas 1, 2, 3, 4 e 5. Para o segundo método, os deslocamentos ocorreram nos dois sentidos, executada nas chapas 6 e 7. Conforme a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Corpo de Prova Soldado.(a) Método 1.(b) Método 2.



Fonte: O Autor.

As juntas soldadas (JS) foram ponteadas e restringidas conforme a Figura 4.4, pois a expansão térmica da região, perto da zona de solda pode provocar a flexão das chapas soldadas (MONIN *et al*, 2009).

As superfícies a serem soldadas foram limpas e escovadas entre passes a fim de remover o filme vítreo, no qual foi tratado como escória.

Figura 4.4 – Procedimento de Soldagem.



Fonte: O Autor.

4.2.2.1 Cálculo da Energia de soldagem

A energia de soldagem do processo GMAW utilizado para as chapas, foi calculada a partir dos parâmetros descritos no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Parâmetros de Soldagem.

Parâmetros:	Chapa 1	Chapa 2	Chapa 3	Chapa 4	Chapa 5	Chapa 6	Chapa 7
Tensão (V)	18,8	18,8	18,9	17,3	19,2	18,8	19
Corrente (A)	180	209	219	240	166	191	189
Velocidade (mm/s)	4,7	6,7	6,7	4,7	4,7	4,7	4,7
Aporte Térmico (J/mm)	554,4	451,6	475,8	682,5	522,2	587,3	589,3

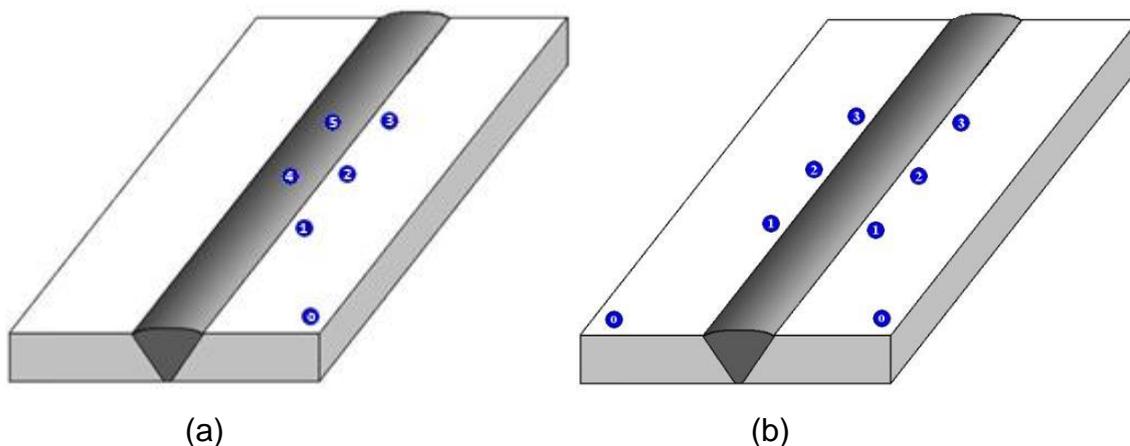
Fonte: O Autor.

4.2.3 Procedimento de Marcação para a Medição por Coordenadas

Pelo primeiro método, após o procedimento de soldagem, foram feitos cinco pequenos furos com broca de centro de 2,5 mm de diâmetro e profundidade de aproximadamente 2 mm em uma furadeira de coluna, como ilustra a Figura 4.5 (a).

Enquanto, no segundo método foram realizados seis pequenos furos feitos antes da soldagem, com uma broca de centro de 2,5 mm de diâmetro e profundidade de aproximadamente 2 mm e previamente mapeados, como ilustra a Figura 4.5 (b).

Figura 4.5 – Marcação dos Pontos Coordenados. (a) Marcação para o método 1. (b) Marcação para o método 2.



Fonte: O Autor.

Depois do procedimento de furação as coordenadas (X , Y) do centro de cada furo, foram mapeados por uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) com controle numérico computadorizado, modelo CRYSTA 574 (curso de medição de 700 mm e resolução de 0,0005 mm), fabricação MITUTOYO, ano 2004, com certificado de calibração 01778/11, do Laboratório de Medição por Coordenadas da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, conforme ilustra a Figura 4.6

Figura 4.6 – Máquina de Medição por Coordenadas, modelo CRYSTA 574.



Fonte: O Autor.

4.2.4 Procedimento de Tratamento Térmico

Após a estabilização da temperatura interna do forno Mufla JUNG, a amostra é levada ao mesmo como mostrado na Figura 4.7, os corpos de prova foram submetidos a um tratamento térmico de alívio de tensões em diversas temperaturas e tempo de tratamento, e resfriados ao ar.

Para a análise da influência da temperatura no tratamento térmico de alívio de tensões para solda unidirecional, foram utilizadas quatro chapas e definidas três temperaturas de tratamento de alívio de tensão com variação de cinquenta graus Celsius e dois tempos distintos (chapa 1, 2, 3, 4 e 5), como mostra o Quadro 4.6 totalizando desta forma quatro modos de resfriamento.

O tratamento térmico utilizado para a chapa cinco, na qual foi realizada a comparação com o método DR-X foi o de 680°C com tempo de permanência de 30 minutos. Enquanto que para soldagem bidirecional, nas chapas seis e sete, foram utilizados os tratamentos de 580°C e 680°C, respectivamente.

Figura 4.7 – Forno Mufla JUNG Micro Processado – LF2312.



Fonte: O Autor.

Quadro 4.6 – Temperaturas e tempos de tratamento.

	Chapa 1	Chapa 2	Chapa 3	Chapa 4	Chapa 5	Chapa 6	Chapa 7
Temperatura (°C)	580	630	680	680	680	580	680
Tempo (minutos)	30	30	30	60	30	30	30

Fonte: O Autor.

4.2.5 Caracterização Metalográfica

A caracterização macroestrutural e microestrutural foram feitas após a preparação metalográfica clássica. Para cada corpo de prova foram retiradas amostras (cortes transversais) para análises.

Os corpos de provas preparados para análise macrográfica foram retificados para garantir o paralelismo e com isso uma melhor qualidade de imagem e sofreram lixamento, polimento e ataque químico, como segue:

- Lixamento: Foi utilizado lixas de diferentes granulometrias na seguinte ordem: 220, 320, 400, 600 e 1000 *mesh*;
- Polimento: Após o lixamento as amostras foram polidas usando pasta diamantada de 1 μm ;
- Ataque químico: Com as amostras devidamente polidas, foi realizado o ataque químico com o reagente Nital 5% (5 ml de ácido nítrico para 100 ml de álcool etílico).

As análises macroscópicas foram realizadas com o auxílio do estereomicroscópio Zeiss Stemi 2000-C, com uma magnificação de 13 vezes e a análises microscópicas foram realizadas no microscópio invertido Zeiss Axio Obser-Z1 com magnificação de 100 vezes.

4.2.6 Ensaios pelo Método de Difração de Raios-X

Para comparação do método utilizado e validação do trabalho foi realizado à análise de tensão residual através do método de difração de raios-X com um difratômetro de raios-X (DR-X) portátil e os resultados foram posteriormente comparados com o do método DPC.

Antes da realização da medição das tensões residuais por difração de raios-X, foi necessário ao corpo de prova (Chapa 5) passar por um processo de decapagem eletrolítica, para remoção de uma camada delgada de material, da ordem de décimos de milímetros para eliminar possíveis tensões residuais superficiais induzidas por processos prévios de fabricação como ilustra a Figura 4.8, no qual consiste na utilização de um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro, o qual é preenchido com uma solução de ácido sulfúrico a 25%.

No processo eletrolítico foi usada uma corrente de aproximadamente 3,8 A e tensão de 2 V durante 10 minutos. Após decapagem foi feita uma limpeza com uma solução de Nital 5% com o objetivo de passivar a superfície previamente decapada.

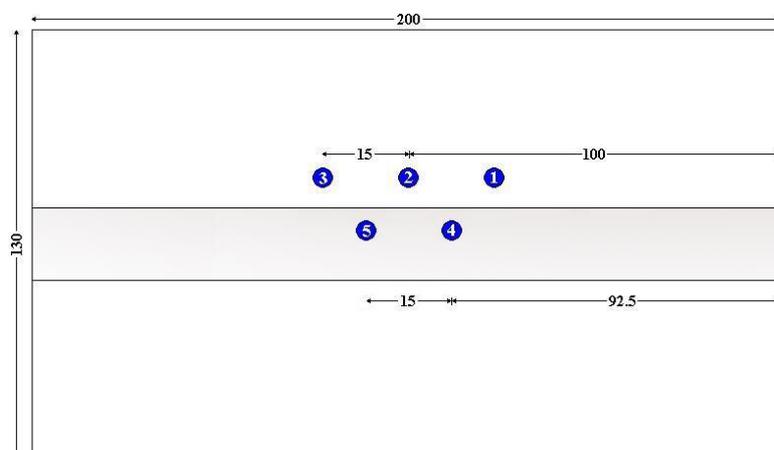
Figura 4.8 – Sistema da decapagem eletrolítica.



Fonte: O Autor.

Após o processo de decapagem, foram marcados, nos corpos de prova, cinco pontos (com grafite), sendo eles três na zona termicamente afetada (ZTA), com espaçamento de quinze milímetros entre eles e dois pontos na zona fundida (ZF), com mesmo espaçamento. A Figura 4.9 ilustra esquematicamente a distribuição dos pontos para a amostra ensaiada pelos dois métodos de medição.

Figura 4.9 – Esquema dos pontos estudados para a chapa ensaiada pelos dois métodos.



Fonte: O Autor.

O difratômetro utilizado para medir as tensões residuais foi o *Portable stress analyser* STRESSRAD, com o software de análise - *Stress Analyser Stressrad*, pertencente à Universidade Federal de Campina Grande UFCG – Campina Grande – PB.

Os princípios da técnica de dupla exposição utilizados nas medições de tensão utilizando equipamentos portáteis, são fundamentados na determinação de dois componentes de deformação segundo Monin *et al.*, 2009. O Conjunto tubo de raios-X/detector foi montado sobre a junta soldada a ser medida, conforme a Figura 4.10.

Figura 4.10 – Conjunto tubo de raios-X/detector (UFCG -PB).



Fonte: O Autor.

Foram medidas as tensões residuais no sentido transversal para os pontos previamente marcados. Para análise foi utilizado o software “*Stress Analyser Stressrad*” específico para difratômetro de raios-x no qual possibilitou a construção dos ajustes das curvas, difratogramas, localização dos picos e calcular as tensões residuais transversais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados e discussões dos experimentos dos ensaios realizados, sendo eles: a determinação das tensões pelo método DPC, difração de raios-X, análise macrográfica e micrográfica, ensaio DSC para levantamento das temperaturas a serem ensaiadas, determinação das tensões residuais e deslocamentos obtidos pelo método DPC e comparação das tensões residuais mensuradas com o método DPC com os obtidos com a difração de raios-X. Através de análises experimentais, estatísticas e conceituais, serão discutidos os resultados.

