



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

HENRIQUE JUN SUGAHARA

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS  
CONSIDERANDO-SE A ANISOTROPIA DO MATERIAL

Recife  
2019

HENRIQUE JUN SUGAHARA

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS  
CONSIDERANDO-SE A ANISOTROPIA DO MATERIAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em engenharia mecânica.

Área de Concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

Recife

2019

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

S947a Sugahara, Henrique Jun.  
Avaliação das tensões residuais em juntas soldadas considerando-se a anisotropia do material / Henrique Jun Sugahara. – 2019.  
93 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.  
Coorientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Método DPC. 4. Anisotropia do material. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti (Orientador). II. Rolim, Tiago Leite (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-34

HENRIQUE JUN SUGAHARA

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS  
CONSIDERANDO-SE A ANISOTROPIA DO MATERIAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 30/08/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Tiago Leite Rolim (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. José Maria Andrade Barbosa (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Yogendra Prasad Yadava (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Pablo Batista Guimarães (Examinador Externo)  
Instituto Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Francisco Ilo Bezerra Cardoso (Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Professor Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, por ter me orientando durante o doutorado, pela paciência com minha pessoa, com seus importantes conselhos e encorajamento para que eu conseguisse terminar este projeto.

Em seguida, meus agradecimentos ao Professor Tiago Leite Rolim, meu coorientador, por todo o ensinamento e ajuda nas operações na máquina de medição por coordenadas.

Também gostaria de aqui agradecer aos amigos Paternark Souza Barros, que me auxiliou na execução dos experimentos, Leonardo Gadêlha Melo que me auxiliou nas inúmeras medições na máquina de medições coordenadas, Rogério Pontes, que me ensinou detalhadamente acerca do tratamento dos dados, Sérgio Santos pelas análises no microscópio eletrônico de varredura, Janaína e Ivaldo pela colaboração na análise metalográfica, a Ivanilda Melo pelo ensaio de macrografia, e a Rubens Andrade pelas usinagens na fresadora.

Agradecimentos ao estaleiro Atlântico Sul pelo material doado, como também à CAPES e ao MCTI/CNPq/CT-Aquaviário pelo apoio financeiro.

Da mesma forma, agradeço ao Coordenador, a Vice Coordenadora, e a todos os docentes, técnicos e funcionários que fazem parte do Programa da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Por último, mas não o menos importante, agradeço a todos os meus colegas do Departamento de Engenharia Mecânica, com quem convivi e compartilhei muitos momentos de estudo e pesquisa, meus amigos e familiares, que me deram o suporte necessário para que eu pudesse hoje estar concluindo mais esta etapa.

“Engineering is achieving function while avoiding failure.”  
(Henry Petroski, 2019).

## RESUMO

As tensões residuais (TR) foram avaliadas em juntas soldadas considerando-se a anisotropia do material inferidas pelo método do Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC). Para o estudo, foram utilizadas chapas do aço ASTM A 131 grau AH36, nas dimensões 100 x 200 mm com espessura de 12,7 mm, ângulo do chanfro de 50° (ângulo de bisel de 25°). Os corpos de prova foram soldados pela técnica Gas Metal Arc Welding (GMAW) com parâmetros da soldagem otimizados, considerando-se a direção da orientação da laminação: um longitudinal e outro transversal. A identificação prévia da direção da laminação das chapas foi realizada por metalografia convencional. Depois de soldadas, foram realizados furos nos corpos de prova, lateralmente ao cordão de solda, distando dois e quatro milímetros em relação à margem do cordão de solda. Estes furos foram mapeados numa máquina de medição por coordenadas. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a um tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) à temperatura de 650°C, temperatura esta inferior à recristalização, pelo período de uma hora. Depois do tratamento térmico, as novas coordenadas dos furos previamente mapeados foram novamente levantadas e as extensões de seus deslocamentos calculados, a partir destas, foram calculadas as tensões residuais. Os resultados obtidos evidenciaram os efeitos da anisotropia da chapa onde a tensão residual longitudinal foi menor que a transversal quando a solda é realizada na direção da laminação e a tensão residual longitudinal maior que a transversal quando a solda é realizada transversalmente a direção da laminação.

Palavras-chave: Tensões residuais. Método DPC. Anisotropia do material.

## ABSTRACT

The residual stresses (RS) was evaluated in the welded joints, measured by Coordinated Point Displacement Method considering material's anisotropy. In the present study, ASTM A 131 grade AH36 steel plates were used, with dimension of 100 x 200 mm, thickness of 12.7 mm, groove angle of 50 degrees (bevel angle of 25 degree). First, the specimens were welded by Gas Metal Arc Welding (GMAW) process with optimized parameters considering the lamination's direction, namely, longitudinal, and transversal. The identification of the lamination direction was performed by conventional metallography analysis. And then, holes were drilled, localized at two and four millimeters apart from the bead edge. After that, those holes mapped by coordinate measuring machine followed by post weld heat treatment PWHT conducted at temperature of 650°C, which is below recrystallization's temperature, performed for one hour. Later, the holes previously referenced were mapped again, the value of displacements extent calculated. Finally, residual stresses were calculated. The results showed the anisotropy effects, where longitudinal residual stress was in value smaller than transversal residual stress when welding direction was the same of rolling direction, as well as, longitudinal residual stress was greater than transversal residual stress when welding direction was performed transversely in relation to the rolling direction.

Keywords: Residual stress. Displacement of coordinated points. Anisotropy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de soldagem.....	23
Figura 2 - Desenvolvimento das Tensões Residuais durante o processo da soldagem.....	27
Figura 3 - Efeito Bauschinger .....	29
Figura 4 - Sistema de dois eixos utilizado para mensuração das tensões residuais, coordenadas S e L.....	33
Figura 5 - Temperatura para o TTAT .....	34
Figura 6 - Montagem para soldagem semiautomática das chapas de teste .....	37
Figura 7 - Fluxograma dos experimentos.....	39
Figura 8 - Direção de laminação das chapas .....	41
Figura 9 - Aparato para soldagem simultâneas das chapas da direção transversal e longitudinal.....	41
Figura 10 - Dimensões dos furos .....	43
Figura 11 - Disposição dos furos.....	43
Figura 12 - Micrografia do experimento 1 (zona fundida-ZTA-metal de base) .....	46
Figura 13 - Micrografia do experimento 1.....	46
Figura 14 - Micrografia do experimento 1 (zona fundida).....	47
Figura 15 - Micrografia do experimento 2 (metal de base, ZTA e a Zona Fundida) .....	48
Figura 16 - Micrografia do experimento 2.....	48
Figura 17 - Micrografia do experimento 2 (zona fundida).....	49
Figura 18 - Micrografia do experimento 3 (Zona Fundida, ZTA e o metal de base) .....	50
Figura 19 - Micrografia do experimento 3 (zona fundida).....	50
Figura 20 - Micrografia do experimento 3.....	51
Figura 21 - Micrografias para determinação da direção da laminação.....	52
Figura 22 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 1 .....	54
Figura 23 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 2 .....	55
Figura 24 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 5 .....	56
Figura 25 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 6 .....	57
Figura 26 - Micrografia da chapa 1 furo 3 .....	59
Figura 27 - Micrografia da chapa 2 furo 4 .....	60

Figura 28 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 3 .....	69
Figura 29 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 4 .....	70
Figura 30 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 7 .....	71
Figura 31 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 8 .....	72
Figura 32 - micrografia de um furo da chapa 3.....	74
Figura 33 - micrografia de um furo da chapa 4.....	75
Figura 34 - Macrografias das soldas 5, 6, 7 e 8 .....	85

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensões residuais para a chapa 1 .....	65
Gráfico 2 - Tensões residuais para a chapa 2.....	66
Gráfico 3 - Tensões residuais para a chapa 5.....	67
Gráfico 4 - Tensões residuais para a chapa 6.....	67
Gráfico 5 - Tensões residuais para a chapa 3.....	80
Gráfico 6 - Tensões residuais para a chapa 4.....	81
Gráfico 7 - Tensões residuais para a chapa 7.....	82
Gráfico 8 - Tensões residuais para a chapa 8.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do metal de base .....	36
Tabela 2 - Especificações da resistência mecânica do aço ASTM A131 grau AH36. ....	36
Tabela 3 - Composição química nominal para arames de aço ao C .....	37
Tabela 4 - Parâmetros utilizados para soldagem .....	42
Tabela 5 - Parâmetros da soldagem .....	45
Tabela 6 - Parâmetros do processo da soldagem para as chapas 1, 2, 5 e 6 .....	53
Tabela 7 - Tensões residuais para a chapa 1 (Transversal) .....	61
Tabela 8 - Média das Tensões Residuais, o desvio padrão e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%.....	61
Tabela 9 - Tensões residuais para a chapa 2 (Longitudinal).....	62
Tabela 10 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%.....	62
Tabela 11 - Tensões residuais para a chapa 5 (Longitudinal).....	63
Tabela 12 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%.....	63
Tabela 13 - Tensões residuais para a chapa 6 (transversal).....	63
Tabela 14 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%.....	64
Tabela 15 - Tensões residuais para as chapas 1, 2, 5 e 6.....	68
Tabela 16 - Parâmetros do processo da soldagem para as chapas 3, 4, 7 e 8 .....	68
Tabela 17 - Tensões residuais para a chapa 3 (Longitudinal).....	76
Tabela 18 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%.....	76
Tabela 19 - Tensões residuais para a chapa 4 (Transversal) .....	77
Tabela 20 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%.....	77
Tabela 21 - Tensões residuais para a chapa 7 (Transversal) .....	78
Tabela 22 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%.....	78
Tabela 23 - Tensões residuais para a chapa 8 (Longitudinal).....	78

Tabela 24 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%.....	79
Tabela 25 - Tensões residuais para a chapas 3, 4, 7 e 8.....	83
Tabela 26 - Comparação das tensões residuais com o aporte térmico.....	84
Tabela 27 - Comparação das tensões residuais com o aporte térmico.....	84
Tabela 28 - Comparação das tensões residuais .....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DPC	Deslocamento de Pontos Coordenados
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
PWHT	Post Weld Heat Treatment
SI	Sistema internacional
TR	Tensões Residuais
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
ZTA	Zona termicamente afetada

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade
A	Corrente	[A]
Al	Alumínio	
Ar	Argônio	
C	Carbono	
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>
Cr	Cromo	
Cu	Cobre	
d	Distância interplanar	[Å]
d <sub>0</sub>	Distância interplanar quando o material policristalino está livre de tensões	[Å]
d <sub>φψ</sub>	Distância interplanar em função dos ângulos φ e ψ	[Å]
E	Módulo da elasticidade ou módulo de Young	[GPa]
(hkl)	Índices de Miller para um plano	
Mn	Manganês	
Mo	Molibdênio	
n	Número inteiro representando a ordem de difração	adimensional
Nb	Nióbio	
Ni	Níquel	
P	Fósforo	
Q	Aporte térmico	[J/mm]
S	Enxofre	
Si	Silício	
Ti	Titânio	
v	Velocidade de soldagem	[mm/s]
V	Tensão	[V]
V	Vanádio	
ε	Deformação específica	adimensional
ε <sub>φψ</sub>	Deformação específica em função dos ângulos φ e ψ	adimensional

$\eta$	Eficiência	adimensional
$\theta$	Ângulo de incidência	[°]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	adimensional
$\lambda$	Comprimento da onda	[Å]
$\sigma$	Tensão residual	[MPa]
$\varphi$	Ângulo de incidência	[°]
$\psi$	Ângulo de incidência	[°]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	20
1.2	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS.....	21
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1	SOLDAGEM .....	22
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW .....	23
2.3	TENSÕES RESIDUAIS .....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Tensão residual na soldagem .....</b>	<b>25</b>
2.3.1.1	Classificação das tensões residuais na soldagem .....	25
2.3.1.2	Perfil das tensões residuais em juntas soldadas .....	26
2.3.1.2.1	<i>Perfil das tensões residuais longitudinais.....</i>	<i>26</i>
2.4	ANISOTROPIA.....	28
2.5	EFEITO BAUSCHINGER .....	28
<b>2.5.1</b>	<b>Tensão de Recuo.....</b>	<b>29</b>
2.6	TÉCNICAS DE MENSURAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	29
<b>2.6.1</b>	<b>Técnica do furo cego .....</b>	<b>30</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Técnica da difração de raios-X.....</b>	<b>30</b>
2.6.2.1	Inferência das tensões residuais pela técnica $\text{seno}^2\psi$ .....	30
2.7	TRATAMENTO TÉRMICO PARA ALÍVIO DE TENSÕES (TTAT).....	33
2.8	DESLOCAMENTO DOS PONTOS COORDENADOS .....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
3.1	MATERIAIS (METAL DE BASE, CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM, EQUIPAMENTOS) .....	36
<b>3.1.1</b>	<b>Metal de base.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Consumíveis de Soldagem.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Equipamentos.....</b>	<b>37</b>
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	38
<b>3.2.1</b>	<b>Determinação dos parâmetros ideais para soldagem.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Estudo como a anisotropia do material afeta nas tensões residuais .....</b>	<b>38</b>

3.2.2.1	Determinação da direção da laminação .....	40
3.2.2.2	Soldagem dos corpos de prova .....	40
3.2.2.3	Usinagem dos furos.....	42
3.2.2.4	Mapeamento dos furos e o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões ...	44
3.2.2.5	Cálculo das tensões residuais .....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
4.1	ESTUDO PRÉVIO PARA LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS IDEAIS PARA SOLDAGEM .....	45
4.2	DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DA LAMINAÇÃO .....	52
4.3	DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS, PELO MÉTODO DPC, CONSIDERANDO-SE A ANISOTROPIA DO MATERIAL .....	52
<b>4.3.1</b>	<b>Tensões Residuais das Chapas 1, 2, 5 e 6. ....</b>	<b>53</b>
4.3.1.1	Análise dos valores obtidos a partir do mapeamento na Máquina de Medições de Coordenadas.....	53
4.3.1.2	Cálculo das Tensões Residuais para a chapas 1, 2, 5 e 6.....	58
<b>4.3.2</b>	<b>Tensões Residuais das Chapas 3, 4, 7 e 8 .....</b>	<b>68</b>
4.3.2.1	Análise dos valores de x e y obtidos a partir do mapeamento na Máquina de Medições de Coordenadas.....	68
4.3.2.2	Cálculo das Tensões Residuais para as chapas 3, 4, 7 e 8.....	73
<b>4.3.3</b>	<b>Macrografias das Soldas .....</b>	<b>84</b>
4.4	COMPARAÇÃO DOS VALORES DAS TENSÕES RESIDUAIS OBTIDAS PELA TÉCNICA DA DIFRAÇÃO DOS RAIOS-X COM O DPC .....	85
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo mais utilizado na atualidade quando se trata de união de materiais, sobretudo nos materiais metálicos, tanto na fabricação, quanto na recuperação de peças, equipamentos e estruturas (Masubuchi, 1980)

O amplo emprego da soldagem em diversas indústrias tais como na naval, aeronáutica, aeroespacial, entre outras, deve-se à inúmeras vantagens tais como, alta produtividade, baixo custo, entre outras qualidades (Masubuchi, 1980; Gery et al., 2005)

De acordo com o desenvolvimento de novos materiais e estruturas mais complexas, inúmeros processos de soldagem vêm sendo criados, cada qual com suas peculiaridades da qual resultam em diversas definições da soldagem na literatura.

No presente trabalho será adotada a definição da AWS acrônimo de “American Welding Society”, a qual define a soldagem como: “Processo de união de materiais utilizado para obter a coalescência (união) localizada de metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição” (A.W.S., 1994)

Apesar de ser uma técnica amplamente utilizada, existem inúmeros problemas associados, sendo um dos mais sobrepujantes o das tensões residuais, tema da presente pesquisa. O qual é definida como a tensão que após a manufatura ou processamento, permanece mesmo na ausência de carregamento externo, seja ela de natureza térmica ou mecânica (Withers, P. and Bhadeshia, 2001).

Atualmente, a importância do estudo das tensões residuais está muito mais relacionada à confiabilidade estrutural, ou seja, nas exatidões dimensionais e a estabilidade dos produtos acabados, reduzindo ao máximo à deformação induzida na estrutura devido às tensões residuais (Feng, 2005).

Além disto, os projetos que utilizam a técnica da soldagem devem levar em conta questões relativas à segurança, isto é, as tensões residuais resultantes do processo de soldagem, pode levar a uma fratura frágil no local da união por soldagem, ou ainda, acentuar a fadiga do material devido tensões dinâmicas.

Assim, a tensão residual é um tema que deve ser tratado e considerado desde o projeto, fabricação até a sua vida útil. Durante a etapa do projeto é

importante o conhecimento das propriedades do metal de base, pois as propriedades mecânicas das juntas soldadas podem estar correlacionadas com as propriedades conferidas do processo de conformação, acrescentando que a região do metal de base que perde as propriedades mecânicas iniciais é conhecida como a zona termicamente afetada (ZTA) (Kasuya *et al.*, 1995; Xue *et al.*, 2012; Esposito, 2016).

A abordagem para a compreensão das tensões residuais é encontrada desde a década de 30, por modelos preditivos, experimentos paramétricos ou por modelos empíricos.

Desde então, diversas técnicas para mensuração foram desenvolvidas, sendo as mais clássicas e aceitas pela comunidade científica, a difração de raios-x (Cullity and Stock, 2001; Hashimoto *et al.*, 2011; Noyan and Cohen, 2013; Tsuji *et al.*, 2015), difração de raios-x sincrotron (Mach *et al.*, 2017; Smith *et al.*, 2018), difração de nêutrons (Webster and Ezeilo, 2001; Fitzpatrick and Lodini, 2003), ultrassom (Qozam *et al.*, 2010; Javadi *et al.*, 2015), furo cego (Sandifer and Bowie, 1978; A.S.T.M., 2013; R. Chakrabarti, 2018), Ruído Magnético Barkhausen (Vourna *et al.*, 2015), ESPI – “Electronic Speckle Pattern Interferometry” ou interferometria a laser (Ignatiev *et al.*, 2016; Kim and Jung, 2016), cada qual com suas vantagens e desvantagens.

Nesta pesquisa em particular, é utilizada um novo método para inferir tensões residuais em juntas soldadas que está sendo desenvolvida pelo Laboratório de Termometria e Simulações Termomecânicas, do departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco, denominada de Deslocamento de Pontos Coordenados ou DPC (Siqueira Filho *et al.*, 2013), que é fundamentada da teoria da relaxação mecânica. O principal objetivo do presente trabalho de pesquisa é a avaliação das tensões residuais em juntas soldadas considerando-se a anisotropia do material.

A partir dos experimentos, foi verificada como a anisotropia do metal de base influência nas tensões residuais, isto é, nas chapas cuja direção da laminação foi longitudinal em relação ao cordão de solda, a tensão residual longitudinal foi menor que a tensão residual transversal, e vice-versa para a chapas cuja direção da laminação foi transversal em relação ao cordão de solda.

Assim como, foi verificado como o aporte térmico influencia significativamente nos valores das tensões residuais, ou seja, o maior aporte térmico intensifica a plastificação aumentando o encruamento elevando os valores das tensões residuais.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As tensões residuais são as principais causas das distorções e deformações das estruturas unidas pelo processo da soldagem, bem como podem causar a fadiga do material resultando em uma falha mecânica. Assim, é de fundamental importância o seu estudo para minimização das distorções, bem como é necessário para o cálculo da estimativa do tempo de vida útil do material.

Antes de mais nada, para o estudo e/ou conhecimento acerca das tensões residuais é necessária a aquisição de um equipamento para a mensuração da tensão residual, ou ainda, como está sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa, a concepção de uma nova técnica para a mensuração das tensões residuais em juntas soldadas (Qian *et al.*, 2013)

No caso em particular, o método utiliza um equipamento usualmente encontrado em ambientes dentro da academia e na indústria. No presente trabalho foi utilizada uma máquina de medição de coordenadas, na qual foram mensurados os deslocamentos dos pontos coordenados, e a partir destes as tensões residuais foram inferidas.

O desenvolvimento desta metodologia, cuja maior vantagem encontra-se no baixo custo da mensuração das tensões residuais, o qual proporciona o estudo das tensões residuais em juntas soldadas dentro da academia, assim como, possibilita o estudo da minimização das mesmas, o qual resulta na melhoria das propriedades, que poderiam resultar em uma fratura frágil no local da união, ou da corrosão devidas às tensões residuais (Mochizuki, 2007)

Aliado à afirmação do parágrafo anterior, enfatiza-se a retomada da indústria naval no Brasil, sobretudo no estado de Pernambuco, cujo desenvolvimento da metodologia e por conseguinte o estudo acerca das tensões residuais tem como objetivo a contribuição na formação do capital humano.

## 1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Nesta seção são apresentados os principais objetivos deste trabalho de pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar as tensões residuais em juntas soldadas considerando-se a anisotropia do material.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar a direção de laminação da chapa pela análise metalográfica.
- b) Soldar os corpos de prova, considerando-se as direções longitudinal e transversal à laminação.
- c) Marcar pontos lateralmente ao cordão de solda e mapear os mesmos numa máquina de medição de coordenadas.
- d) Realizar tratamento térmico para o alívio das tensões residuais, em temperatura inferior à temperatura de recristalização.
- e) Calcular os deslocamentos dos pontos previamente mapeados na máquina de medição de coordenadas.
- f) A partir dos deslocamentos, calcular as deformações e a partir destas calcular as tensões considerando-se a condição do estado plano.
- g) Avaliar a partir dos valores inferidos como a anisotropia afeta nos valores das tensões residuais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentado o fundamento teórico, ou seja, a análise ampla das publicações correntes acerca das tensões residuais em juntas soldadas.

### 2.1 SOLDAGEM

Os primeiros passos para o desenvolvimento na união de materiais são historicamente encontrados desde 3000 A.C. utilizando-se ligas de cobre e ouro ou chumbo e estanho, contudo as fontes de calor necessária para a fusão eram insuficientes. Assim, o processo em si foi melhor definido como brasagem ou soldagem por forjamento (Masubuchi, 1980)

Desde então, o maior avanço na tecnologia da soldagem deve-se a energia elétrica tornar comercialmente disponível no final do século 19, proporcionando a invenção do processo da soldagem utilizando o arco elétrico (Masubuchi, 1980)

Processos de soldagem por arco elétrico ainda que de forma incipiente, já eram empregados desde a primeira guerra mundial na indústria naval.

Contudo, com a segunda guerra mundial, ocorre a drástica mudança no processo de união por rebites. A enorme demanda para construção de navios em larga escala, e em menor tempo, forçou a modificação no processo de fabricação. A união por rebites foi substituída pela união por soldagem a arco elétrico (Masubuchi, 1980)

Além da maior produtividade em comparação da união por rebites, o processo da soldagem possibilita a redução do peso das estruturas fabricadas, união sem limitação da espessura, fabricação de estruturas mais complexas que não eram possíveis ser realizadas por rebites, além da estanqueidade.

Apesar da superior qualidade da união comparada com o processo por rebites, a soldagem pode apresentar problemas que conduzam a uma fratura, devido aos defeitos como trincas, porosidade, inclusão de escória.

Além dos problemas acima citados, a soldagem desenvolve as tensões residuais que pode ser a causa de uma fratura frágil, assim como produzem distorções que tem como consequência a não conformidade estrutural, e/ou promover a corrosão a partir de trincas cuja reação é favorecida devido à presença das tensões residuais (Mochizuki, 2007; Kim *et al.*, 2015).



que proporciona a atmosfera protetora na região que se está sendo soldada, e o gás ativo comumente o CO<sub>2</sub>.

O processo faz uso do metal de adição, ou denominado de arame eletrodo, cujo nome deve-se a função de ser também o condutor de eletricidade, para a formação do arco elétrico, entre a ponta do arame eletrodo e o metal base, o mesmo se funde pelo efeito Joule, e pela dissociação do gás ativo, cuja reação é exotérmica.

A fusão do arame eletrodo impõe que este seja alimentado continuamente para a estabilidade do arco elétrico, que por sua vez, determina o que se denomina taxa de deposição.

O metal fundido, forma o que se denomina poça de fusão, para evitar que este seja contaminado com a atmosfera, com prejuízo nas propriedades mecânicas da junta soldada, é utilizado um gás inerte. O gás além da sua principal função, ou seja, protetora, proporciona a estabilidade do arco elétrico, uma vez que a ionização do gás inerte torna o mesmo condutor de eletricidade, ao se encontrar no quarto estado da matéria, denominado de plasma.

O processo de soldagem GMAW caracteriza-se pela soldagem por fusão, onde o calor gerado pelo arco elétrico pode ser avaliado pela seguinte expressão:

$$\text{Aporte térmico (Q)} = \frac{\eta V i}{v} \quad (1)$$

Na equação do aporte térmico, cuja unidade no SI é [J/mm],  $\eta$  a eficiência,  $V$  tensão no arco [V],  $i$  a corrente [A] e  $v$  a velocidade de soldagem dado por mm/s.

O aporte térmico deve ser adequado, ou seja, velocidade de soldagem, corrente e a tensão são parâmetros que devem ser adequados para a formação de um bom cordão de solda e uma boa diluição do metal de adição.

### 2.3 TENSÕES RESIDUAIS

A tensão residual é aquela que permanece mesmo depois de removidas todas as solicitações externas.

As tensões residuais podem ser benéficas, assim são induzidas propositalmente para melhorar alguma característica no material, ou prejudiciais como no processo da soldagem.

As tensões residuais são observadas em diferentes processos térmicos ou mecânicos, tais como, fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, têmpera.

### **2.3.1 Tensão residual na soldagem**

O aquecimento localizado e a não uniformidade da taxa de resfriamento durante o processo da soldagem tem como consequência a deformação plástica não uniforme, resultando numa complexa distribuição da tensão na região da junta soldada, que permanece mesmo após a ausência de qualquer tensão externa, seja ela térmica ou mecânica (Withers, P. and Bhadeshia, 2001)

Como consequência a tensão residual impacta na confiabilidade estrutural e dimensional de estruturas soldadas, ou seja, as tensões residuais induzidas pelo processo da soldagem podem resultar em fraturas frágeis, fissuras de corrosão sob tensão, o qual abrevia a vida útil da estrutura, assim é imprescindível tratar a mesma de forma apropriada desde o projeto, fabricação, até toda vida útil das estruturas.

No caso da não confiabilidade dimensional também conhecida como distorções, esta, pode se tornar um sério problema particularmente na fabricação de estruturas construídas de forma modular e montadas por partes como na indústria naval, distorções excessivas dos componentes fabricados pelo processo da soldagem frequentemente causam o desalinhamento da estrutura, cuja remediação eleva consideravelmente os custos da fabricação (Xue *et al.*, 2012).

Isto posto, é de fundamental importância ter o conhecimento das tensões residuais, o qual permite quantificar numericamente as distorções, avaliar o tempo de vida útil do material, assim como, a minimização das mesmas melhorando as propriedades do material e aumentando bem como na melhoria da confiabilidade dimensional.

#### **2.3.1.1 Classificação das tensões residuais na soldagem**

As origens das tensões residuais resultantes do processo da soldagem podem ser divididas em tensões residuais a nível macroscópico, sub microscópico ou microscópico.

No primeiro caso, ou seja, as tensões residuais a nível macroscópico estão relacionadas com a plastificação do material, na qual é verificada em relativa larga abrangência (Withers, P. J. and Bhadeshia, 2001).

Assim como, é caracterizado pela alteração da natureza das tensões residuais em toda sua abrangência, em outras palavras, as tensões residuais variam de trativas à compressivas dependendo da localização de interesse na região da junta soldada, o qual está relacionado com o mecanismo do desenvolvimento das tensões residuais, sendo a tensão residual de natureza tratativa próximo à superfície deletéria enquanto a tensão residual de natureza compressiva próximo à superfície benéfica, em relação ao tempo para a fadiga do material (Webster and Ezeilo, 2001).

Enquanto as tensões residuais sub microscópicas e microscópicas são devidas as tensões devidas às discordâncias nos contornos dos grãos, assim como, são devidas a transformação de fase, especificamente as transformações martensíticas que ocorrem a relativa baixa temperatura, na qual se desenvolve tensões residuais tanto na poça de fusão quanto na zona termicamente afetada devido à expansão de volume, cuja magnitude depende da fração da martensita formada (Tsuji *et al.*, 2015).

Contudo, apesar de mencionada na literatura como uma causa das tensões residuais, para aços com baixo teor de carbono, o desenvolvimento das tensões residuais devido a mudança de fase possui uma contribuição insignificante (Deng, 2009)

#### 2.3.1.2 Perfil das tensões residuais em juntas soldadas

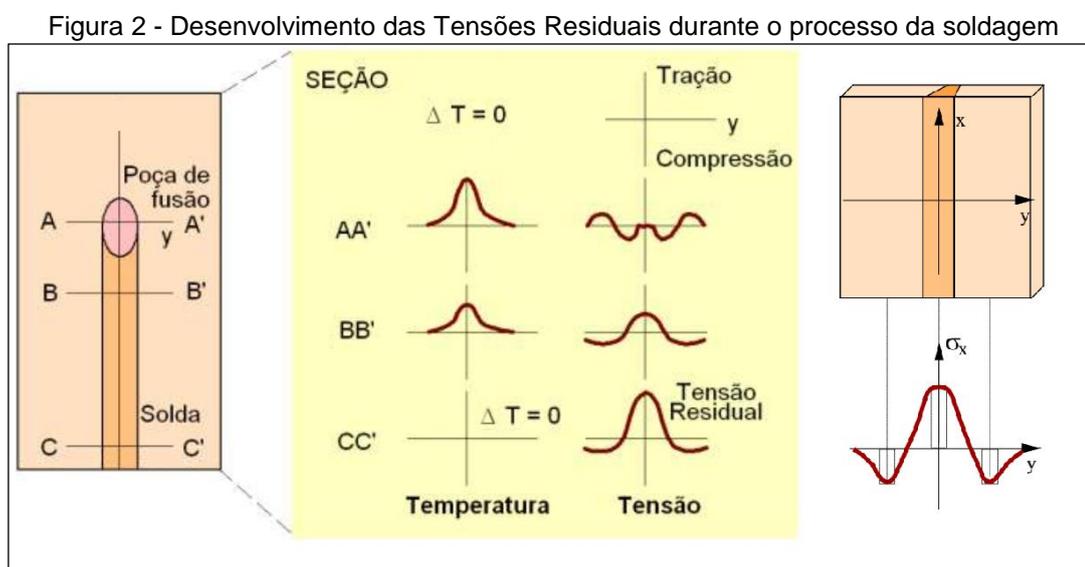
As tensões residuais decorrentes do processo da soldagem possuem um perfil característico o qual dependem das propriedades do material, da existência ou não de tensões residuais antes da soldagem decorrente à manufatura e/ou fabricação, da geometria da junta soldada, do processo de soldagem, e sobretudo dos mecanismos da transferência de calor.