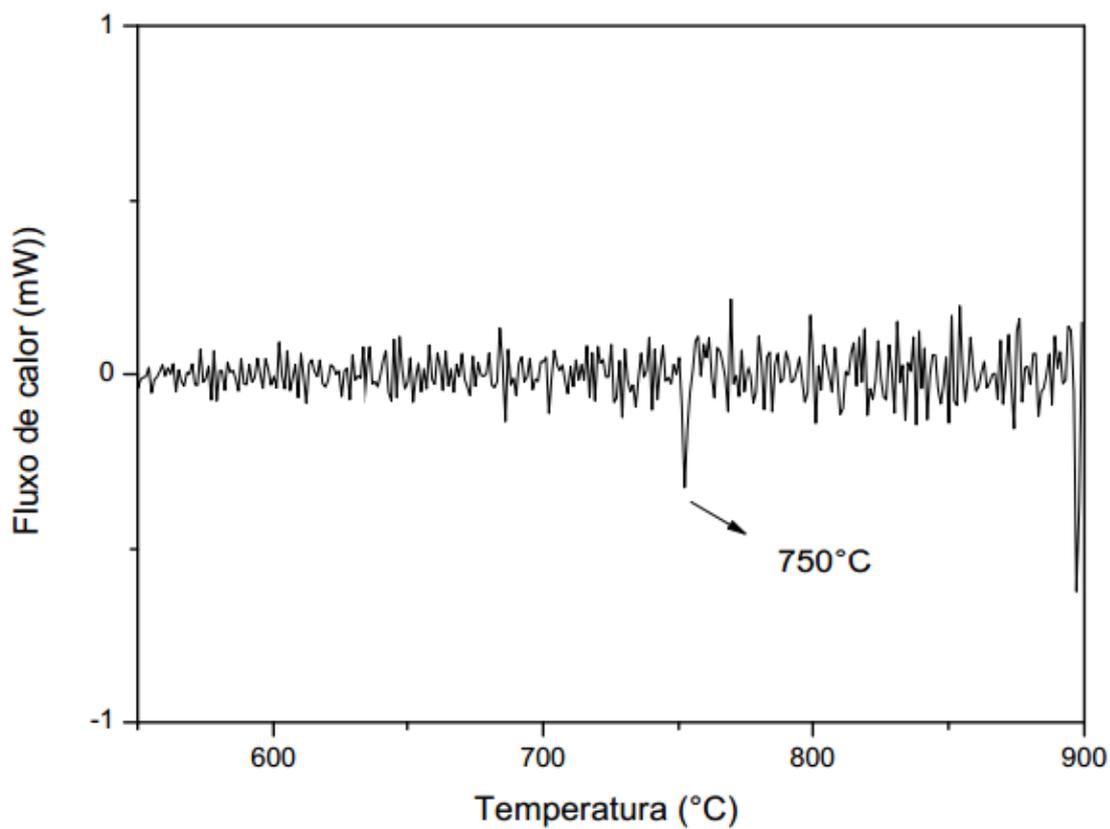
5.1 RESULTADOS

5.1.1 Determinação das Temperaturas de Tratamento Térmico de Alívios de Tensões

Para determinar as temperaturas de tratamento térmico foi realizado um estudo da recristalização em análise dinâmica, nesta o material é aquecido continuamente, sendo a liberação de energia determinada em função do tempo ou da temperatura, através de um equipamento de *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

Para a determinação da temperatura e dos tempos de transformação, foram realizadas análises térmicas dinâmicas do aço ASTM AH-36 em um equipamento tipo DSC, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, conforme a Figura 5.1.

Figura 5.1 – Gráfico Temperatura x Fluxo de Calor, obtido por DSC.



Fonte: O Autor.

Para garantir a não recristalização durante o tratamento térmico, foram consideradas temperaturas 10% inferiores a 750°C durante o TTAT, de acordo com Long (2008). Desta forma realizaram-se tratamentos a 680, 630 e 580 °C, com tempos de permanência a altas temperaturas de 30 e 60 minutos.

5.1.2 Determinação das tensões residuais longitudinais aliviadas no TTAT

5.1.2.1 Tensões residuais obtidas através de DR-X e pelo Método DPC

A validação dos resultados foi realizada medindo as tensões residuais com dois métodos distintos, DR-X e DPC. Os resultados das tensões do

processo de soldagem foram separados por localização: na zona termicamente afetada e na zona fundida.

Os resultados das medições das tensões transversais, em cada ponto do corpo de prova soldado, estão apresentados no Quadro 5.2 e representados na Figura 5.2, para as duas metodologias de medição. Os cinco pontos enumerados nos gráficos dos resultados das tensões residuais devem ser analisados individualmente, e não como comportamento (linha contínua), já que cada medição da tensão é pontual (SIQUEIRA FILHO *et al.*, 2013).

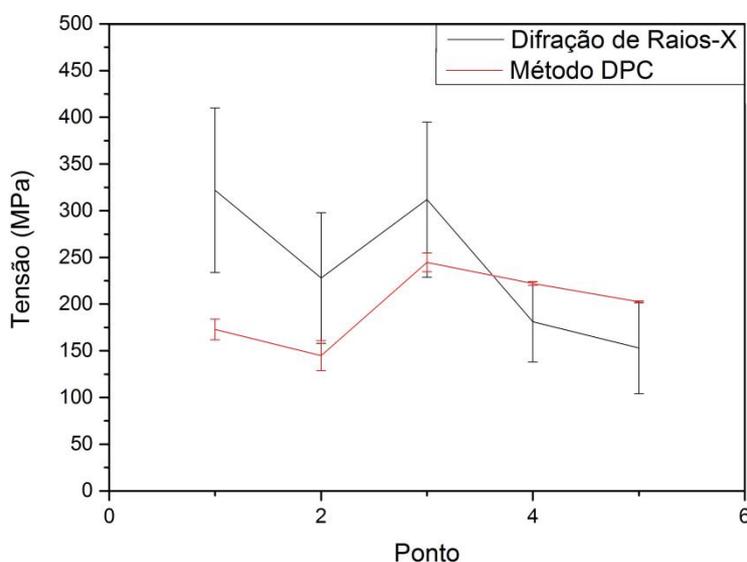
Quadro 5.1 – Tensões residuais transversais obtidas por DR-X e pelo método DPC.

Ponto:	Difração de Raios-X [MPa]	Método DPC [MPa]
1	322 ^{±88}	173 ^{±11}
2	228 ^{±70}	145 ^{±16}
3	312 ^{±83}	245 ^{±10}
4	181 ^{±43}	223 ^{±2}
5	153 ^{±49}	203 ^{±1}

Fonte: O Autor.

Na Figura 5.2 é observado que os valores medidos das tensões residuais transversais, em ambos os métodos, se encontram entre 145 MPa e 322 MPa indicando tensões positivas tanto pelo método de difração de raios-X quanto pelo método de medição por coordenadas. Observa-se também que as tensões resultantes nos pontos 2, 3, 4 e 5 pelo método DPC estão dentro do intervalo das medições por DR-X, divergindo apenas no ponto 1, mas o mesmo acompanha a tendência pontual.

Figura 5.2 – Gráfico comparativo das tensões residuais transversais obtidas por DR-X e pelo método DPC.



Fonte: O Autor.

5.1.2.2 Tensões residuais obtidas pelo método DPC com soldagem unidirecional.

Os resultados das TR longitudinais aliviadas no TTAT, obtidas através do método de deslocamento de pontos coordenados, para soldagem unidirecional em diferentes condições de TTAT, estão apresentados nos Quadros 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, e representados nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6. Tanto as tensões residuais como seus deslocamentos são apresentados no Apêndice A.

Quadro 5.2 – TR longitudinais obtidas pelo método DPC com CP tratado a 580°C e 30 minutos.

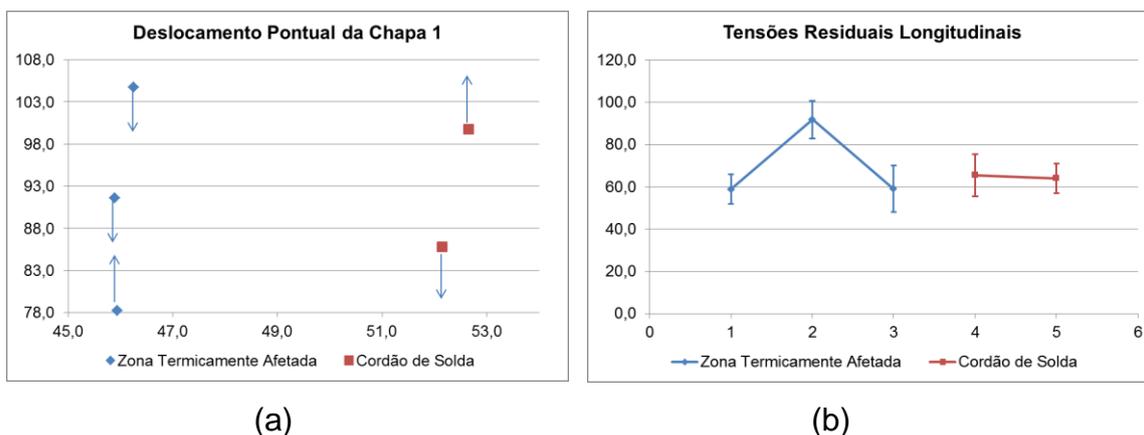
Ponto:	Método DPC [MPa]
1	59 ^{±7}
2	92 ^{±9}
3	59 ^{±11}
4	66 ^{±10}
5	64 ^{±7}

Fonte: O Autor.

A Figura 5.3 apresenta os valores das tensões residuais longitudinais aliviadas cujos módulos encontram-se entre 59 MPa e 92 MPa na ZTA e entre 64 MPa e 66 MPa no cordão de solda, indicando desta forma tensões trativas na solda e compressivas na ZTA.

No corpo de prova, há uma aproximação entre os pontos 1 e 3, quando comparado com as coordenadas iniciais, indicando uma região compressiva. Ao se avaliar os pontos 4 e 5, localizados no cordão de solda, observa-se o afastamento destes pontos coordenados, caracterizando uma região trativa (OKURAMA, 2002).

Figura 5.3 – Comportamento da Chapa 1 para o Tratamento Térmico de 580°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) Tensões Residuais longitudinais [MPa].



Fonte: O Autor.

Quadro 5.3 – TR longitudinais obtidas pelo método DPC com CP tratado a 630°C e 30 minutos.

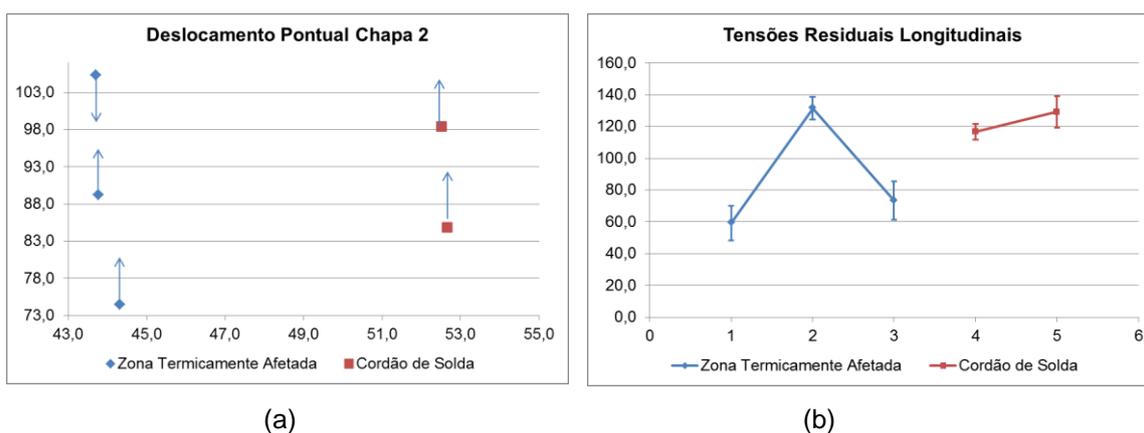
Ponto:	Método DPC [MPa]
1	59 ^{±11}
2	131 ^{±7}
3	73 ^{±12}
4	117 ^{±5}
5	129 ^{±10}

Fonte: O Autor.