##### 2.3.1.2.1 Perfil das tensões residuais longitudinais

Na solda de topo, a figura 2 demonstra o desenvolvimento e o perfil das tensões residuais longitudinais devido ao processo da soldagem. No início com a formação da poça de fusão quando o metal de adição alcança a sua maior

temperatura, o material tende a expandir, porém é restringida pelo metal de base, gerando tensões de compressão próxima a poça de fusão e tensões trativas em pontos mais afastados (seção AA')

Com o resfriamento da poça de fusão o material se contrai concomitante inicia o desenvolvimento das tensões de natureza trativa na poça de fusão e tensões compressivas na região da zona termicamente afetada (seção BB'). Valores que alcançam os seus máximos e mínimos quando é atingida a temperatura ambiente (seção CC')



Fonte: (Marques *et al.*, 2005) adaptado.

Entretanto a distribuição das tensões residuais não obedecem exatamente ao perfil referido anteriormente, de acordo com (Radaj, 1992; Nasir *et al.*, 2006; Leggatt, 2008) a distribuição das tensões residuais dependem das propriedades do material, da existência ou não de tensões residuais antes da soldagem decorrente à manufatura e/ou fabricação, da geometria da junta soldada, do processo de soldagem, do tratamento pós soldagem, e das condições em serviço durante a vida útil.

O quadro 1 demonstra estudos realizados por inúmeros autores exemplificando a divergência do perfil das tensões residuais na região da junta soldada, cuja razão encontra-se nos fatores anteriormente mencionados.

Quadro 1 - Distribuição da Tensão Residual

Autor	Tensão residual tratativa	Tensão residual compressiva
(Rossini <i>et al.</i> , 2012)	Poça de fusão	Zona termicamente afetada
(Ju <i>et al.</i> , 2003)	Centro da poça de fusão	Zona termicamente afetada
(Paddea <i>et al.</i> , 2012)	Zona Termicamente Afetada	Poça de fusão
(Vemanaboina <i>et al.</i> , 2014)	Na poça de fusão e na zona termicamente afetada	Metal de base e no cordão de solda
(Bussu and Irving, 2003)	Zona Termicamente Afetada	Zona termicamente afetada e no cordão de solda
(Pouget and Reynolds, 2008)	Zona Termicamente Afetada	Cordão de solda

Fonte: (Nasir *et al.*, 2006).

## 2.4 ANISOTROPIA

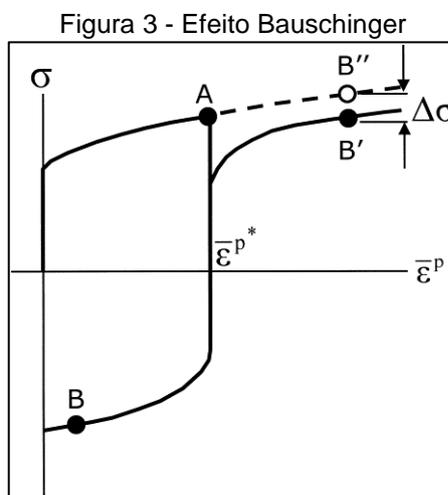
A anisotropia refere-se quando alguma propriedade física difere função da direção. A anisotropia é observada em diferentes classes de materiais. No caso dos metais, que possuem estrutura cristalina, a anisotropia está associada à distância interatômica em função de uma dada direção cristalográfica (Callister and Rethwisch, 2013)

Considerando um metal monocristalino dependendo da direção cristalográfica, por exemplo, o módulo de elasticidade pode ter valores diferentes. Já em metais policristalinos, compostos de inúmeros cristais ou grãos cada qual com direções cristalográficas aleatórias, o valor medido de uma propriedade é dado pela média dos valores em uma dada direção, quando esta média possui um valor em função de uma dada direção cristalográfica preferencial é dito que o material possui textura.

## 2.5 EFEITO BAUSCHINGER

Quando metais policristalinos são submetidos a carregamentos cíclicos alternados e subsequentes de tração e compressão, verifica-se que a redução no módulo da elasticidade, comportamento este conhecido como efeito de Bauschinger (Miller *et al.*, 1999; Chun *et al.*, 2002; Yoshida and Uemori, 2002; Hu *et al.*, 2016; Dowling, 2017; Mamun *et al.*, 2017), cuja causa se encontra no movimento das discordâncias e adições de embarreamento (Mamun *et al.*, 2017).

A figura 3 demonstra a redução no módulo da elasticidade  $\Delta\sigma$  devido aos carregamentos cíclicos.



Fonte: (Chun *et al.*, 2002)

### 2.5.1 Tensão de Recuo

O efeito Bauschinger caracterizado pelo ciclo alternado subsequente, tem como consequência a diminuição no módulo de elasticidade, cuja propriedade é função de uma dada direção devido as características do material, e sua amplitude dependente da característica dos ciclos de endurecimento.

A razão pela qual se observa a diminuição no módulo da elasticidade em amplitudes diferentes e em função da direção, deve-se a tensão de recuo, que se trata de uma recuperação parcial, um amolecimento permanente, cuja causa deve-se ao metal possuir textura, em outras palavras, durante a deformação reversa a inicial ocorre a dissolução de discordâncias concomitantemente a formação de novas discordâncias (Hasegawa *et al.*, 1975; Christodoulou *et al.*, 1986)

## 2.6 TÉCNICAS DE MENSURAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Das inúmeras metodologias para mensuração das tensões residuais em juntas soldadas, duas delas se destacam por serem as mais amplamente empregadas, sendo elas o método do furo cego e a da difração de raios-X (Zhao *et al.*, 2018)

### 2.6.1 Técnica do furo cego

A metodologia do furo cego, normatizada pela ASTM norma E837-13a, “Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method” (A.S.T.M., 2013), infere as tensões residuais no estado plano considerando o módulo de elasticidade do material isotrópico.

Nesta técnica, é feito um furo onde se deseja inferir as tensões residuais, na qual é posto um extensômetro o qual irá mensurar as deformações, a partir destas são inferidas as tensões residuais a partir de equações que se encontram na norma da ASTM norma E837-13a (A.S.T.M., 2013).

### 2.6.2 Técnica da difração de raios-X

A técnica da difração de raios-X, baseia na deformação a nível microscópico, em outras palavras, na alteração da distância interplanar que ocorre devido as tensões residuais.

Assim como, as tensões residuais são inferidas a partir das deformações que o material experimenta, os princípios na qual se baseia a metodologia da difração dos raios-X são os mesmos do furo cego, em outras palavras, seria como se fosse utilizado um pequeno extensômetro.

Para inferir as tensões residuais várias técnicas experimentais utilizando a difração de raios-X foram desenvolvidas, sendo elas (Kandil *et al.*, 2001):

- Exposição dupla ou técnica de dois ângulos (DET – “Double Exposure Technique”)
- Método dos feixes paralelos
- Método do  $\text{seno}^2\psi$
- Método do  $(\text{seno}^2\psi - 2\theta)$  (Narayanan *et al.*, 2017)

#### 2.6.2.1 Inferência das tensões residuais pela técnica $\text{seno}^2\psi$

Das várias técnicas a do  $\text{seno}^2\psi$  é uma das mais empregadas para inferir as tensões residuais.

O princípio para determinação das tensões residuais pela técnica da difração dos raios-X baseia-se na interação dos raios-X incidentes, no espaçamento interplanar, o qual é determinada pela lei de Bragg, segundo a equação 2.

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

Sendo,  $\lambda$  o comprimento de onda incidente,  $d$  o espaçamento interplanar e  $\theta$  o ângulo da onda incidente com o plano.

Quando os raios-X cujo ângulo incidente está em função com os ângulos  $\phi$  e  $\psi$  interage com um material policristalino que está sob tensões, ocorre a alteração na distância interplanar “ $d_{\phi\psi}$ ” em um determinado plano (hkl).

Considerando-se “ $d_0$ ” a distância interplanar no mesmo plano (hkl) quando o material policristalino está livre de tensões. A partir dos valores de  $d_0$ ,  $d_{\phi\psi}$  a deformação  $\varepsilon$  é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (3)$$

Sendo,  $\varepsilon_{\phi\psi}$  a deformação específica em função dos ângulos  $\phi$  e  $\psi$ ,  $d_{\phi\psi}$  a distância interplanar do material sob tensão residual em função dos ângulos  $\phi$  e  $\psi$ , e  $d_0$  a distância interplanar quando o material policristalino está livre de tensões

Considerando a teoria da elasticidade, aplicando a lei de Hooke para materiais, temos a equação 4, a seguir:

$$\sigma_{33} = \varepsilon_{33} E \quad (4)$$

Sendo, “ $\sigma$ ” a tensão, “ $\varepsilon$ ” a deformação específica, e “ $E$ ” o módulo da elasticidade ou módulo de Young.

Alterando o sistema de coordenadas, do sistema tridimensional L para o sistema S, ver figura 4, obtemos a seguinte expressão para a deformação específica:

$$\varepsilon'_{33} = \varepsilon_{11} \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{12} \sin 2\phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{22} \sin^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{33} \cos^2 \psi + \varepsilon_{12} \cos \phi \sin 2\psi + \varepsilon_{23} \sin \phi \sin 2\psi \quad (5)$$

Sendo:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})]$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})]$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{1}{E} [\sigma_{33} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})]$$

$$\varepsilon_{23} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{23}$$

$$\varepsilon_{31} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{31}$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{12}$$

Substituindo as expressões acima na equação 5, temos a equação 6 da deformação em função das tensões:

$$\varepsilon'_{33} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{13} \cos \phi - \sigma_{23} \sin \phi) \sin 2\psi \quad (6)$$

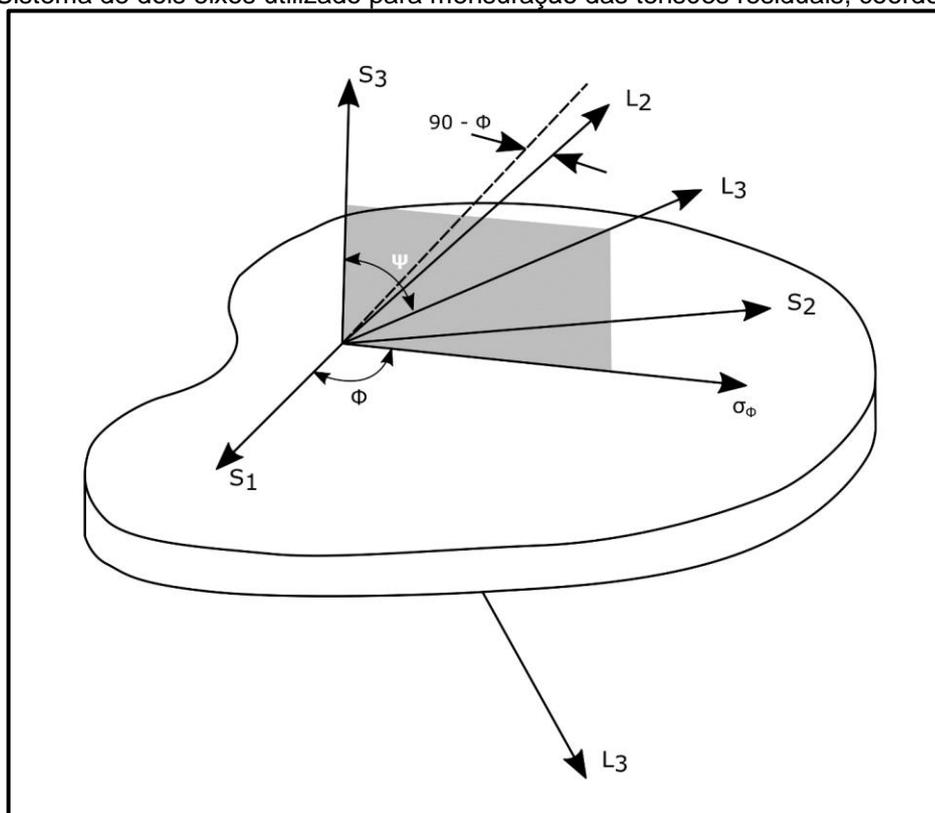
Sabendo que as tensões cisalhantes são nulas e considerando o caso uniaxial, a equação 6 é simplificada para a seguinte equação:

$$\sigma = \frac{E}{(1+\nu) \sin^2 \psi} \varepsilon'_{33} \quad (7)$$

Ou

$$\sigma = \frac{E}{(1+\nu) \sin^2 \psi} \left( \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \right) \quad (8)$$

Figura 4 - Sistema de dois eixos utilizado para mensuração das tensões residuais, coordenadas S e L



Fonte:(Cullity and Stock, 2001).

Das equações 6 e 7 verifica-se que a metodologia dispensa o conhecimento prévio do material isento de tensões, o qual permite a metodologia ser não destrutiva (Cullity and Stock, 2001).

## 2.7 TRATAMENTO TÉRMICO PARA ALÍVIO DE TENSÕES (TTAT)

O tratamento térmico para o alívio das tensões residuais (TTAT) realizado após o processo da soldagem, conhecido também como “Post Weld Heat Treatment” (PWHT), tem como objetivo alterar as propriedades do cordão de solda e sobretudo da zona termicamente afetada que devido à diferentes taxas de resfriamento apresentam regiões micro estruturalmente diferentes, além de ser considerado a área mais provável para o início do surgimento das trincas, o qual pode resultar no abreviamento do tempo de vida útil do material ou em uma fratura frágil (Missori *et al.*, 2015).

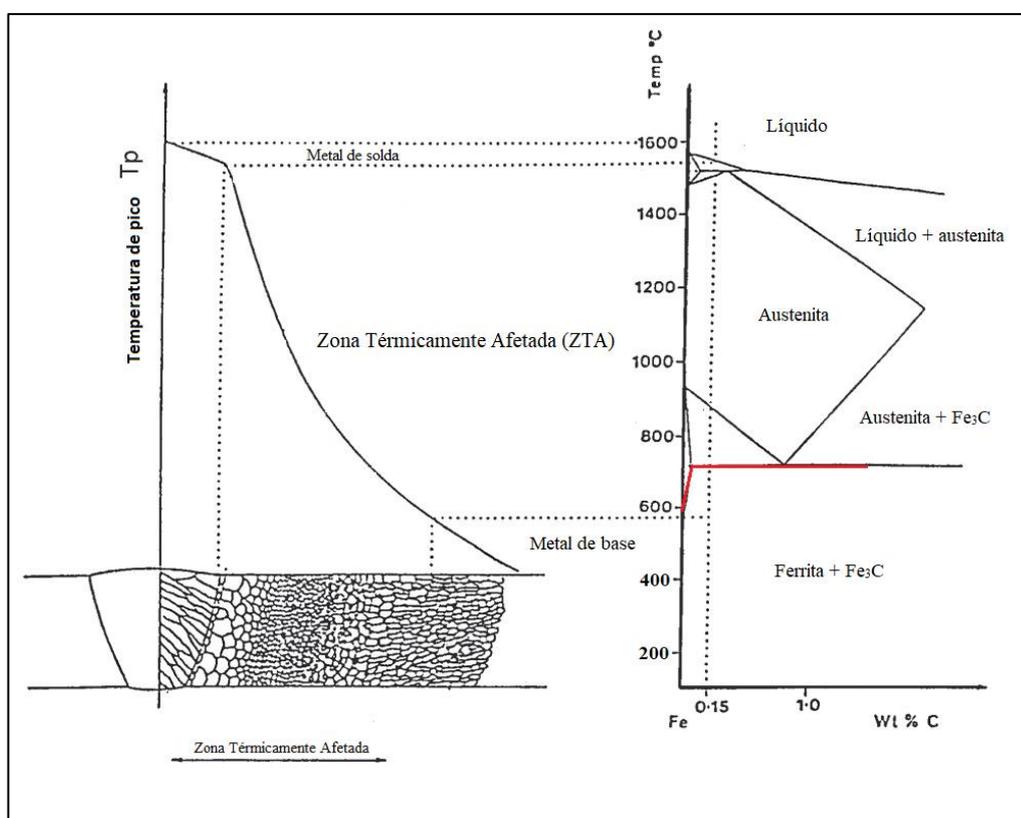
Assim, para promover alterações a fim de melhorar as propriedades do material, a primeira etapa necessária para realizar o TTAT é o estudo e/ou a elaboração do procedimento, cujo objetivo é a diminuição das tensões residuais ao

mínimo possível, o qual também resultam no aumento da tenacidade e na dessorção do hidrogênio adsorvido durante a soldagem.

Para tal é necessário considerar os seguintes fatores:

- a) O estabelecimento da temperatura na qual as tensões residuais sejam aliviadas, na qual devem ser menores que a temperatura de recristalização. A figura seguinte refere-se a um aço de baixa liga, a linha de cor vermelha representa o limite máximo para a temperatura do TTAT.

Figura 5 - Temperatura para o TTAT



Fonte: (Srivastava *et al.*, 2010) Adaptado.

- b) Considerar as propriedades do metal de base e do metal de adição.  
 c) Levar em conta a espessura.  
 d) O tempo (duração) do tratamento térmico  
 e) A rampa de aquecimento, assim como a de resfriamento.

## 2.8 DESLOCAMENTO DOS PONTOS COORDENADOS

A metodologia dos Deslocamentos dos Pontos Coordenados é uma alternativa à metodologia do furo cego. A metodologia infere as tensões residuais a partir da variação ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) dos pontos coordenados obtidos pelo mapeamento dos furos cegos de 2 mm de diâmetro por 2 mm de profundidade em uma máquina de medição de coordenadas, cuja variação ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) é obtida a partir dos deslocamentos dos pontos, mapeados duas vezes, antes e depois do tratamento térmico para o alívio de tensões (TTAT).

A partir dos deslocamentos acima referidos calcula-se as deformações obtidas pela equação 9:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (9)$$

A partir dos valores da deformação, são obtidas as tensões residuais no estado plano pelas seguintes equações segundo (Okumura and Taniguchi, 1982):

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (10)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (11)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e o procedimento experimental considerando o objetivo da pesquisa, ou seja, a avaliação das tensões residuais em juntas soldadas considerando-se a anisotropia do material.

#### 3.1 MATERIAIS (METAL DE BASE, CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM, EQUIPAMENTOS)

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados e as suas propriedades, bem como, os equipamentos e as suas especificações. O qual estão subdivididos em metal de base, consumíveis de soldagem e equipamentos

##### 3.1.1 Metal de base

O metal de base utilizado no presente estudo é constituído por chapas metálicas do aço ASTM A131 grau AH36, fornecidas com espessura de 12,7 mm pelo estaleiro Atlântico Sul; planta industrial localizada no polo industrial-portuário de Suape – Cabo de Santo Agostinho – PE. A composição química e as propriedades mecânicas do metal de base estão apresentadas na Tabela 1 e Tabela 2 , demonstradas abaixo.

Tabela 1 - Composição química do metal de base

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Al	%Nb	%V	%Ti	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo
<b>0,18</b>	0,50	0,1~0,5	0,035	0,035	0,015	0,02~0,05	0,05~0,1	0,02	0,35	0,2	0,4	0,08

Fonte: (A.S.T.M., 2013)

Tabela 2 - Especificações da resistência mecânica do aço ASTM A131 grau AH36

Limite de Resistência [MPa]	Limite de escoamento mínimo [MPa]	Alongamento [%] chapas de 200mm	Alongamento [%] chapas de 50 mm
<b>490 ~ 620</b>	355	19	22

Fonte: (A.S.T.M., 2013)

##### 3.1.2 Consumíveis de Soldagem

Os consumíveis usados no estudo foram o arame maciço ER70S-6, com diâmetro de 1,2mm e o gás de proteção feito pela mistura comercial Ar-25% CO<sub>2</sub>. A composição química do arame eletrodo está demonstrada Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química nominal para arames de aço ao C

%C	%Mn	%Si	%P	%S
0,06 ~ 0,15	1,40 ~ 1,85	0,80 ~ 1,15	< 0,025	< 0,035

Fonte: (A.W.S., 1994).

### 3.1.3 Equipamentos

A fonte de soldagem utilizada no estudo é específica para o processo GMAW (faixa de corrente 50 ~ 315A, faixa de tensão 17 ~ 35V), sistema de alimentador de arame eletrodo (velocidade de alimentação de 1,5 ~ 19m/min – diâmetro do arame eletrodo: (sólido entre 0,6 ~ 1,2mm)) e um sistema de deslocamento utilizando uma máquina de corte a gás (oxi-corte), cuja velocidade pode ser configurada para valores entre 30~3200 [mm/min]. A montagem para realização da soldagem está demonstrada na figura 6.

Figura 6 - Montagem para soldagem semiautomática das chapas de teste



Fonte: (O Autor, 2017).

## 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi dividido em diferentes etapas, onde foram realizadas:

- a) Estudo prévio para levantamento dos parâmetros ideais para soldagem.
- b) Identificação da direção da laminação das chapas para o estudo das tensões residuais em relação a anisotropia do metal de base.
- c) Soldagem das chapas de teste com os parâmetros de soldagem otimizados para determinação das tensões residuais, pelo método deslocamentos dos pontos coordenados, considerando-se a anisotropia do material.

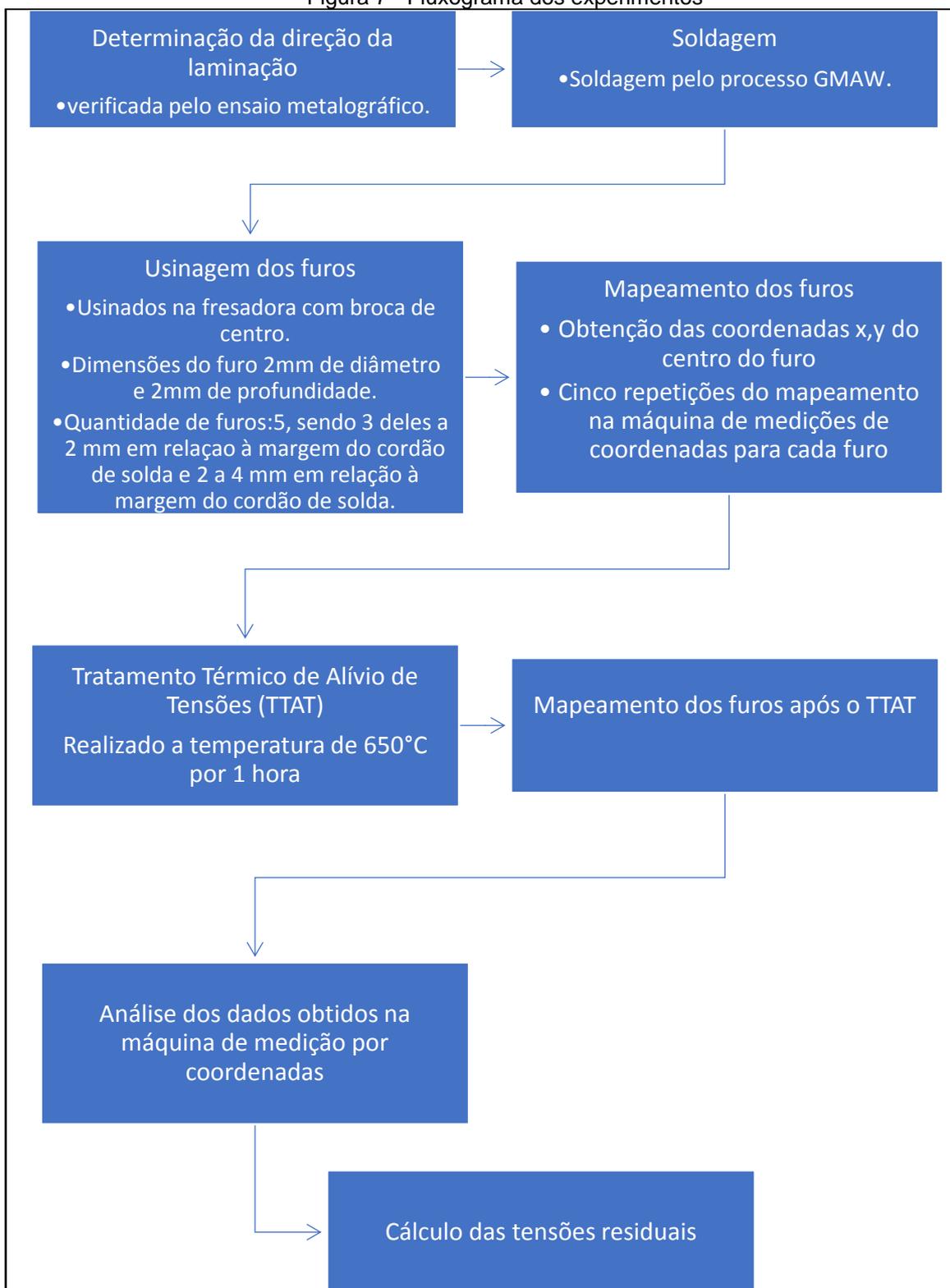
### 3.2.1 Determinação dos parâmetros ideais para soldagem

Para se encontrar os parâmetros ideais para a soldagem GMAW foram escolhidos três valores para correntes baseados no catálogo de especificação do fabricante do arame eletrodo, sendo elas de 120 A, 160 A e 200 A. Complementando, os outros parâmetros para a soldagem foram; corrente contínua, polaridade inversa, modo de transferência curto circuito e a vazão do gás de solda de 20 l/min. A seleção dos melhores parâmetros foi feita de forma qualitativa, baseados em aspectos macroestruturais da junta; sendo analisadas, principalmente, a fusão na interface cordão/ metal de base e a inexistência de descontinuidades nesta região.

### 3.2.2 Estudo como a anisotropia do material afeta nas tensões residuais

A figura 7 mostra o fluxograma dos experimentos para a avaliação das tensões residuais em juntas soldadas considerando-se a anisotropia do material, os quais são apresentados de forma detalhada nas seções seguintes.

Figura 7 - Fluxograma dos experimentos



Fonte: (O Autor, 2017).

### 3.2.2.1 Determinação da direção da laminação

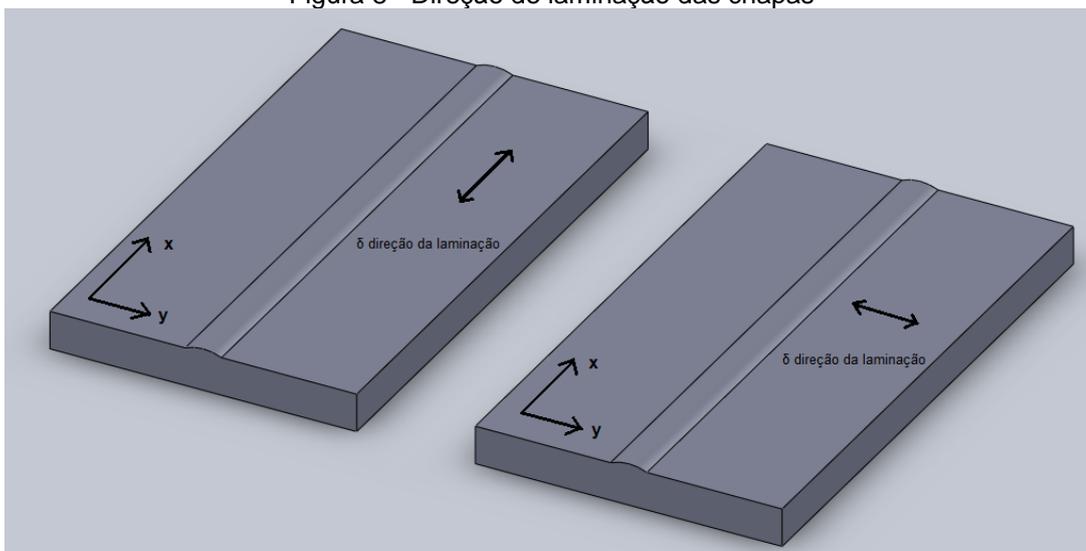
Inicialmente, foram retiradas amostras das chapas na condição de como recebidas para identificação da direção da laminação. As amostras cortadas e embutidas transversalmente em duas direções de modo a possibilitar a visualização da direção de laminação, após procedimento metalográfico.

Depois de cortadas, as peças são embutidas a quente com resina “baquelite” para facilitar o manuseio em etapas subsequentes da preparação metalográfica: lixamento e polimento. Para o lixamento das peças, foram utilizadas as lixas de granulometria 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200. Após o lixamento, as amostras foram submetidas ao polimento com pasta de diamante com granulometria de 1µm executadas com sobre um pano de polimento metalográfico. Tanto o lixamento quanto o polimento foram feitos em politrizes circulares de velocidade variável. Depois de polidas as amostras foram atacadas por 15s com solução de nital a 3% (álcool etílico-3% de ácido nítrico). A caracterização microestrutural para revelar a direção de laminação das chapas foi feita em um microscópio ótico.