As tensões residuais longitudinais aliviadas pelo TTAT, apresentadas em módulo na Figura 5.4, possuem valores variando entre 59 MPa e 131 MPa na ZTA e 117 MPa e 129 MPa no cordão de solda. Devido a aproximação dos

pontos 1 e 3 são observadas tensões compressivas na zona termicamente afetada, enquanto que nos pontos 4 e 5, localizados no cordão de solda, os deslocamentos possuem o mesmo sentido, entretanto ocorre um distanciamento dos pontos coordenados caracterizando uma região trativa.

Figura 5.4 – Comportamento da Chapa 2 para o Tratamento Térmico de 630°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) Tensões Residuais longitudinais [MPa].



Fonte: O Autor.

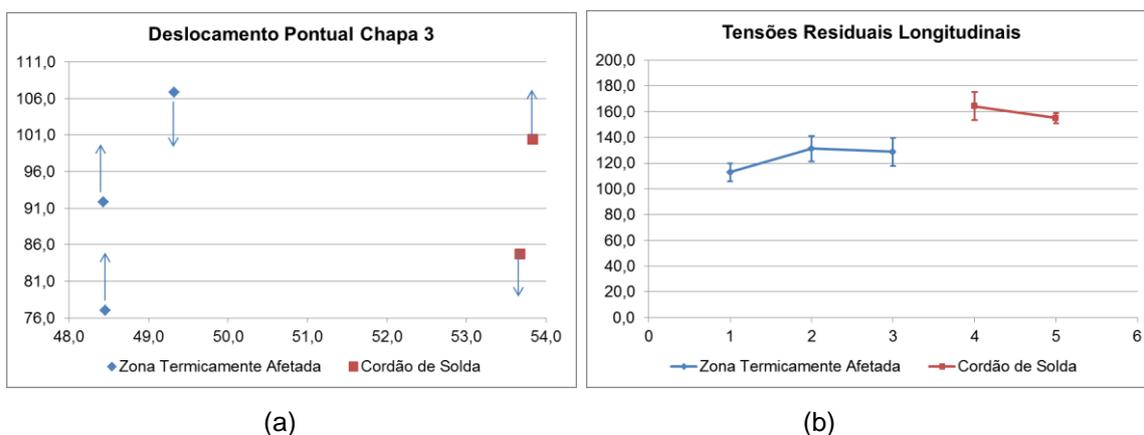
Quadro 5.4 – TR longitudinais obtidas pelo método DPC com CP tratado a 680°C e 30 minutos.

Ponto:	Método DPC [MPa]
1	113 ^{±7}
2	131 ^{±10}
3	129 ^{±11}
4	164 ^{±11}
5	155 ^{±4}

Fonte: O Autor.

As tensões residuais longitudinais aliviadas, apresentadas em módulo, na Figura 5.5 variam entre 113 MPa e 131 MPa na ZTA e de 155 MPa a 164 MPa no cordão de solda, indicando tensões trativas na solda, devido ao distanciamento dos pontos coordenados e compressivas na zona termicamente afetada, por conta da aproximação das referências.

Figura 5.5 – Comportamento da Chapa 3 para o Tratamento Térmico de 680°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) Tensões Residuais longitudinais [MPa].



Fonte: O Autor.

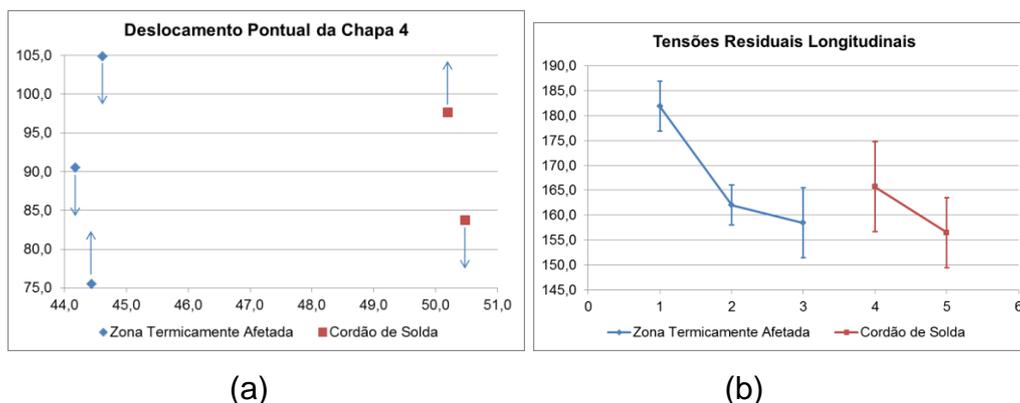
Quadro 5.5 – TR longitudinais obtidas pelo método DPC com CP tratado a 680°C e 60 minutos.

Ponto:	Método DPC [MPa]
1	182 ^{±5}
2	162 ^{±4}
3	158 ^{±7}
4	166 ^{±9}
5	156 ^{±7}

Fonte: O Autor.

Na Figura 5.6 os valores mensurados das tensões residuais longitudinais aliviadas pelo TTAT, encontram-se em módulo entre 158 MPa e 182 MPa na ZTA indicando tensões compressivas e entre 156 MPa e 166 MPa no cordão de solda caracterizando a região como tratativa.

Figura 5.6 – Comportamento da Chapa 4 para o Tratamento Térmico de 680°C a 60 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) Tensões Residuais longitudinais [MPa].



Fonte: O Autor.

5.1.2.3 Tensões residuais obtidas pelo método DPC com soldagem nas duas direções.

A fim de verificar se o sentido da soldagem afeta o deslocamento dos pontos coordenados, os resultados das tensões residuais longitudinais aliviadas pelo TTAT foram obtidos através do segundo método e são apresentados em duas condições de tratamento térmico. Para tal foram realizados seis passes de solda e seis furos localizados na zona termicamente afetada

Os resultados das medições das tensões longitudinais e transversais aliviadas em cada ponto do corpo de prova soldado estão apresentados nos Quadros 5.6 e 5.7, e representados nas Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente. Tais cálculos são apresentados no Apêndice B.

Quadro 5.6 – TR obtidas pelo método DPC para o CP tratado a 580°C e 30 minutos.

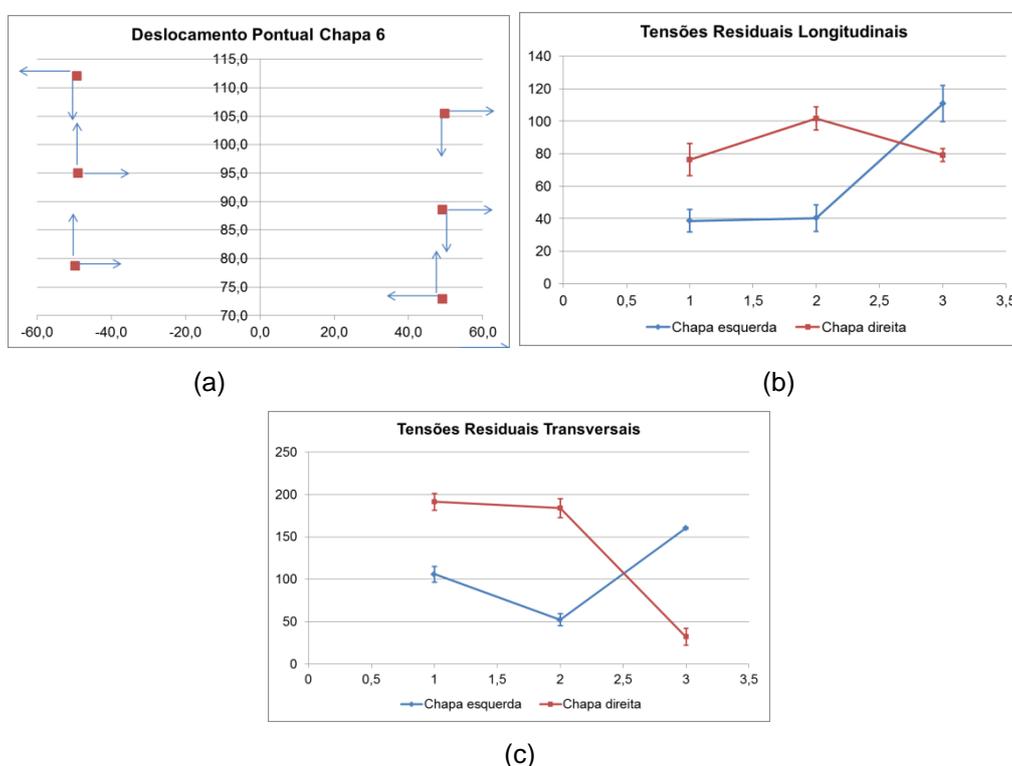
Ponto:	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
1a	106 ^{±9}	39 ^{±7}
2a	52 ^{±7}	40 ^{±8}
3a	160 ^{±1}	111 ^{±11}
1b	191 ^{±10}	76 ^{±10}
2b	184 ^{±11}	102 ^{±7}
3b	32 ^{±10}	79 ^{±4}

Fonte: O Autor.

Na Figura 5.7 as tensões residuais longitudinais aliviadas pelo TTAT nas ZTAs, possuem módulo variando entre 39 MPa e 111 MPa, indicando tensões compressivas. Os pontos 1a e 1b possuem um comportamento ascendente enquanto os pontos 3a e 3b descendem gerando uma aproximação a qual caracteriza as regiões como compressivas.

Foi observado também que os deslocamentos dos pontos centrais se deslocam no sentido contrário ao sentido do cordão de solda mais próximo.

Figura 5.7 – Comportamento da Chapa 6 para Tratamento Térmico de 580°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) TR longitudinais [MPa]. (c) TR transversais [MPa].



Fonte: O Autor.

Quadro 5.7 – TR obtidas pelo método DPC para o CP tratado a 680°C e 30 minutos.

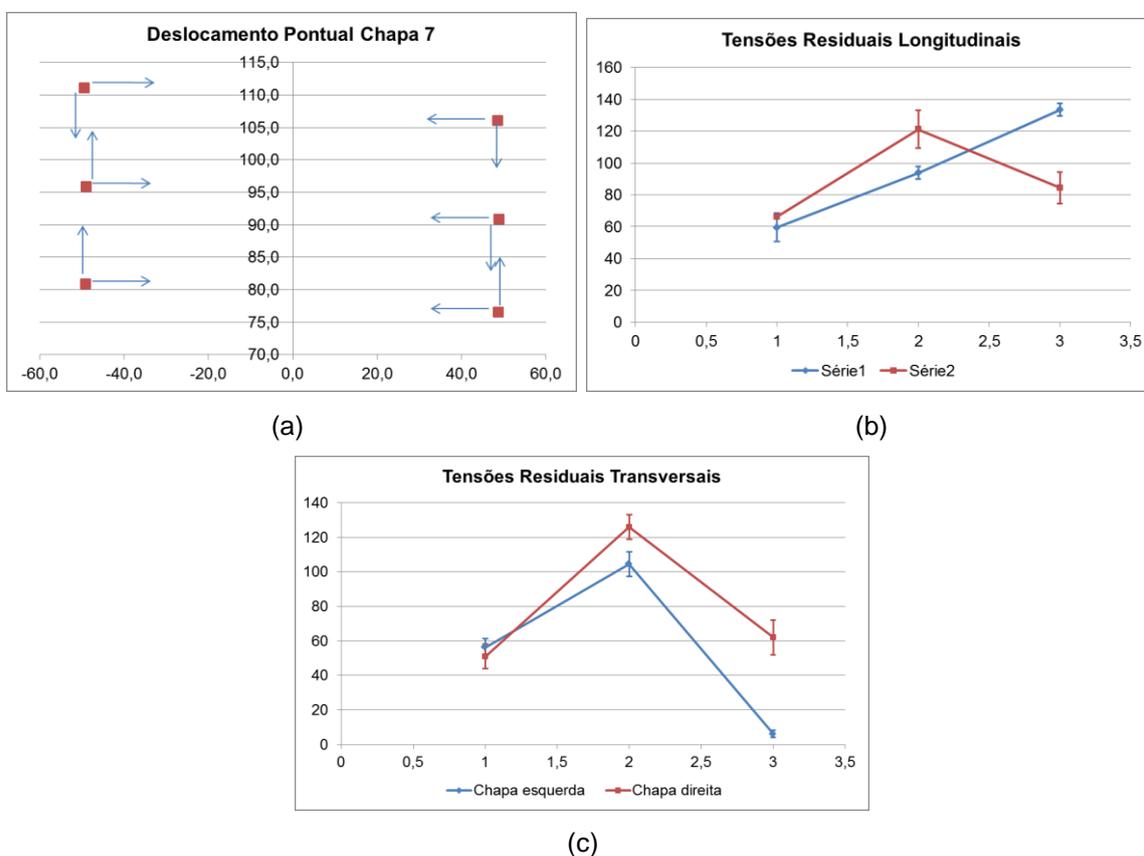
Ponto:	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
1a	$56^{\pm 5}$	$59^{\pm 9}$
2a	$104^{\pm 7}$	$94^{\pm 4}$
3a	$6^{\pm 2}$	$133^{\pm 4}$
1b	$51^{\pm 7}$	$66^{\pm 1}$
2b	$126^{\pm 7}$	$121^{\pm 12}$
3b	$62^{\pm 10}$	$84^{\pm 10}$

Fonte: O Autor.

Na Figura 5.8 as TRs longitudinais aliviadas das ZTAs, possuem módulo variando entre 59 MPa e 133 MPa, indicando tensões compressivas. Os pontos 1a e 1b possuem um comportamento ascendente enquanto os pontos 3a e 3b descendem gerando uma aproximação a qual caracteriza as regiões como compressivas.

Foi observado também que os deslocamentos dos pontos centrais se deslocam no sentido contrário ao sentido do cordão de solda mais próximo.

Figura 5.8 – Comportamento da Chapa 7 para Tratamento Térmico de 680°C a 30 minutos. (a) Deslocamento dos pontos [mm]. (b) TR longitudinais [MPa]. (c) TR transversais [MPa].



Fonte: O Autor.

5.2 DISCUSSÕES

5.2.1 Validação do Método DPC

De acordo com a ASTM E 837, um erro de medida da tensão residual de um ponto (furo) é estimado pela razão:

$$\text{ERRO}_{ASTM} = \frac{\sigma_{ASTM}}{\sigma_{REAL}} \quad (5.1)$$

Onde:

σ_{ASTM} → Tensão residual aliviada determinada através dos coeficientes e metodologia da norma em questão. [Pa];

σ_{REAL} → Tensão determinada experimentalmente. [Pa].

Baseado na razão das tensões pode-se estimar o erro do método DPC em relação à difração de raios-X através da relação da Equação 5.2:

$$\text{ERRO}_{EQUIVALENTE} = \frac{\sigma_{DPC}}{\sigma_{DRX}} \quad (5.2)$$

Onde:

σ_{DPC} → TR no estado plano, determinadas pelo método DPC. [Pa];

σ_{DR-X} → TR no estado plano, determinadas por DR-X. [Pa].

Apesar da técnica de difração de raios-X apresentarem erros com desvios superiores a 30% em alguns pontos, os valores determinados por esta técnica serviram para validar o método utilizado. No qual o erro equivalente cometido pelas medições por coordenadas em relação às medições por raios-X variou conforme a inequação abaixo:

$$25\% < \text{ERRO}_{\text{EQUIVALENTE}} < 40\% \quad (5.3)$$

Onde:

$\text{ERRO}_{\text{EQUIVALENTE}} \rightarrow$ Valores determinados a partir dos componentes σ_x medidos pelas duas técnicas de medição na condição de estado plano.

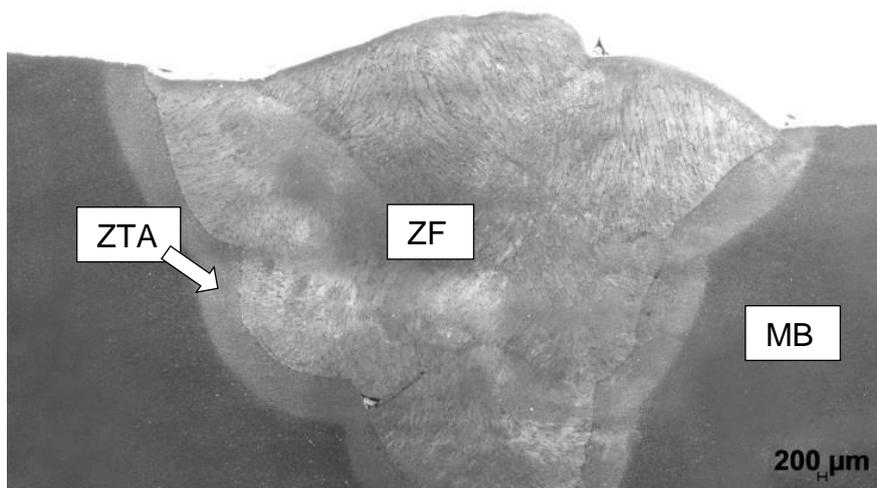
Os valores das tensões transversais determinados por difração de raios-X e utilizando o método DPC são muito próximos, como ilustrado na Figura 5.2. Nesta figura as tensões resultantes nos pontos 2, 3, 4 e 5 pelo método DPC estão contidas no intervalo das medições por DR-X, possuindo assim erros menores. A divergência ocorreu apenas no ponto 1 acarretando maior erro equivalente, entretanto, o mesmo acompanha a tendência crescente e são mais condizentes com a literatura, pois não ultrapassam o limite de escoamento do material como o calculado pelo DR-X. Tal resultado está condizente com Siqueira Filho (2013).

5.2.2 Análise Macroscópica

As macrografias das juntas soldadas foram realizadas para definir as regiões onde se realizaria os estudos microscópicos e para medição das extensões da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e da Zona Fundida (ZF) para condição de tratamento de alívios de tensões.

A macrografia correspondente ao corte transversal da peça soldada e o respectivo perfil de penetração conhecido como *finger joint type* no qual ocasiona uma ZTA com dimensões variáveis ao longo de sua extensão, são apresentados na Figura 5.9. Nesta escala, observam-se os multipasses da solda, as zonas fundida (ZF) e termicamente afetada (ZTA), e a região do metal base (MB). Embora existam pequenas descontinuidades (inclusão do filme vítreo) a solda foi bem executada.

Figura 5.9 – Macrografia da JS para o tratamento térmico de 580°C.



Fonte: O Autor.

5.2.3 Evolução Microestrutural

A evolução microestrutural produzida pela plastificação e pelo alívio de tensões subsequente foi observada e analisada. Os aspectos morfológicos de uma junta soldada do aço ASTM AH36 foram analisados antes e após TTAT. Para análise foram preparados corpos de prova por metalografia tradicional nas condições de soldados com e sem tratamento térmico, e as análises microestruturais foram realizadas no microscópio invertido Zeiss Axio Obser-Z1 com magnificação de 500 vezes.

Baseados nas análises morfológicas, os resultados mostraram a eficácia do tratamento para alívio das tensões residuais e, a partir das quais, pode-se observar que não houve recristalização na escala observada para as diferentes temperaturas testadas.

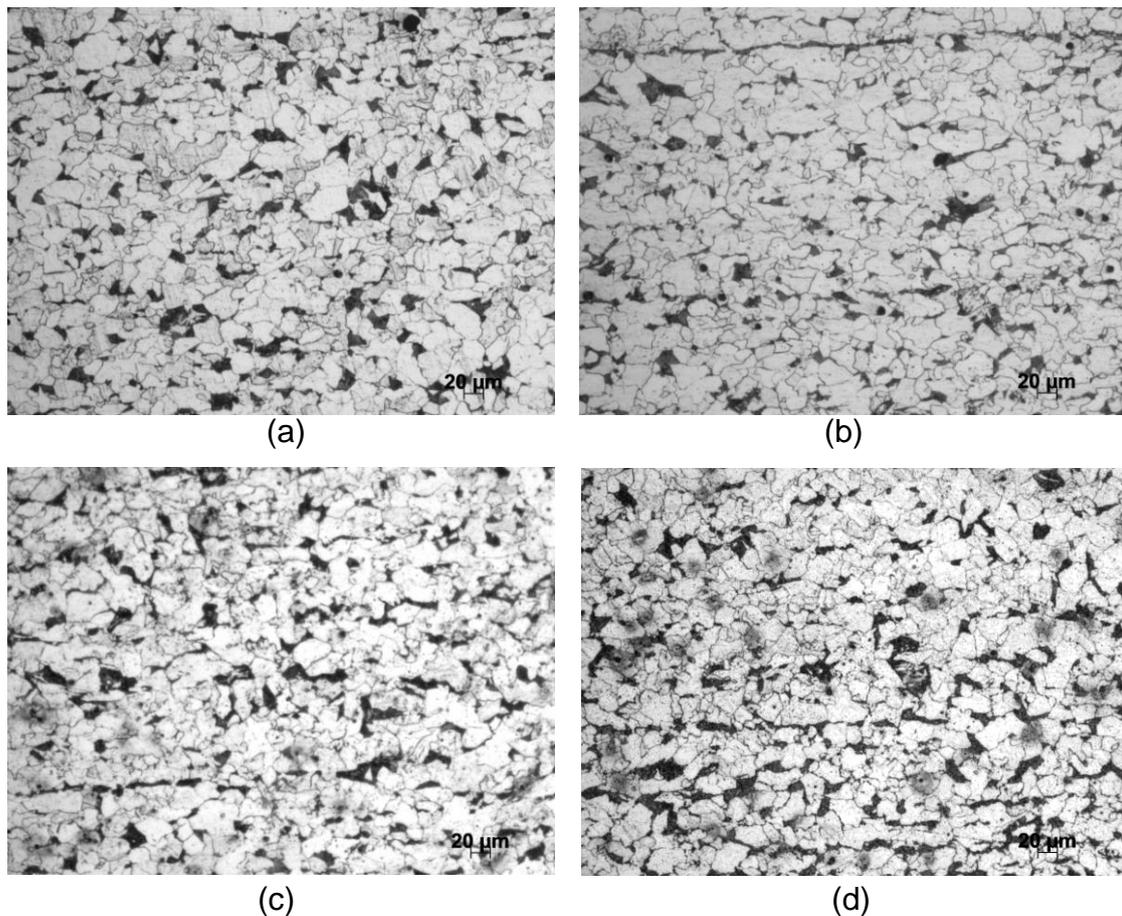
A evolução microestrutural, caracterizando o alívio das tensões residuais, foi analisada em diferentes regiões de um corpo de prova após soldagem, no metal base (MB) e na zona termicamente afetada (ZTA).