### 3.2.2.2 Soldagem dos corpos de prova

Depois de identificado a direção de laminação, as chapas de teste foram cortadas nas dimensões de 180 mm x 50 mm x 12,7 mm, chanfradas em uma de suas bordas com ângulo de bisel de 25°. Foram feitas chapas de testes para soldagem nos dois sentidos da laminação, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Direção de laminação das chapas



Fonte: (O Autor, 2017).

As chapas são soldadas pelo processo GMAW. A figura 9 apresenta o aparato para soldagens simultâneas das chapas da direção transversal e longitudinal. Ou seja, a soldagem é realizada de tal forma que cada passe pudesse soldar ambas chapas, sendo uma das quais disposta com o cordão de solda na direção longitudinal em relação a direção da laminação e a outra com o cordão de solda na direção transversal em relação a direção da laminação, a fim de assegurar o mesmo aporte térmico em ambas chapas viabilizando a análise das tensões residuais considerando a anisotropia do material.

Figura 9 - Aparato para soldagem simultânea das chapas da direção transversal e longitudinal



Fonte: (O autor, 2017)

Para assegurar-se a manutenção do aporte térmico a cada passe, foi elaborado um gabarito que mantivesse a altura entre o bocal da tocha e a poça de fusão. Além das condições impostas acima, a cada passe o sentido de soldagem foi alternado, pois, segundo estudos anteriores do grupo de pesquisa, a alternância ou o mantimento no sentido da soldagem afetam no resultado da tensão residual (Gonçalves, 2015).

Na seguinte tabela estão sumarizados os parâmetros utilizados para a soldagem das diferentes chapas de teste.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para soldagem

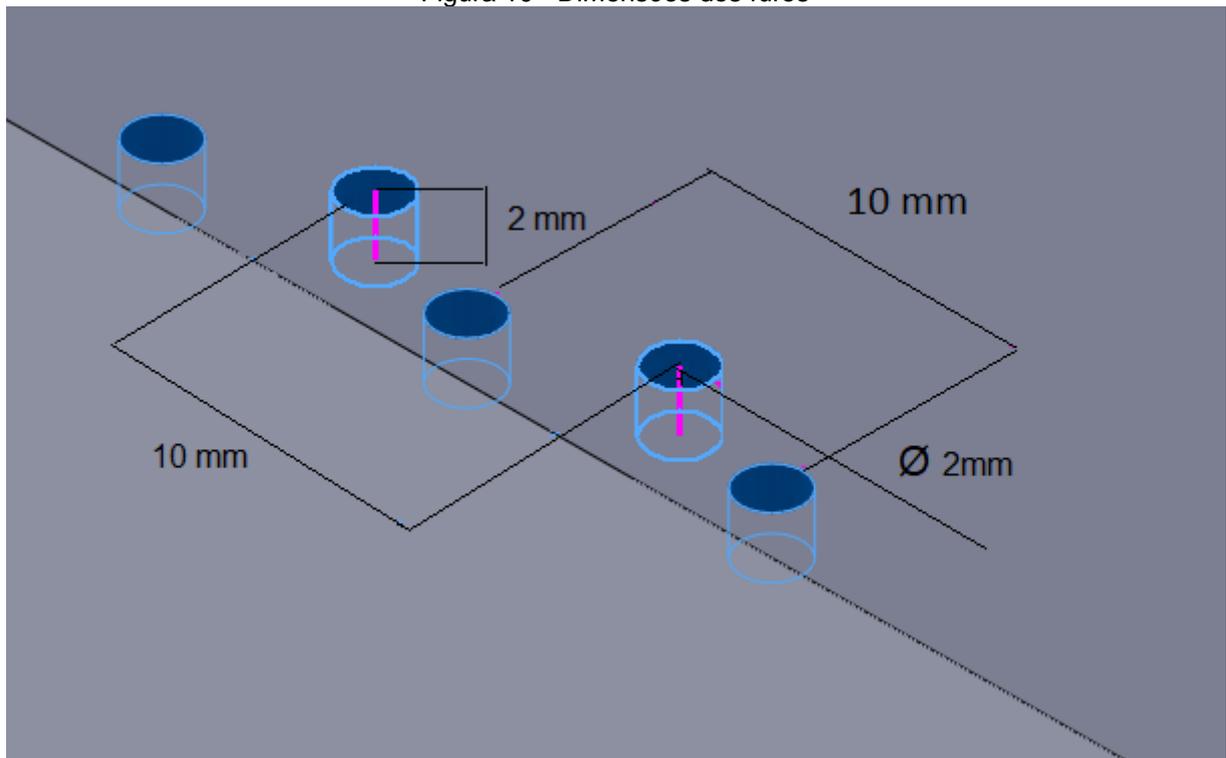
Chapa	Direção em relação ao cordão de solda	Quantidade de passes	Tensão média [A]	Corrente média [V]	Velocidade de soldagem média [mm/s]	Aporte térmico médio [kJ/m]
1	Transversal	08	18,5	170	6,0	409
2	Longitudinal	08	18,5	170	6,0	409
3	Longitudinal	04	18,2	175	4,5	442
4	Transversal	04	18,2	175	4,5	442
5	Longitudinal	08	18,4	163	6,0	390
6	Transversal	08	18,4	163	6,0	390
7	Transversal	06	18,5	163	4,3	543
8	Longitudinal	06	18,5	163	4,3	543

Fonte: (O Autor, 2017).

### 3.2.2.3 Usinagem dos furos

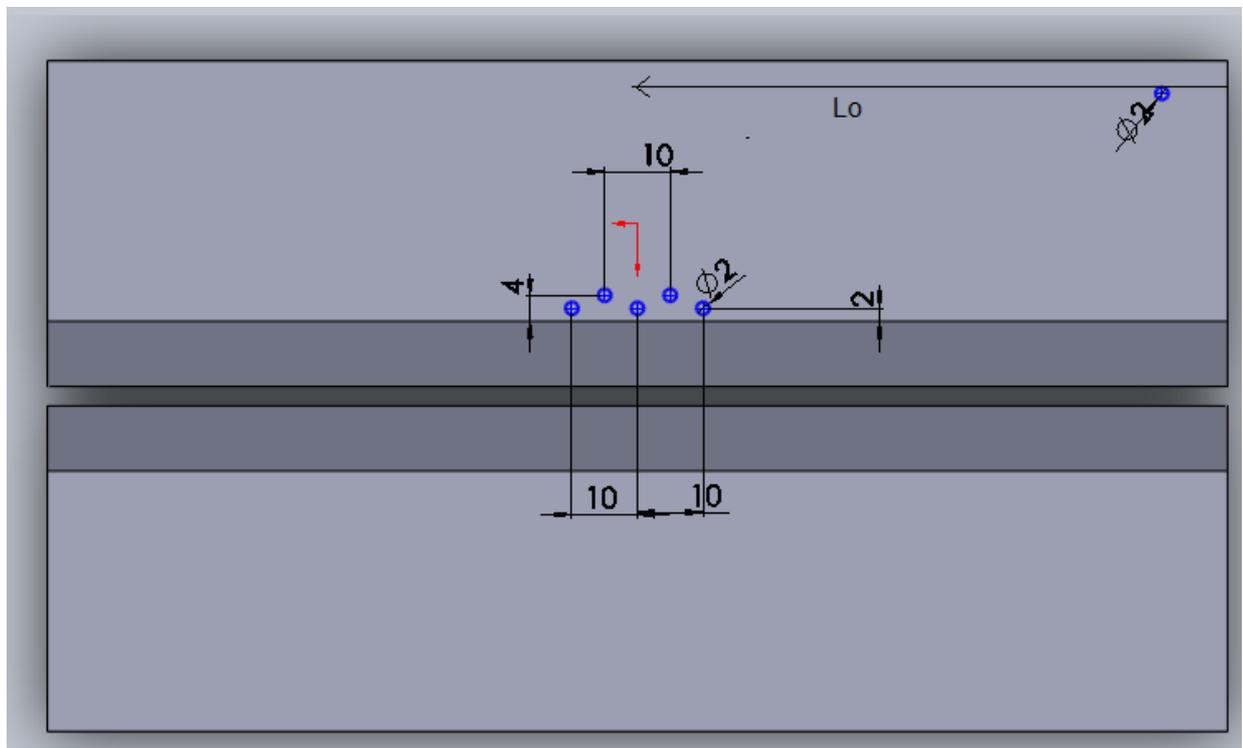
Após o processo da soldagem, foram feitos cinco furos cegos de 2 mm de diâmetro e 2 mm de profundidade foram feitos com broca de centro em uma fresadora. Três destes furos localizam-se a 2 mm da margem do cordão de solda e os outros dois furos a uma distância de 4 mm da margem do cordão de solda. As Figuras 10 e 11 mostram a disposição dos furos, suas dimensões.

Figura 10 - Dimensões dos furos



Fonte: (O Autor, 2017).

Figura 11 - Disposição dos furos



Fonte: (O Autor, 2017).

#### 3.2.2.4 Mapeamento dos furos e o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

Os furos anteriormente descritos foram mapeados em uma máquina de medição por coordenadas MMC (certificado de calibração 03206/2013). Para isso, foram medidos os valores do centro dos furos ( $x_{inicial}$ ,  $y_{inicial}$ ) em relação a um ponto de referência localizado na borda da chapa. Para cada furo, foram realizadas cinco repetições do mapeamento na máquina de medições de coordenadas.

Depois de referenciados os furos, foi realizado tratamento térmico de alívio de tensões, em forno tipo mufla a uma temperatura de 650°C durante uma hora.

Depois do TTAT, os furos mapeados previamente tiveram seus centros ( $x_{final}$ ,  $y_{final}$ ) novamente referenciados e os deslocamentos relativos produzidos pelo tratamento térmico foram medidos. Assim, a partir da diferença dos valores das coordenadas obtidas antes e depois do TTAT na MMC. As tensões residuais calculadas a partir dos deslocamentos dos pontos coordenados, pelas equações 9, 10 e 11 apresentadas na seção 2.8.(página 22).

#### 3.2.2.5 Cálculo das tensões residuais

Após a obtenção do resultado da medição, as tensões residuais foram calculadas de acordo com as equações 9, 10 e 11 apresentadas na seção 2.8. Deslocamento dos Pontos Coordenados.

Finalmente são calculados os intervalos de confiança para a médias das tensões residuais ao nível de 95% (Krishnamoorthi *et al.*, 2018)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção apresenta os resultados obtidos e a discussão.

### 4.1 ESTUDO PRÉVIO PARA LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS IDEAIS PARA SOLDAGEM

O levantamento das condições ideais da soldagem, foram realizados utilizando-se os parâmetros mostrados na Tabela 5. Todos estes parâmetros, em particular, a tensão e corrente foram utilizados valores recomendados pelo fabricante do consumível para um processo multipasses.

Tabela 5 - Parâmetros da soldagem

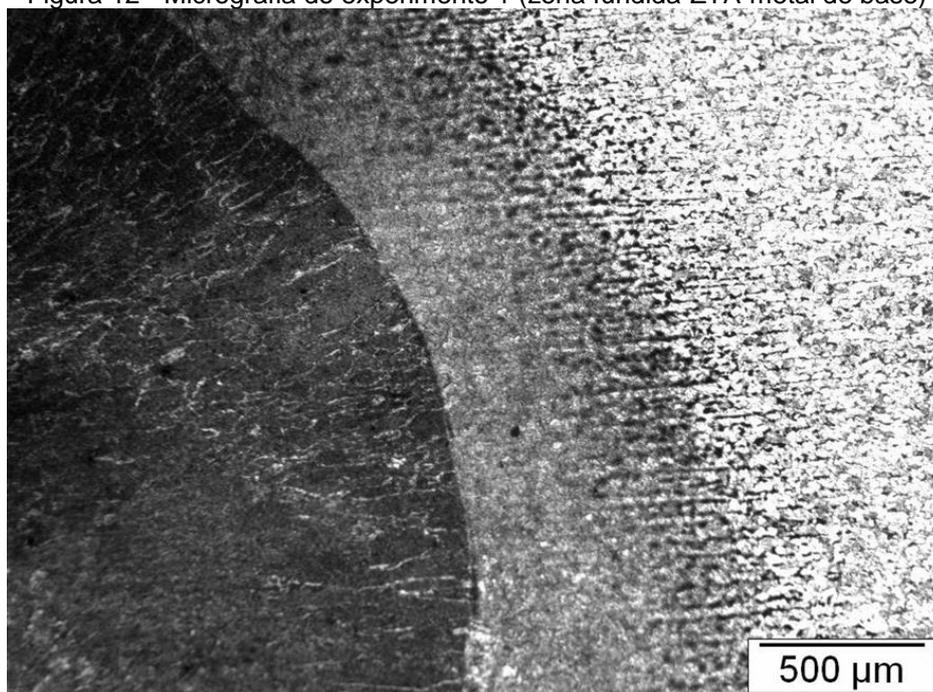
Experimento	Corrente (selecionado)/ experimental (média)	Tensão(selecionado)/ experimental (média)	Velocidade de soldagem	Passes	Aporte térmico /passe [kJ/m]
1	120A / 125,57A	18V / 18,29V	6,5 mm/s	14	275
2	160A / 164,5A	24V / 24,40V	13 mm/s	12	240
3	200A / 211,35A	25V / 25,15V	28 mm/s	14	148

Fonte: (O Autor, 2017).

Após o processo da soldagem é realizada o ensaio metalográfico no qual o corpo de prova é cortado na direção de interesse, que compreende a poça de fusão a zona termicamente afetada e o metal de base.

A figura 12, mostra a micrografia do experimento 1 na região da junta soldada, revelando a poça de fusão, a ZTA e o metal de base, nesta não se observa(m) defeito(s) caraterístico(s) do processo da soldagem.