5.2.3.1 Microestruturas do Metal de Base

A microestrutura do metal base é composta basicamente por grãos ferríticos equiaxiais, levemente enriquecidos de perlita nos contornos e ligeiramente alongados no sentido de laminação, devido ao processo termomecânico que este material é submetido durante a sua fabricação.

Na Figura 5.10 é possível observar que não houveram transformações microestruturais na escala observada independente do tratamento térmico, apesar de apresentar uma fina precipitação de carbeto com o aumento da temperatura de tratamento sendo mais visível na amostra de maior tratamento, Figura 5.10(d).

Figura 5.10 – Micrografia do Metal de Base. (a) Sem tratamento térmico. (b) Tratada termicamente a 580°C. (c) Tratada termicamente a 630°C. (d) Tratada termicamente a 680°C



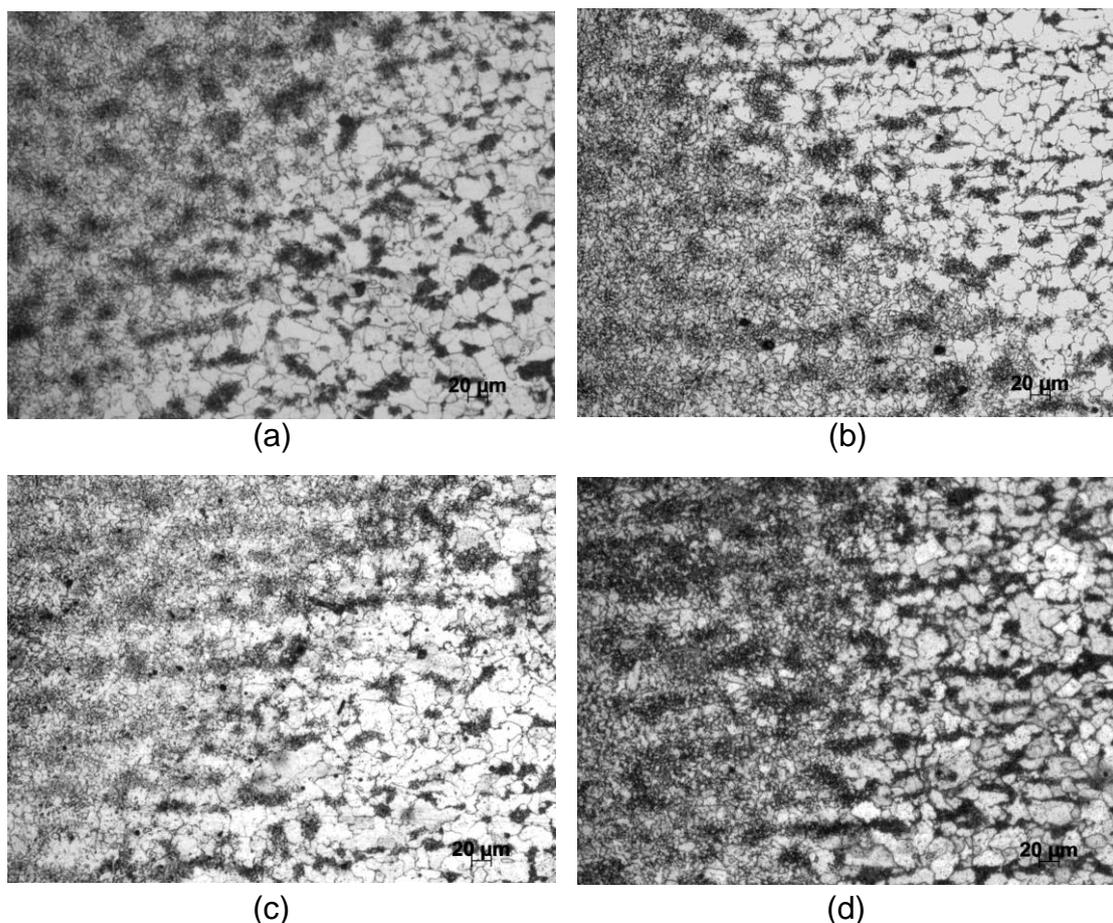
Fonte: O Autor.

5.2.3.2 Microestruturas da interface Metal de Base e ZTA

Na região de interface do Metal de Base (MB) e da Zona Termicamente Afetada (ZTA) pode-se observar que em temperaturas mais elevadas ocorreu uma maior nucleação de subgrãos.

Na região de maior plastificação os efeitos do TTAT são mais significativos. A nucleação de subgrãos é mais acentuada no material tratado a temperaturas de tratamento mais elevadas, 680°C, que nas outras temperaturas, na qual também pode ser observada na região do entorno do MB. Tal resultado está de acordo com o observado por Ravi, *et al.* (2004).

Figura 5.11 – Micrografia da Interface MB e ZTA. (a) Sem tratamento térmico. (b) Tratada termicamente a 580°C. (c) Tratada termicamente a 630°C. (d) Tratada termicamente a 680°C.



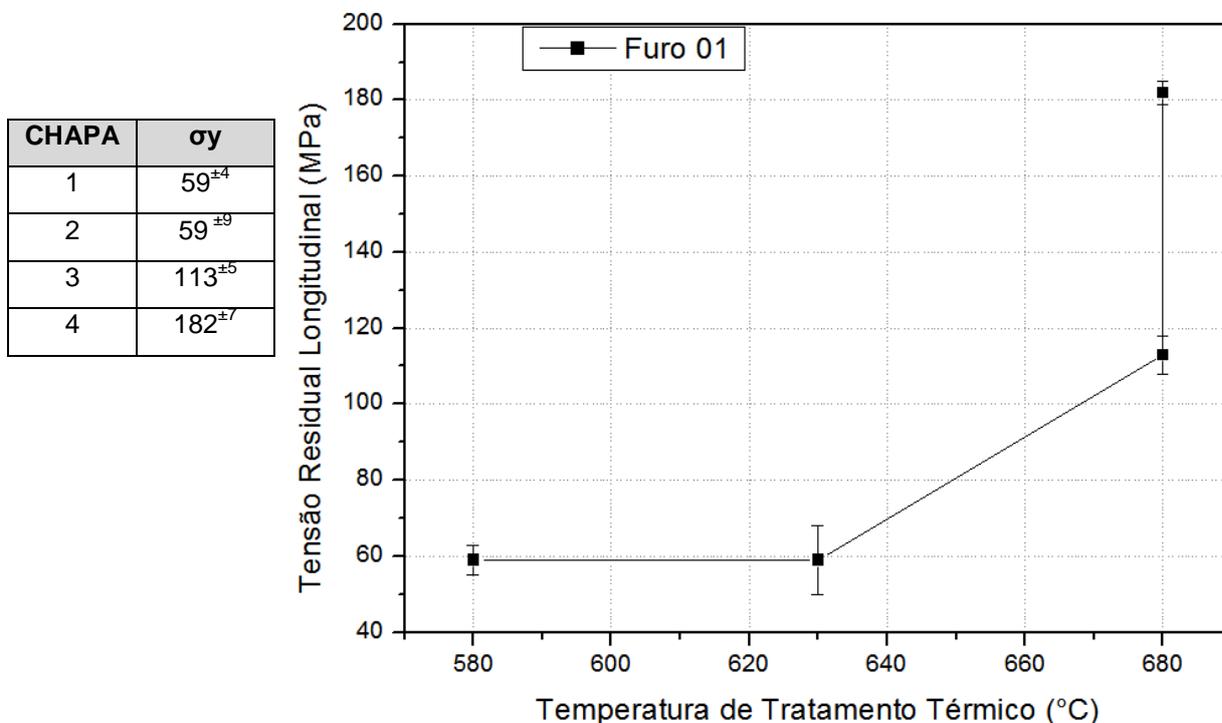
Fonte: O Autor.

5.2.4 Avaliação da influência do TTAT na junta soldada

Vários tratamentos de alívio de tensão foram aplicados para reduzir as tensões residuais ou distorções para analisar as propriedades do metal de base afetado. Observou-se que o alívio de tensões depende fundamentalmente da temperatura e do seu tempo de permanência em altas temperaturas (ZEEMANN, 2003 apud MORAIS JR, 2008).

A análise individual pontual ilustrada na Figura 5.12 para as chapas soldadas demonstra que o alívio de tensões residuais aliviadas no tratamento da zona termicamente afetada sofre um leve aumento quando se compara os tratamentos a 580°C com o de 630°C e um aumento gradativo das tensões residuais longitudinais aliviadas na ordem de 208,5% com o aumento da TTAT como visto também por Lee *et al.* (2014) e com a elevação do tempo de permanência em altas temperaturas.

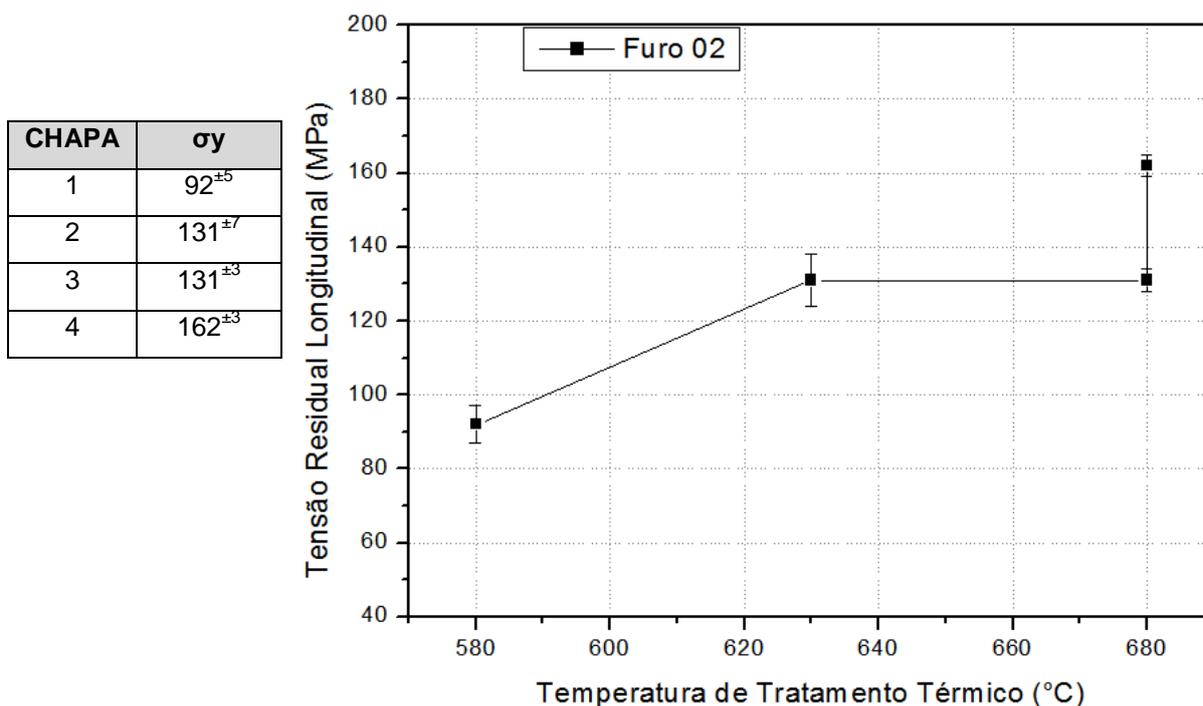
Figura 5.12 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 01.



Fonte: O Autor.

Com a análise individual pontual das chapas soldadas nota-se que o alívio de tensões residuais longitudinais aliviadas no tratamento da zona termicamente afetada aumenta 76,1% com a elevação da temperatura de tratamento de alívio de tensões e com tempo de exposição a altas temperaturas, apesar da chapa tratada termicamente a 680°C por 30 minutos apresentar tensões residuais aliviadas semelhantes à chapa tratada a 630°C durante o mesmo tempo, a diferença dos valores das tensões residuais estão dentro da margem de erro do processo não caracterizando uma redução, tal anomalia se justifica por erros das próprias medições dos pontos coordenados, como ilustra as Figuras 5.13.

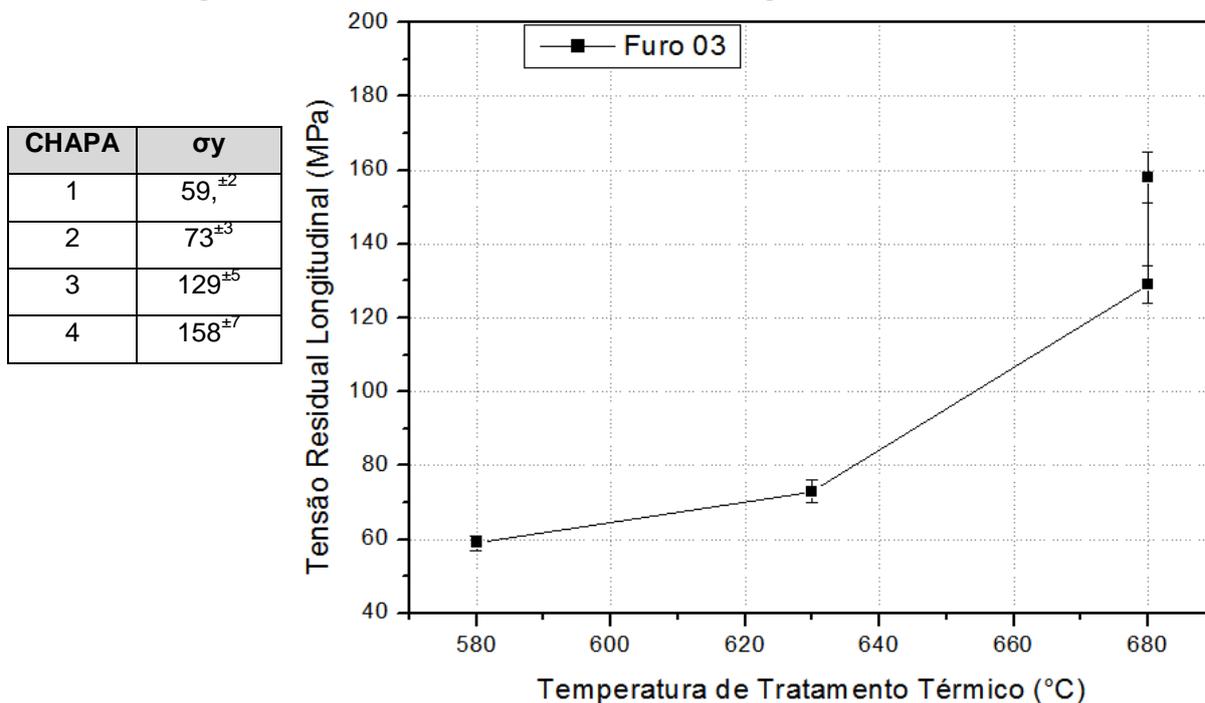
Figura 5.13 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 02.



Fonte: O Autor.

A análise pontual, ilustrada na Figura 5.14 para as chapas soldadas, demonstra que o alívio de tensões residuais aliviadas no tratamento da zona termicamente afetada sofre um aumento gradativo na ordem de 167,8% com o aumento da temperatura do TTAT. Observou-se também que com a elevação do tempo de permanência em altas temperaturas há um aumento das tensões residuais aliviadas, no qual tal resultado esta de acordo com Smith *et al.* (1996) e Zeeman (2003).

Figura 5.14 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 03.



A análise pontual das chapas soldadas mostrou um acréscimo gradativo das TRs longitudinais aliviadas no TTAT, na ordem de 151,5% no furo quatro e de 143,7% para o furo cinco com o aumento da temperatura e do tempo de permanência em altas temperaturas, demonstradas nas Figuras 5.15 e 5.16.

Figura 5.15 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 04.

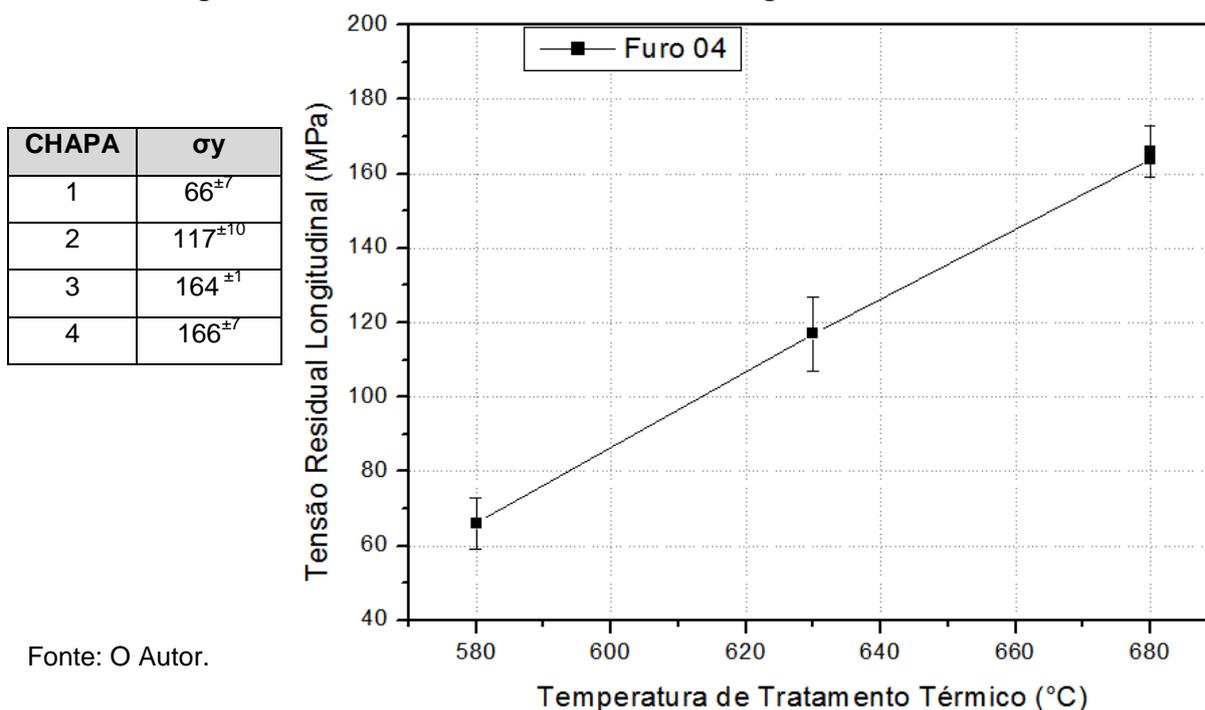
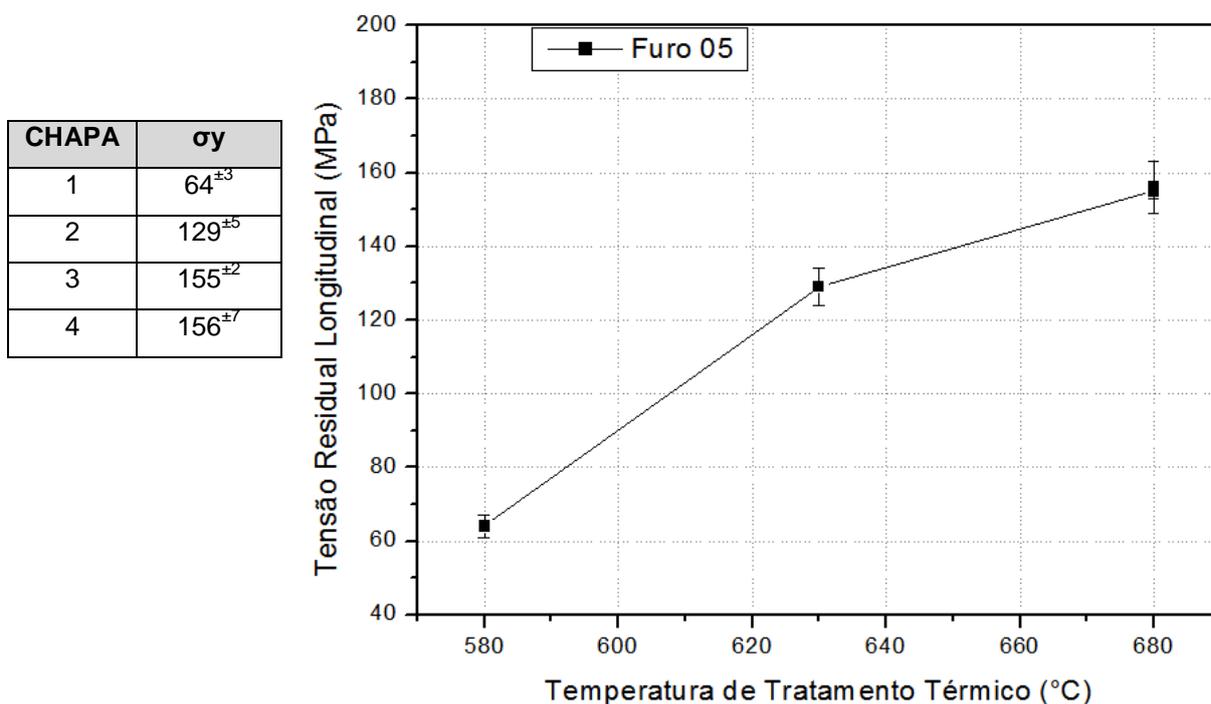


Figura 5.16 – Alívio de Tensões Residuais Longitudinais no Furo 05.