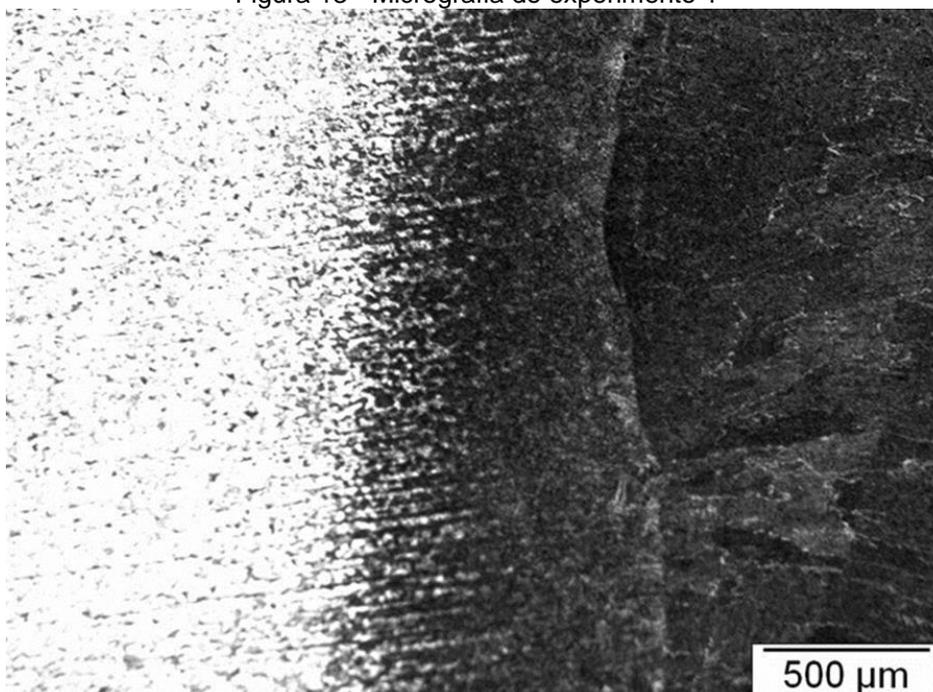
Figura 12 - Micrografia do experimento 1 (zona fundida-ZTA-metal de base)



Fonte: (O autor,2017).

A figura 13 mostra a micrografia referente ao ensaio metalográfico do experimento 1, nesta verifica-se a diluição no metal de base, contudo em algumas partes observa o chanfro na interface entre a poça de fusão e a zona termicamente afetada, cuja razão encontra-se no aporte térmico insuficiente.

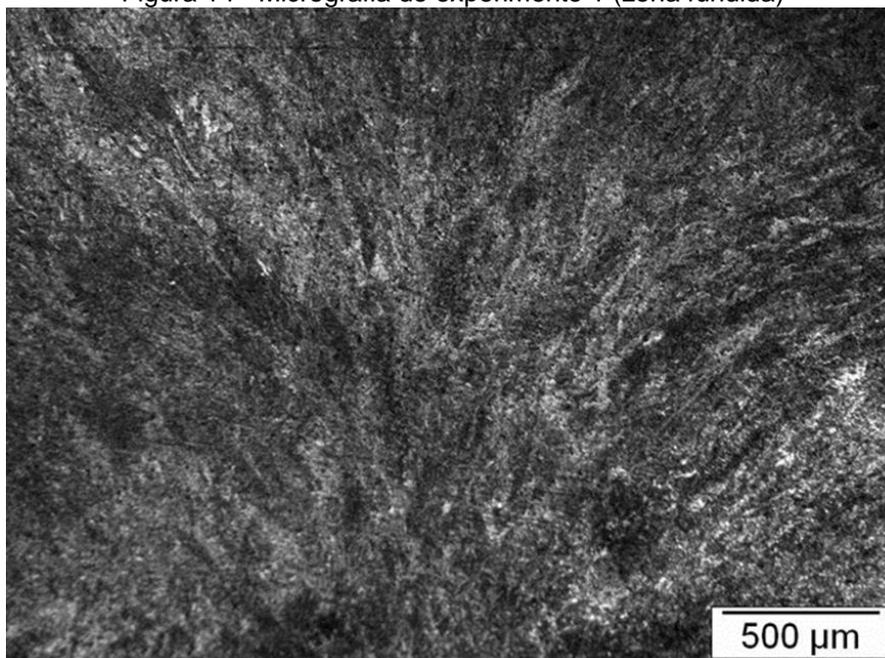
Figura 13 - Micrografia do experimento 1



Fonte: (O autor,2017).

A figura 14 mostra a micrografia da solda do experimento número 1. Na micrografia o efeito da epitaxia na zona fundida não tem a morfologia característica, assim como não apresenta o crescimento competitivo no sentido do fluxo do calor. Resultado este, o qual pode ser justificado pelo aporte térmico insuficiente, devido aos baixos valores da corrente 120~125A.

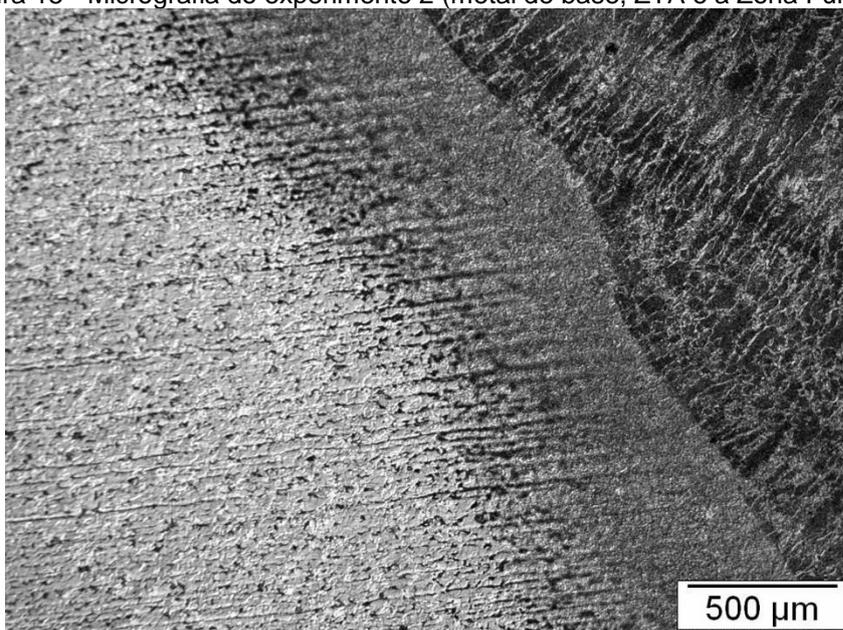
Figura 14 - Micrografia do experimento 1 (zona fundida)



Fonte: (O Autor, 2017).

A figura 15 mostra a micrografia do experimento 2 na região da junta soldada, revelando a poça de fusão, a ZTA e o metal de base, nesta não se observa defeito característico do processo da soldagem.

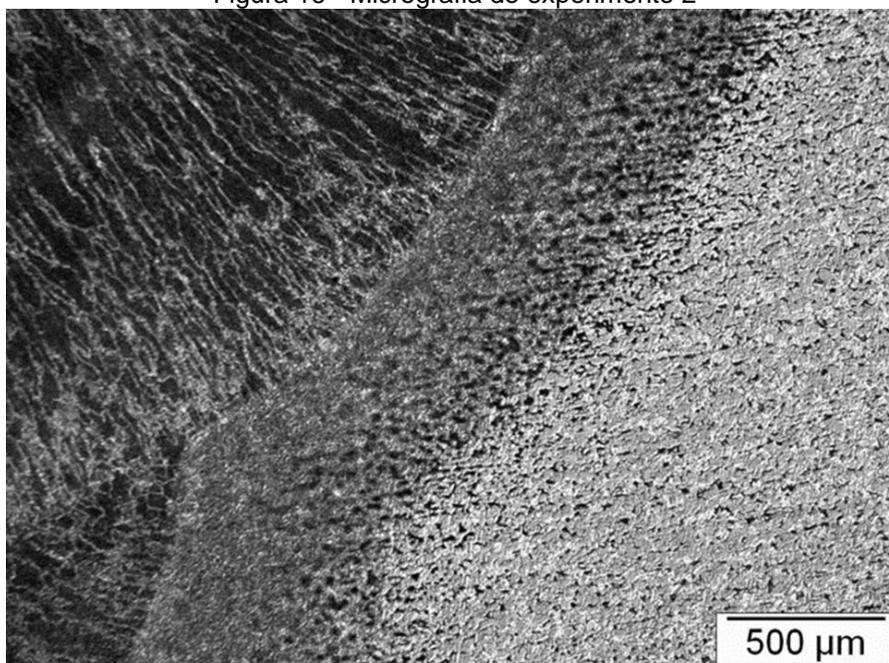
Figura 15 - Micrografia do experimento 2 (metal de base, ZTA e a Zona Fundida)



Fonte: (O Autor, 2017).

A figura 16 mostra a micrografia do experimento 2, nesta é bem observado na zona fundida, a linha de ligação tortuosa na qual revela que houve uma boa diluição, assim como, não são observados defeitos interfaciais.

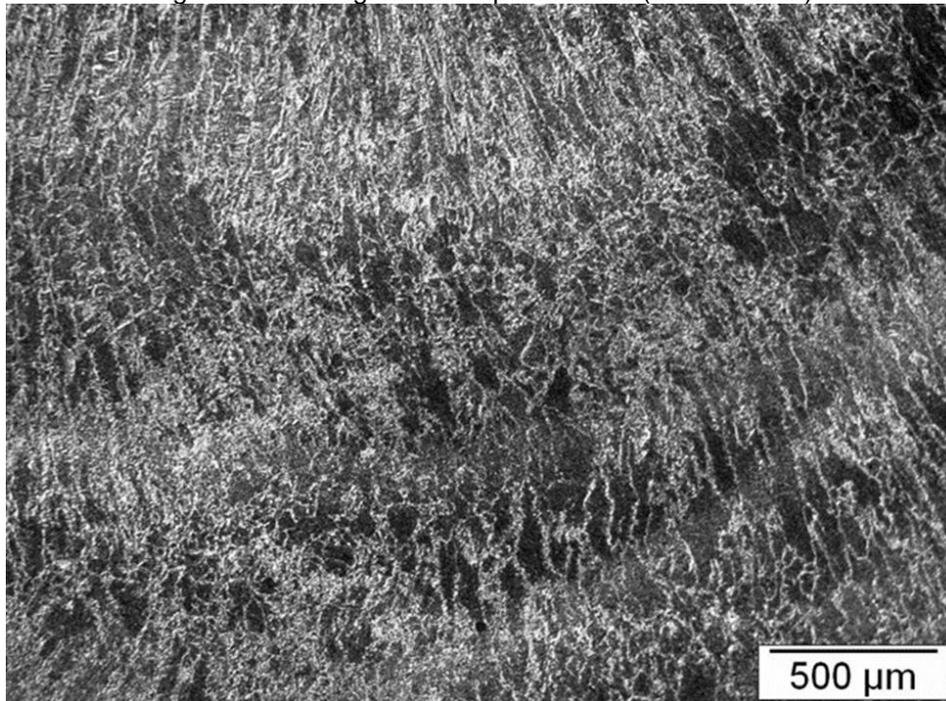
Figura 16 - Micrografia do experimento 2



Fonte: (O Autor, 2017).

A Figura 17 mostra a micrografia referente ao experimento 2. Com a corrente variando entre 160~164A, os efeitos da epitaxia, assim como, o crescimento competitivo no sentido do fluxo do calor é bem observado na zona fundida, característico de um bom processo de soldagem.

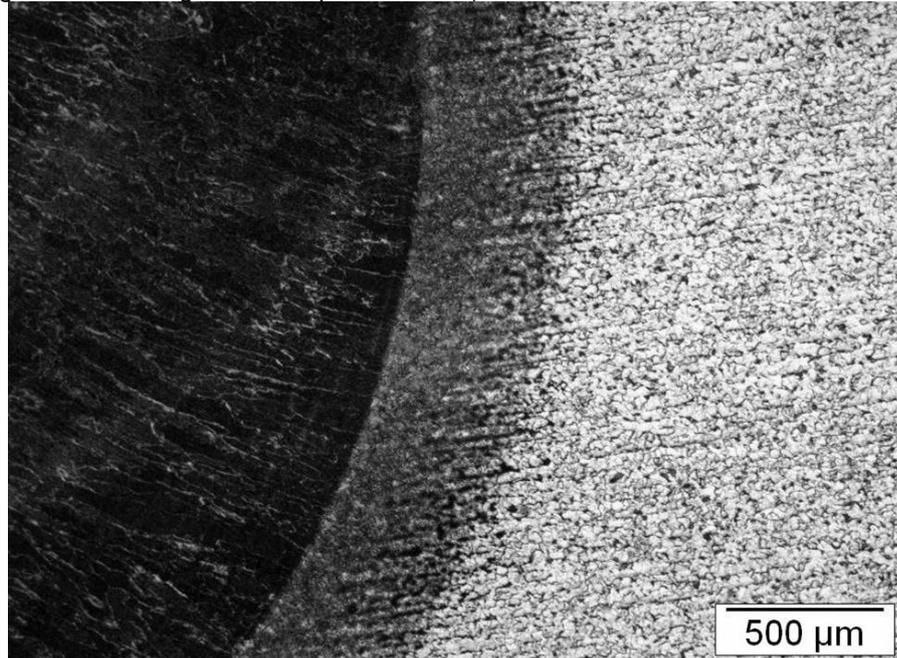
Figura 17 - Micrografia do experimento 2 (zona fundida)



Fonte: (O Autor, 2017).

A figura 18 mostra a micrografia referente ao ensaio metalográfico do experimento 3. A micrografia mostra a região da junta soldada, revelando a poça de fusão, a ZTA e o metal de base, nesta não se observa defeito característico do processo da soldagem.

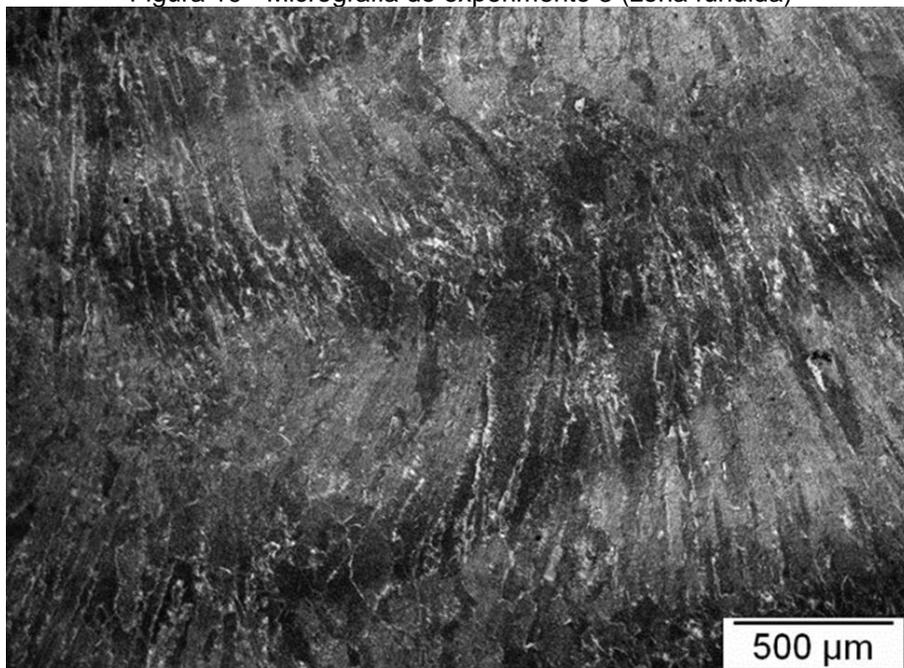
Figura 18 - Micrografia do experimento 3 (Zona Fundida, ZTA e o metal de base)



Fonte: (O Autor, 2017).