Fonte: O Autor.

Com tais análises observou-se que o tempo de permanência no tratamento térmico de alívio de tensão e a temperatura de tratamento são variáveis determinantes no TTAT (ZEEMANN, 2003).

5.2.5 Avaliação da influência do sentido de soldagem e da temperatura

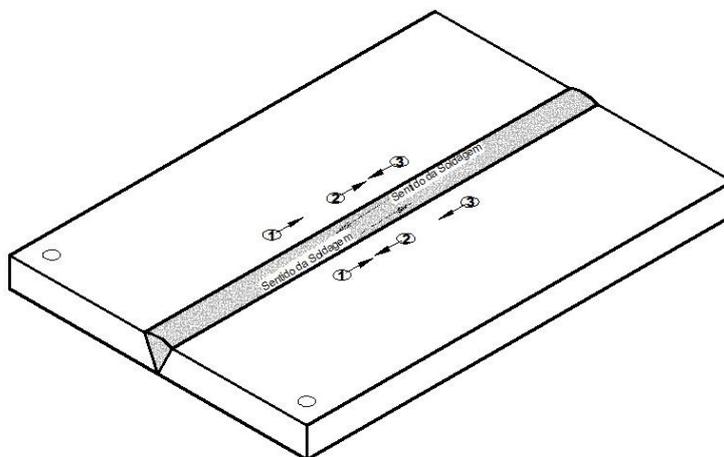
Com a variação do sentido de soldagem, observou-se um deslocamento preferencial dos pontos coordenados centrais, localizados na zona termicamente afetada.

Tais pontos deslocaram-se no sentido contrário à deposição do cordão de solda mais próximo, invertendo a direção da tensão de recuo durante o TTAT. Este efeito foi percebido em ambas as condições de tratamento térmico como ilustra a Figura 5.17.

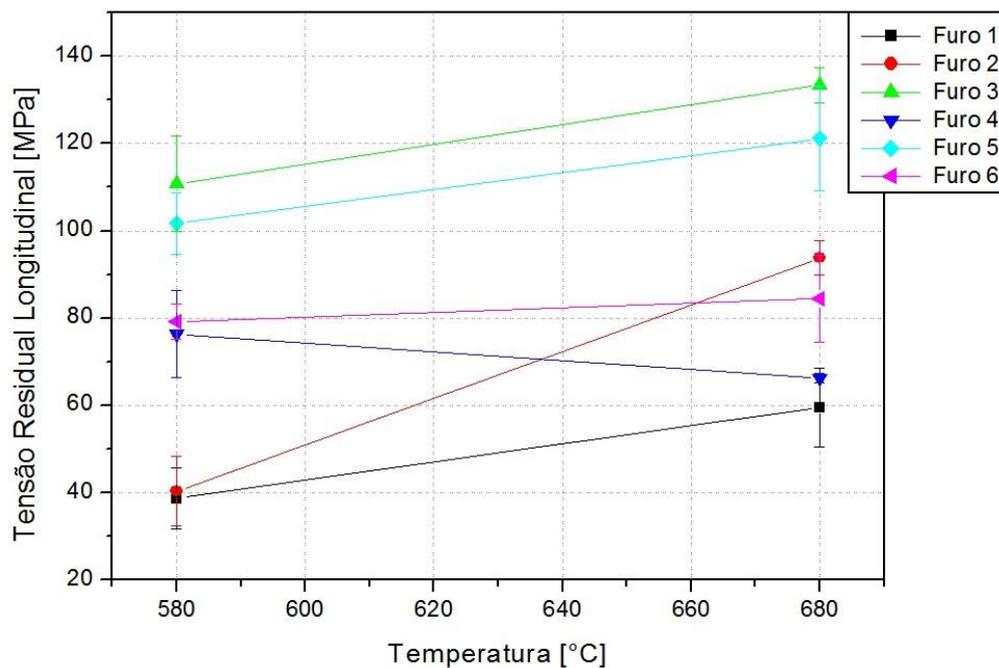
Também foi observada uma redução dos distanciamentos referentes aos furos um e três, caracterizando tensões residuais longitudinais de caráter compressivo na região da zona termicamente afetada.

A análise pontual das tensões residuais aliviadas com o aumento da temperatura pode ser ilustrada na Figura 5.18, na qual se observa um aumento médio das tensões residuais longitudinais aliviadas de 38,7%.

Figura 5.17 – Comportamento dos pontos coordenados.



Fonte: O Autor.



Fonte: O Autor.

6 CONCLUSÃO

O objetivo desta pesquisa foi investigar a Influência da temperatura no tratamento térmico de alívios de tensões em uma junta soldada do aço ASTM AH-36 baseado no método DPC, estabelecendo o seu mapa de intensidade e de natureza (compressiva ou trativa).

Na realização dos experimentos, pode-se concluir que:

- O método DPC mostrou-se bastante coerente, quando comparado aos valores obtidos por difração de raios-X (DR-X). Estando na faixa de erro equivalente entre 25% e 40%.
- Com a variação do sentido de soldagem observou-se um deslocamento preferencial dos pontos coordenados centrais localizados na zona termicamente afetada, que se deslocaram no sentido contrário ao cordão de solda mais próximo, devido ao relaxamento promovido pelo TTAT.
- As análises microscópicas mostraram a eficácia do tratamento para alívio das tensões residuais.
- Na região de interface do MB e da ZTA pode-se observar que em temperaturas mais elevadas ocorreu uma maior nucleação de subgrãos, no qual os mesmos sofreram fortes deformações plásticas principalmente a temperaturas de tratamento mais elevadas.
- Observou-se que os distanciamentos referentes aos furos possuem um caráter compressivo na região da zona termicamente afetada e trativo na região do cordão de solda.
- Com a análise pontual das chapas soldadas é verificado que tanto no cordão de solda quanto na zona termicamente afetada há um aumento gradativo das tensões residuais longitudinais aliviadas com o tratamento térmico na ordem de 75% a 210% com o aumento da temperatura e do tempo de permanência em altas temperaturas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Handbook – Fundamentals of Welding*, vol. 1, 7a ed., 1994, 373 p.

ANDEROGLU, B.S.O. *Residual stress measurement using X-ray diffraction*. Texas, *Master of science*, 2004, p. 12-42.

ASTM E 837 – 01, *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*, 2002.

AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY. *Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*. AWS A 5.18. 2001.

BARBOSA, R. P. *Metalurgia da Soldagem Soldabilidade dos Materiais*, Apostila, UNILESTEMG, Minas Gerais, MG, 2007.

BOSCH, J. A. *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Book, CRC, New York, p. 443, 1995.

CALLE, G. M. A. *Análise Numérico-Computacional das Tensões Residuais Induzidas pelo Jateamento com Granalha*, p. 96, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. (Dissertação)

CALLE, M.A.; ALVES, M. . *Methodology for Numerical Modelling of the Shot Peening Process using Multibody System*. In: *8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, 2009, Bauru. Proceedings of the 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications. Bauru: UNESP, 2009. v. 8.*

CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 5ed. LTC, São Paulo, 2002, p. 78-100.

CHUVAS, T. C. *Estudo da Influência dos Parâmetros de Tratamento de Alívio das Tensões Residuais por Vibração Mecânica em Juntas Soldadas a Plasmas*, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

ESAB. Conhecimento - Apostilas. **ESAB.COM.BR**, 25 Janeiro 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf>. Acesso em: 01 Março 2015.

FOGAGNOLO, J. B. *Introdução a Processos e Metalurgia da Soldagem*. Unicamp. São Paulo, p. 99. 2011.

FORTES, C. **Arames Tubulares OK**. Contagem/MG: ESAB S/A Industria e Comércio. Revisão 2004:. p 101.

Kwofie, S. **Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief**, Materials Science and Engineering A, vol. 516, pp. 154-161, 2009.

LEE, K. H.; JHUNG, M. J., **Effects Of Tempering And PWHT on Microstructures and Mechanical Properties of SA508 Gr.4n Steel**, Nuclear Engineering and Technology, vol. 46, pp. 413-422, 2014.

LIMA, N. B. **Influência da textura em medidas de tensão residual**, 105 p., Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

LONG, M. J.; CHEN, D. F., **Simulation an investigation on Physical Properties of Continuos Casting Slab AH36 at High Temperature**, Trans Tech Publication Switzerland, vols. 575-578, pp. 75-78, 2008.

Lu, J., **Handbook of Measurement of Residual Stresses**, editora Fairmont Press, Universidade da California, 1996.

LUCENA, H. N. **Geração de estratégias de medição de superfícies complexas em sistema CAD para máquinas de medir por coordenadas**, UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, SP, 2009. (Dissertação)

MACHERAUCH, E.; KLOSS, K. H., **Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress in Science and Technology**. Ed. by Macherlauch, V. Hauk, DGM VERLAG, 1987.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. Único, 2011. 365p.

MARTIN, V. B. **Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear**, Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

MARTINS, C. O. D.; STROHAECKER, T. R.; ROCHA, A. S.; HIRSCH, T. K. **Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100**. Revista Matéria, v 9, 2004, p. 20–28.

MILER. **Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW)**, 2014. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com>>. Acesso em: 15 Fevereiro 2014.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. ; SANTOS, B. D. **Introdução à Metalurgia de Soldagem**, Janeiro 2012. Disponível em: < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 16 Março 2015.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. UFMG, Minas Gerais, MG, Novembro 2000.

MODENESI, P. J.; MRQUES, P. V. Processos de Soldagem. **DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**, 01 Fevereiro 2006. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 15 Março 2014.

MODENESI, P.J. **Efeitos Mecanicos do Ciclo Térmico**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. 2001.

MONIN V. I. ; GUROVA T. ; CASTELLO X. ; ESTEFEN S. F. **Analysis of residual stress state in welded steel plates by x-ray diffraction method**. In; Rev.Adv. Mater.Sci. 19(2009) p. 172-175.

MORAIS JR, J. M. **Influência do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões Pós-soldagem na Microestrutura e Comportamento Mecânico de Soldas Produzidas por Arame Tubular Rutílico** . UFP, Lorena, MG, 2008.

OKUMURA, T.; TANIGUSGI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2002.

PREVÉY, P. S., **X-ray Diffraction residual Stress Techniques**. *Metals Handbook, American Society for Metals*, v. 10, p. 380-392, 1986.

RAVI, S.; BALASUBRAMANIAN, V., **Influences of MMR, PWHT and notch location on fatigue life of HSLA steel welds**, *Engineering Failure Analysis*, August 2004.

ROLIM, T. L. **Sistemática indicadora de método para calibração de máquinas de medição por coordenadas**, UFPB, João Pessoa, PB, 2003. (Tese)

SILVA E. S. **Projeto e desenvolvimento de uma máquina de medição por coordenadas automatizada**, Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte, MG, Setembro de 2014.

SILVA, B. M. **Alívio de tensões residuais em juntas soldadas de caixa espiral de turbina hidráulica**. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. São Paulo, 2005.

SIQUEIRA FILHO, A. V.; FERREIRA, R. A. S.; ROLIM, T. L., ***Development of Methodology for Measurements of Residual Stresses in Welded Joint Based on Displacement of Points in a Coordinated Table***, *Materials Research*, 2013.

SMITH, C.; PISTORIUS, P. G. H.; WANNENBURG, J.. ***The effect of a long post weld heat treatment on the integrity of a welded joint in a pressure vessel steel***, Elsevier Science Limited, 1996.

SOUSA, A. R. **Padrões Corporificados e a Tecnologia de Medição por Coordenadas Inovando a Qualificação Geométrica de Centros de Usinagem**, Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, 2000.

SOUZA, D. A. **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza**, São João Del-Rei, UFSJ, 2012. Disponível em: <http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Diogo_A_de_Sousa.pdf>. Acesso em: 18 Março 2015.

Total Matéria < <http://search.totalmateria.com/Search/SubgroupList/1264674>> Acesso em: 25 Março 2015.

WAINER, E.; BRANDÍ, S. D.; MELO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA., v. Único, 2004. 506 p. ISBN ISBN 85-212-0238-5.

WERNER, A., ***Reverse engineering of free-form surfaces***. *Journal Of Materials Processing Technology*, Bialystok, v. 76, p. 128-132, 1998.

ZEEMANN, A. **Tensões Residuais de Soldagem**. Infosolda. 2003. 5 p. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/download/50dpe.pdf>> Acesso em: 22/02/2015.

APÊNDICE

Apêndice A – Memória de cálculo das tensões residuais dos processos.

Tabela A.1 – Cálculo da Tensão Residual para o tratamento de 580°C a 30 m.

CHAPA 1 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL (TRATAMENTO TÉRMICO DE 580°C A 30 M)												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-\nu^2$	$(\epsilon_x+\nu\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+\nu\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ total
1	45,942	78,239	45,922	78,274	-0,0002917	0,000348	226373,6	-0,0001873	0,00026	-42,41	58,95	88,17
2	45,886	91,609	45,878	91,572	-0,0001214	-0,000369	226373,6	-0,0002322	-0,00041	-52,56	-91,83	79,81
3	46,248	104,724	46,234	104,704	-0,0001984	-0,000201	226373,6	-0,0002588	-0,00026	-58,59	-59,05	58,82
4	52,162	85,849	52,148	85,826	-0,0001995	-0,000230	226373,6	-0,0002685	-0,00029	-60,78	-65,59	63,33
5	52,68	99,738	52,650	99,779	-0,0004236	0,000410	226373,6	-0,0003006	0,000283	-68,04	64,05	114,41

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.

Tabela A.2 – Cálculo da Tensão Residual para o tratamento de 630°C a 30 m.

CHAPA 2 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL (TRATAMENTO TÉRMICO DE 630°C A 30 M)												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-\nu^2$	$(\epsilon_x+\nu\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+\nu\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ total
1	44,315	74,497	44,331	74,516	0,0002355	0,000191	226373,6	0,000292841	0,000262	66,29	59,26	63,07
2	43,770	89,210	43,780	89,264	0,0001489	0,000536	226373,6	0,000309723	0,000581	70,11	131,48	113,95
3	43,708	105,299	43,751	105,248	0,0006191	-0,000510	226373,6	0,000466108	-0,00032	105,51	-73,41	155,78
4	52,636	84,843	52,658	84,885	0,0003133	0,000421	226373,6	0,0004397	0,000515	99,54	116,69	109,13
5	52,489	98,349	52,510	98,397	0,0003023	0,000480	226373,6	0,000446377	0,000571	101,05	129,24	117,70

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.

Tabela A.3 – Cálculo da Tensão Residual para o tratamento de 680°C a 30 m.

CHAPA 3 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL (TRATAMENTO TÉRMICO DE 680°C A 30 M)												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-\nu^2$	$(\epsilon_x+\nu\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+\nu\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ total
1	48,457	76,992	48,487	77,029	0,000435	0,000368	226373,6	0,000545447	0,000499	123,47	112,88	118,53
2	48,431	91,812	48,465	91,855	0,0004836	0,000435	226373,6	0,000614006	0,00058	138,99	131,25	135,29
3	49,321	106,891	49,380	106,809	0,000838	-0,000820	226373,6	0,000591831	-0,00057	133,97	-128,83	227,61
4	53,606	84,855	53,675	84,753	0,0009847	-0,001021	226373,6	0,00067824	-0,00073	153,54	-164,36	275,36
5	53,794	100,425	53,835	100,476	0,0005813	0,000511	226373,6	0,00073445	0,000685	166,26	155,04	160,95

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.

Tabela A.4 – Cálculo da Tensão Residual para o tratamento de 680°C a 60 m.

CHAPA 4 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL (TRATAMENTO TÉRMICO DE 680°C A 60 M)												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-\nu^2$	$(\epsilon_x+\nu\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+\nu\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ_{total}
1	44,439	75,513	44,476	75,577	0,0005286	0,000645	226373,6	0,000722027	0,000803	163,45	181,87	173,39
2	44,181	90,502	44,215	90,559	0,0004857	0,000570	226373,6	0,000656714	0,000716	148,66	162,02	155,77
3	44,616	104,897	44,686	104,797	0,001	-0,001000	226373,6	0,0007	-0,0007	158,46	-158,46	274,46
4	50,401	83,857	50,477	83,753	0,0010857	-0,001040	226373,6	0,000773714	-0,00071	175,15	-165,69	291,79
5	50,164	97,629	50,192	97,686	0,0004039	0,000570	226373,6	0,000574923	0,000691	130,15	156,46	145,11

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.

Tabela A.5 – Cálculo da Tensão Residual para o tratamento de 680°C a 30 m.

CHAPA 5 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL (TRATAMENTO TÉRMICO DE 680°C A 30 M)												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-\nu^2$	$(\epsilon_x+\nu\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+\nu\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ_{total}
1	50,359	79,677	50,395	79,732	0,0006	0,000550	226373,6	0,000765	0,00073	173,18	165,25	169,35
2	50,479	93,441	50,509	93,488	0,0005	0,000470	226373,6	0,000641	0,00062	145,11	140,35	142,79
3	50,048	109,197	50,129	109,108	0,00135	-0,000890	226373,6	0,001083	-0,00049	245,16	-109,79	314,76
4	58,499	85,55	58,574	85,461	0,00125	-0,000890	226373,6	0,000983	-0,00052	222,53	-116,58	298,41
5	58,562	99,369	58,606	99,423	0,0007333	0,000540	226373,6	0,000895333	0,00076	202,68	172,04	189,23

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.

Apêndice B – Memória de cálculo das tensões residuais bidirecionais.

Tabela B.1 – Cálculo da Tensão Residual na Soldagem.

CHAPA 6 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL NA SOLDAGEM												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-\nu^2$	$(\epsilon_x+\nu\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+\nu\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ_{total}
1a	49,181	72,791	49,120	72,881	-0,0008714	0,000900	226373,6	-0,0006014	0,000639	-136,15	144,56	243,13
2a	49,215	88,708	49,168	88,623	-0,0006774	-0,000855	226373,6	-0,0009338	-0,00106	-211,39	-239,49	226,75
3a	49,665	105,495	49,626	105,428	-0,0005517	-0,000670	226373,6	-0,0007526	-0,00084	-170,38	-189,11	180,48
1b	-49,818	78,635	-49,901	78,774	-0,0011822	0,001394	226373,6	-0,0007640	0,001039	-172,96	235,26	354,89
2b	-49,075	94,999	-48,992	94,894	0,0011834	-0,001055	226373,6	0,0008669	-0,0007	196,24	-158,43	307,74
3b	-49,339	112,093	-49,297	111,998	0,0005943	-0,000945	226373,6	0,0003108	-0,00077	70,35	-173,60	217,49

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.

Tabela B.2 – Cálculo da Tensão Residual para o tratamento de 580°C a 30 m.

CHAPA 6 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL (TRATAMENTO TÉRMICO DE 580°C A 30 M)												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-v^2$	$(\epsilon_x+v\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+v\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ total
1a	49,120	72,881	49,088	72,878	-0,0004572	-0,000034	226373,6	-0,000467	-0,00017	-105,80	-38,68	92,72
2a	49,168	88,623	49,154	88,611	-0,000194	-0,000120	226373,6	-0,000230	-0,00018	-52,07	-40,36	47,32
3a	49,626	105,428	49,670	105,458	0,0006167	0,000305	226373,6	0,000708	0,00049	160,30	110,84	142,18
1b	-49,901	78,774	-49,828	78,709	0,0010405	-0,000650	226373,6	0,000846	-0,00034	191,42	-76,39	238,96
2b	-48,992	94,894	-49,065	94,970	-0,0010406	0,000761	226373,6	-0,000812	0,000449	-183,86	101,70	250,69
3b	-49,297	111,998	-49,316	112,042	-0,000271	0,000431	226373,6	-0,000142	0,00035	-32,07	79,15	99,15

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.

Tabela B.3 – Cálculo da Tensão Residual na Soldagem.

CHAPA 7 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL NA SOLDAGEM												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-v^2$	$(\epsilon_x+v\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+v\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ total
1a	48,609	76,596	48,602	76,585	-0,0001061	-0,000109	226373,6	-0,0001388	-0,00014	-31,41	-31,82	31,62
2a	48,815	90,868	48,821	90,879	8,689E-05	0,000105	226373,6	0,0001184	0,000131	26,81	29,70	28,37
3a	48,535	106	48,526	105,980	-0,0001374	-0,000195	226373,6	-0,0001959	-0,00024	-44,35	-53,49	49,56
1b	-49,257	80,952	-49,250	80,941	0,0001002	-0,000107	226373,6	0,0000681	-7,7E-05	15,42	-17,43	28,46
2b	-49,018	95,836	-49,031	95,861	-0,0002	0,000254	226373,6	-0,0001237	0,000194	-28,01	43,95	62,82
3b	-49,432	110,967	-49,443	110,992	-0,0001714	0,000250	226373,6	-0,0000964	0,000199	-21,82	44,98	58,99

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.

Tabela B.4 – Cálculo da Tensão Residual para o tratamento de 680°C a 30 m.

CHAPA 7 - CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL (TRATAMENTO TÉRMICO DE 680°C A 30 M)												
FURO	COORDENADA ANTES DO TT		COORDENADA DEPOIS DO TT		ϵ_x	ϵ_y	$E/1-v^2$	$(\epsilon_x+v\epsilon_y)$	$(\epsilon_y+v\epsilon_x)$	σ_x	σ_y	σ total
1a	48,602	76,585	48,589	76,564	-0,0001873	-0,000207	226373,6	-0,0002493	-0,00026	-56,43	-59,49	58,02
2a	48,821	90,879	48,795	90,848	-0,0003708	-0,000303	226373,6	-0,0004617	-0,00041	-104,51	-93,79	99,59
3a	48,526	105,980	48,510	106,046	-0,0002245	0,000657	226373,6	-0,0000275	0,000589	-6,23	133,41	136,64
1b	-49,250	80,941	-49,226	80,902	0,0003443	-0,000396	226373,6	0,0002255	-0,00029	51,04	-66,28	101,89
2b	-49,031	95,861	-49,001	95,902	0,0004349	0,000405	226373,6	0,0005564	0,000535	125,95	121,16	123,62
3b	-49,443	110,992	-49,431	111,024	0,0001786	0,000319	226373,6	0,0002744	0,000373	62,12	84,42	75,77

Foi utilizado o módulo de 206GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 segundo Callister.