A figura 19 mostra a micrografia do experimento 3 na região da zona fundida. Nesta, observa-se que os grãos da zona fundida (epitaxia) são bem maiores que no caso anterior, ou seja, do experimento 2. Assim como, se observa o efeito direcional extremamente perturbado devido à alta corrente empregada neste experimento cujo valores variaram de 200 A ~ 211 A.

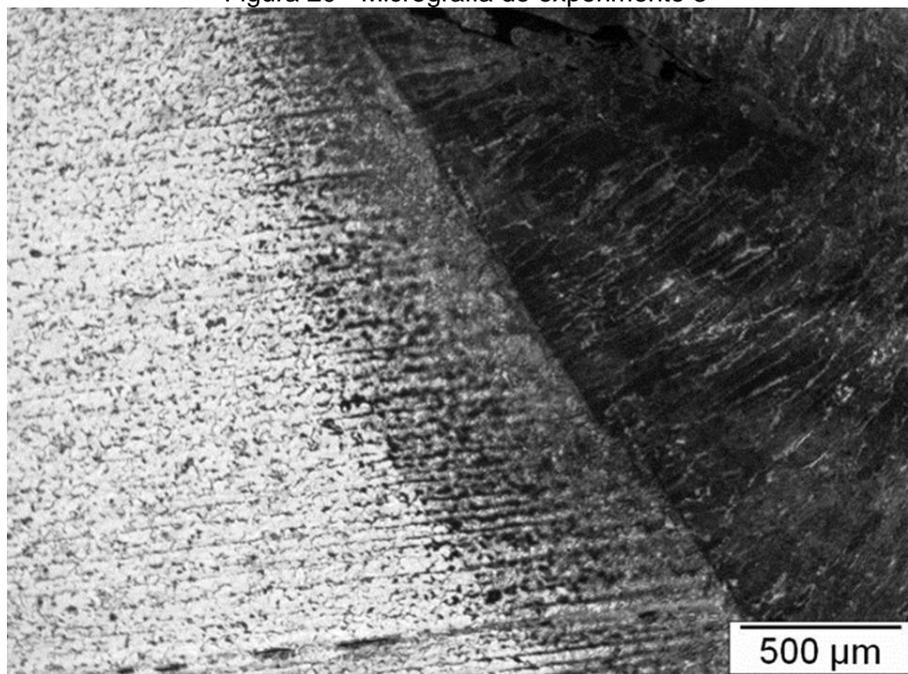
Figura 19 - Micrografia do experimento 3 (zona fundida)



Fonte: (O Autor, 2017).

A figura 20 mostra a micrografia do experimento número 3. Verifica-se na micrografia uma baixa diluição, pois é claramente observado o chanfro do metal de base indicando que o aporte térmico foi insuficiente para diluir o metal de base. Isto pode ser justificado pela velocidade de soldagem mais alta quando comparado com os experimentos anteriores.

Figura 20 - Micrografia do experimento 3



Fonte: (O Autor, 2017).

As extensões das ZTA foram medidas nos três experimentos utilizando o software ImageJ (Schneider *et al.*, 2012) os valores obtidos foram de 674μm, 536μm e 424μm para os experimentos 1, 2 e 3, respectivamente. Apesar dos mais altos valores de corrente e tensão, a extensão da ZTA no experimento 3 foi a menor, devido o emprego de uma velocidade quatro vezes maior que no experimento e duas vezes maior que no experimento 2.

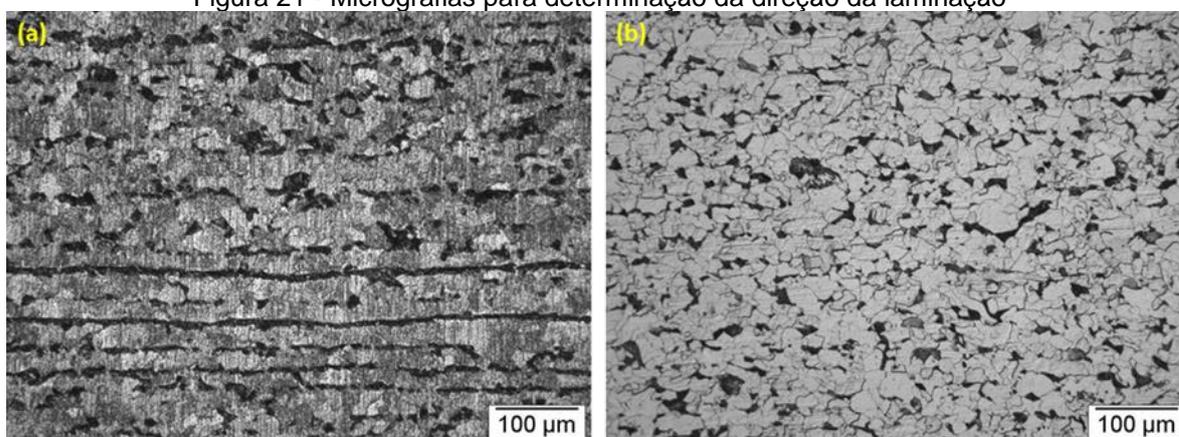
Assim, verifica-se a partir de observações qualitativas, que os melhores parâmetros de soldagem para o metal de base e para o processo de soldagem GMAW, modo de transferência curto circuito, polaridade inversa, com o arame eletrodo ER70S-6 de diâmetro 1,2 mm. são aqueles utilizados no experimento número 2.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DA LAMINAÇÃO

A determinação da direção da laminação é de fundamental importância para o estudo das tensões residuais levando-se em consideração a anisotropia do metal de base.

A figura 21, mostra as direções longitudinal e transversal da laminação, onde se observa claramente diferenças na microtextura, na micrografia (a) verifica-se o alongamento dos grãos, revelando a direção da laminação, na micrografia (b) observa-se a direção normal em relação a direção da laminação.

Figura 21 - Micrografias para determinação da direção da laminação



Fonte: (O Autor, 2016).

## 4.3 DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS, PELO MÉTODO DPC, CONSIDERANDO-SE A ANISOTROPIA DO MATERIAL

Depois de soldadas as chapas de teste, foram feitos furos ao longo do cordão de solda de cada chapa conforme mostrado na previamente nas Figuras 10 e 11.

As coordenadas (x, y) destes furos foram determinados numa máquina de medição por coordenadas. Em seguida as chapas foram tratadas à temperatura de 650°C durante uma hora para alívio de tensões. Depois do tratamento, são obtidas as novas coordenadas dos pontos mapeados para se determinar os deslocamentos produzidos pelo tratamento. A partir dos deslocamentos produzido pelo tratamento para o alívio das tensões, as tensões residuais foram calculadas, conforme as equações 9, 10 e 11 apresentadas no capítulo anterior.

### 4.3.1 Tensões Residuais das Chapas 1, 2, 5 e 6.

As chapas 1, 2, 5 e 6 foram soldadas de acordo com os parâmetros apresentados na tabela 6, o qual foram baseados nos estudos da seção 4.1.

Tabela 6 - Parâmetros do processo da soldagem para as chapas 1, 2, 5 e 6

Chapa	Direção laminação em relação ao cordão de solda	Tensão [V]	Corrente [A]	Aporte térmico médio [kJ/m]
1	Transversal	18,5	170	409
2	Longitudinal	18,5	170	409
5	Longitudina	18,4	163	390
6	Transversal	18,4	163	390

Fonte: (O Autor, 2017).

As chapas 1 e 2 foram soldadas em conjunto, ou seja, em ambas as chapas, cada passe foi feito de forma contínua. As chapas 5 e 6 foram soldadas da mesma forma, de tal forma que o aporte térmico garantisse os mesmos valores para ambas as chapas, diferindo apenas da direção da laminação em relação ao cordão de solda, com objetivo de se analisar as tensões residuais após a soldagem considerando-se a anisotropia do metal de base.

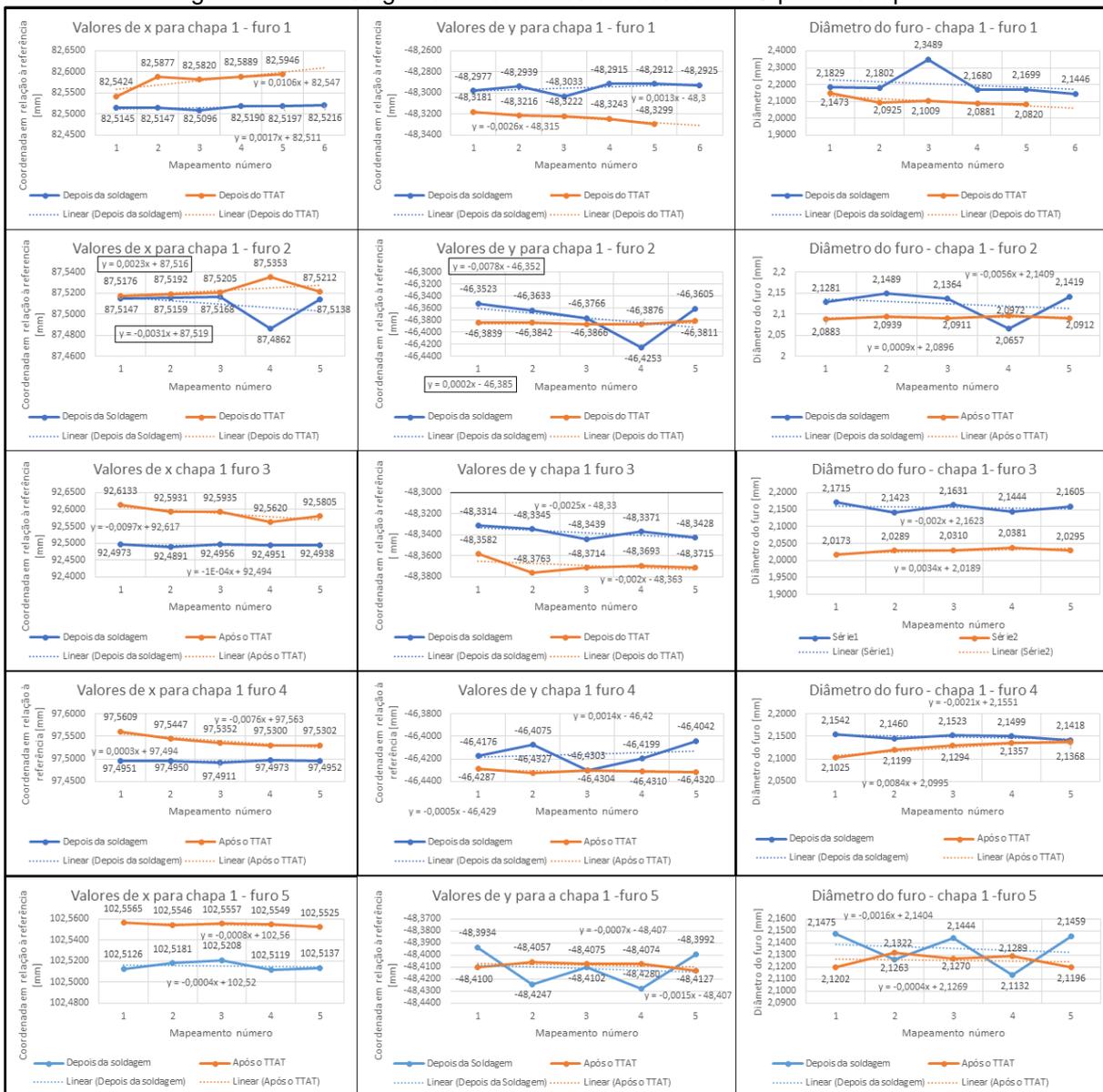
#### 4.3.1.1 Análise dos valores obtidos a partir do mapeamento na Máquina de Medições de Coordenadas.

As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam de forma gráfica a análise dos valores de x, y e do diâmetro do furo, depois da soldagem e após o tratamento térmico.

Os gráficos demonstram a falta de repetibilidade dos dados obtidos, cuja causa é decorrente da metodologia do mapeamento do furo, agravado por problemas provenientes do processo da usinagem.

A figura 22 demonstra os valores de x, y e o diâmetro do furo para a chapa 1.

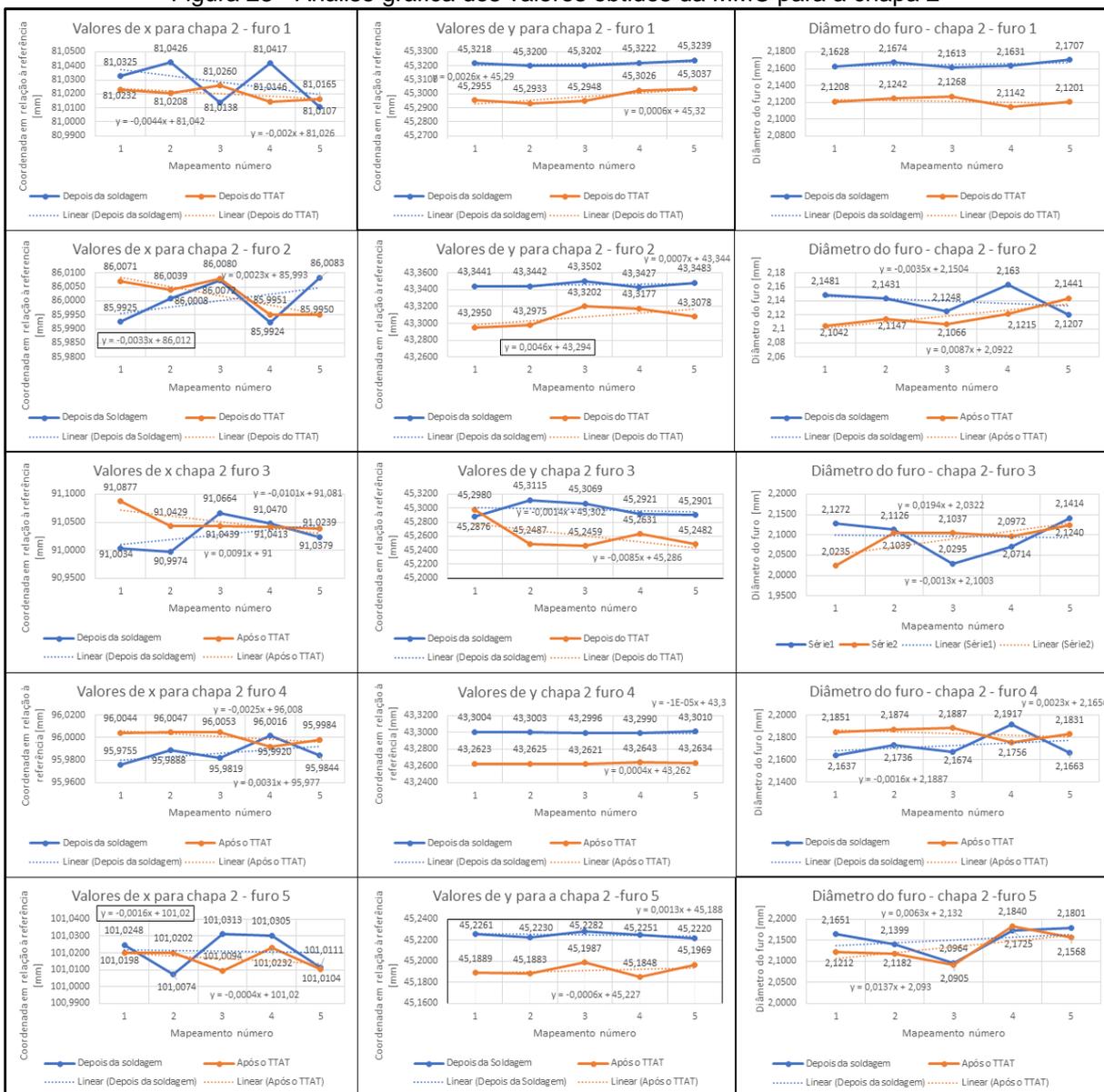
Figura 22 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 1



Fonte: (O Autor, 2017).

A figura 23 demonstra os valores de x, y e o diâmetro do furo para a chapa 2.

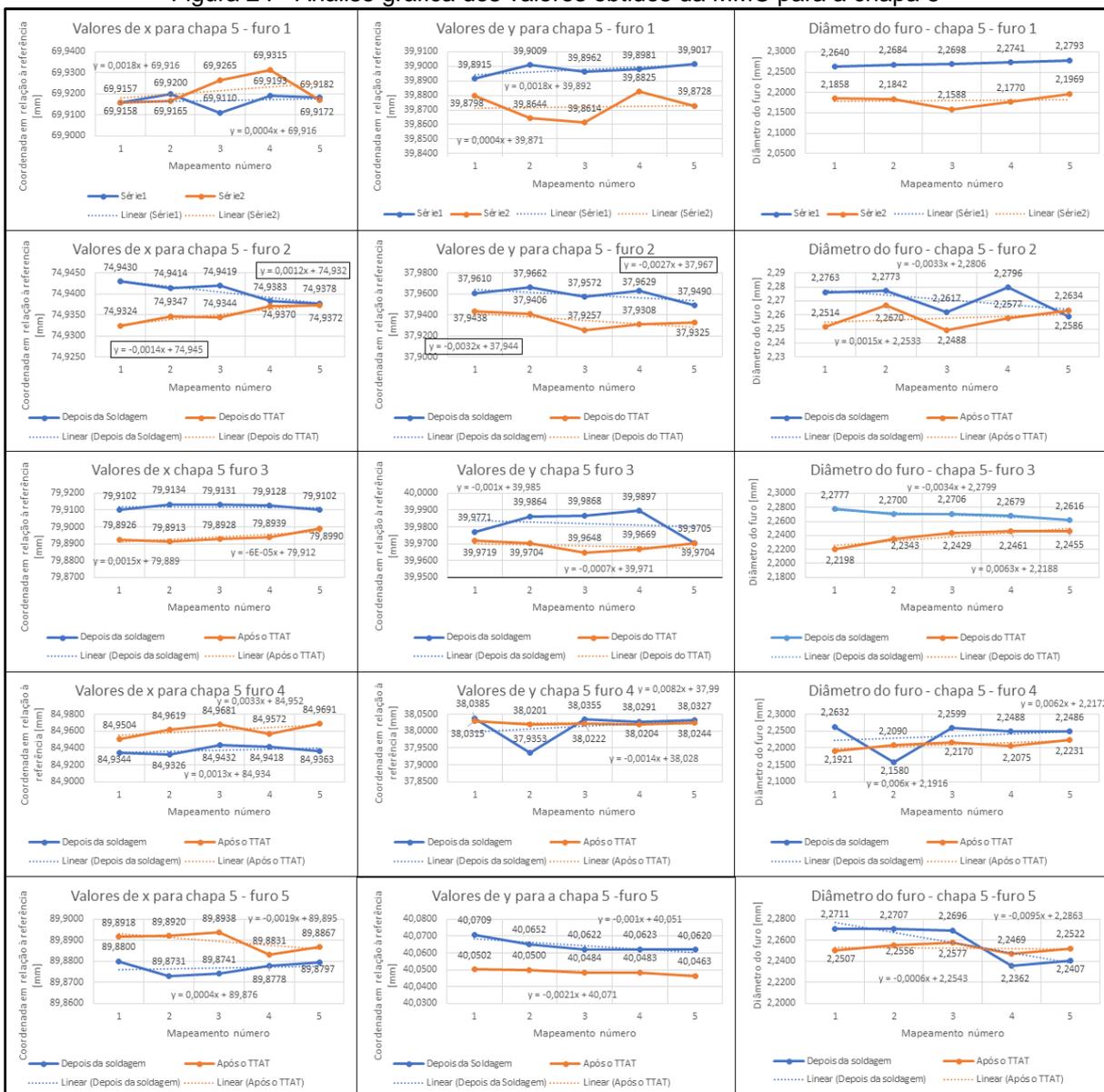
Figura 23 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 2



Fonte: (O Autor, 2017).

A Figura 24 refere-se a análise gráfica dos valores obtidos a partir do mapeamento na MMC para a chapa 5.

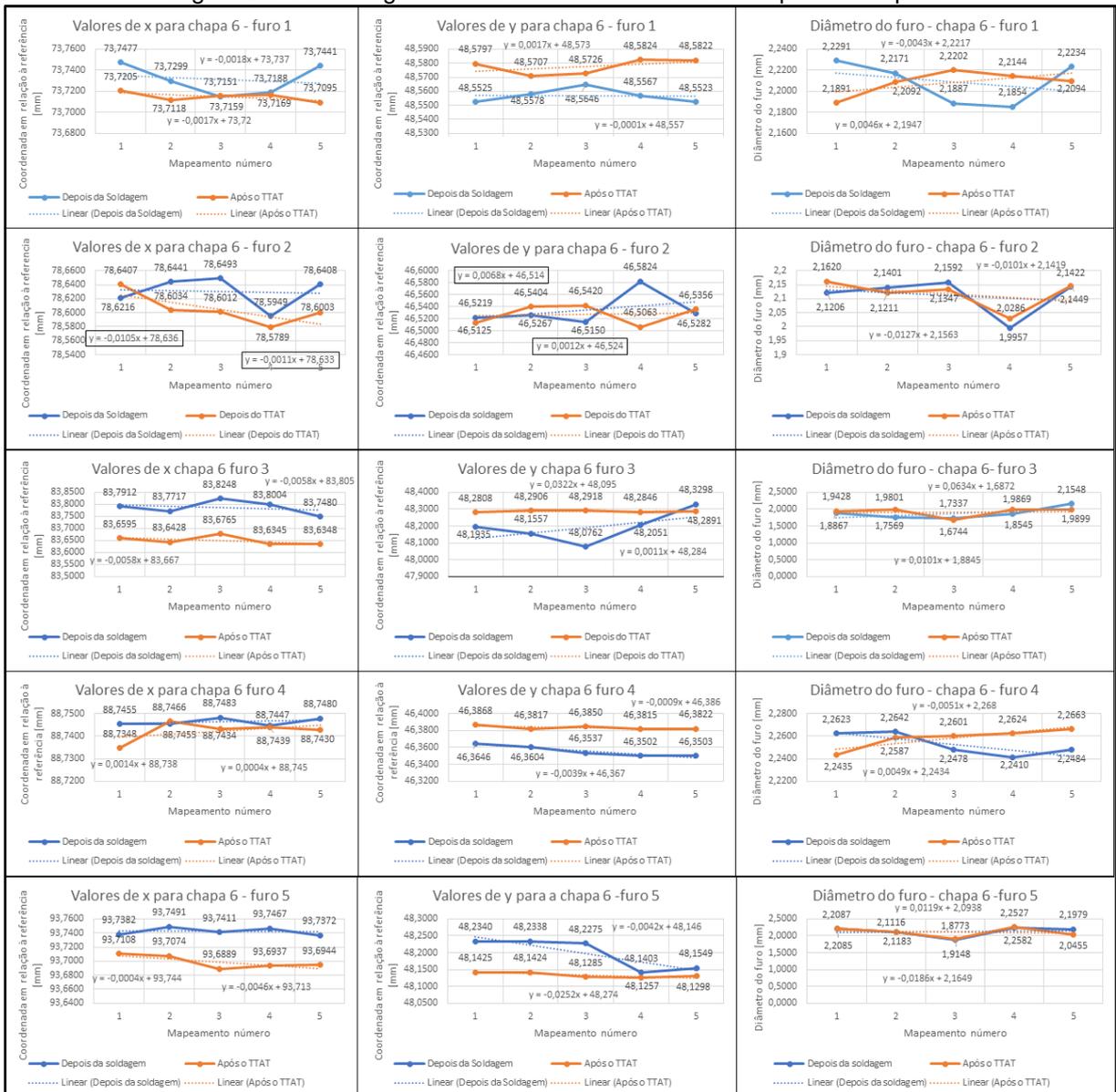
Figura 24 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 5



Fonte: (O Autor, 2017).

A Figura 25 refere-se a análise gráfica, cujos valores foram obtidos a partir do mapeamento na MMC.

Figura 25 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 6



Fonte: (O Autor, 2017).

Em síntese, a partir das análises dos valores de x, y e do diâmetro do furo das 5 repetições do mapeamento na MMC, revela que a falta a repetibilidade demonstrada na análise gráfica., cuja razão encontra-se no método utilizado para o mapeamento do furo, agravados pelos defeitos do processo de usinagem, o qual acarreta em valores anômalos para as tensões residuais.

#### 4.3.1.2 Cálculo das Tensões Residuais para as chapas 1, 2, 5 e 6

Após a análise gráfica das coordenadas (x, y) e do diâmetro do furo, são calculadas as tensões residuais, cujos valores são apresentados nas tabelas número 7 a 14.

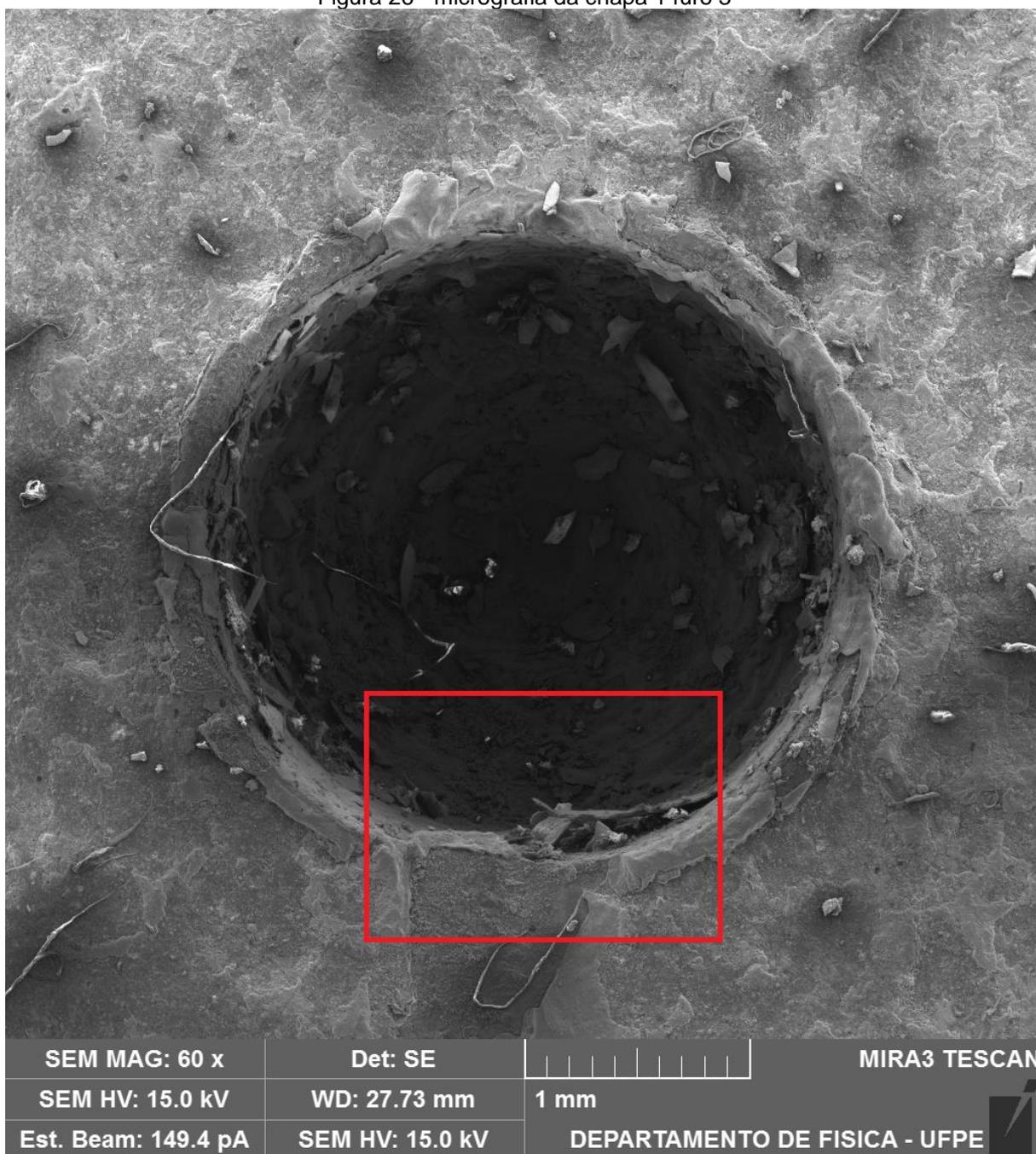
Observa-se que os valores obtidos apresentam boa reprodutibilidade, afirmação baseada a partir da comparação com os trabalhos anteriores desenvolvidos pelo grupo de pesquisa (Siqueira Filho *et al.*, 2013; Gonçalves *et al.*, 2016; Melo, 2017; Mendes *et al.*, 2017)

Contudo, em alguns casos os valores para as tensões residuais apresentam valores incoerentes, pois, segundo a literatura as tensões residuais devem ser menores que o limite de escoamento do metal de base (Fitzpatrick and Lodini, 2003; Modenesi *et al.*, 2005).

Tal anomalia são devidas às inúmeras razões, sendo uma delas a deformação do furo como mostram as micrografias realizada pela microscopia eletrônica de varredura, o qual resulta na falta da precisão das coordenadas (x, y) referente às 5 repetições dos mapeamentos na MMC, o qual compromete no cálculo da deformação (equação 9), por conseguinte, nos cálculos das tensões residuais de acordo com as equações 10 e 11.

A figura 26 apresenta a micrografia da chapa 1 furo 3, depois de ser realizado o tratamento de alívio térmico de tensões. Na microscopia é destacado em vermelho umas das causas do problema que acarreta a falta da repetibilidade nos mapeamentos na Máquina de Medições por Coordenadas.

Figura 26 - micrografia da chapa 1 furo 3



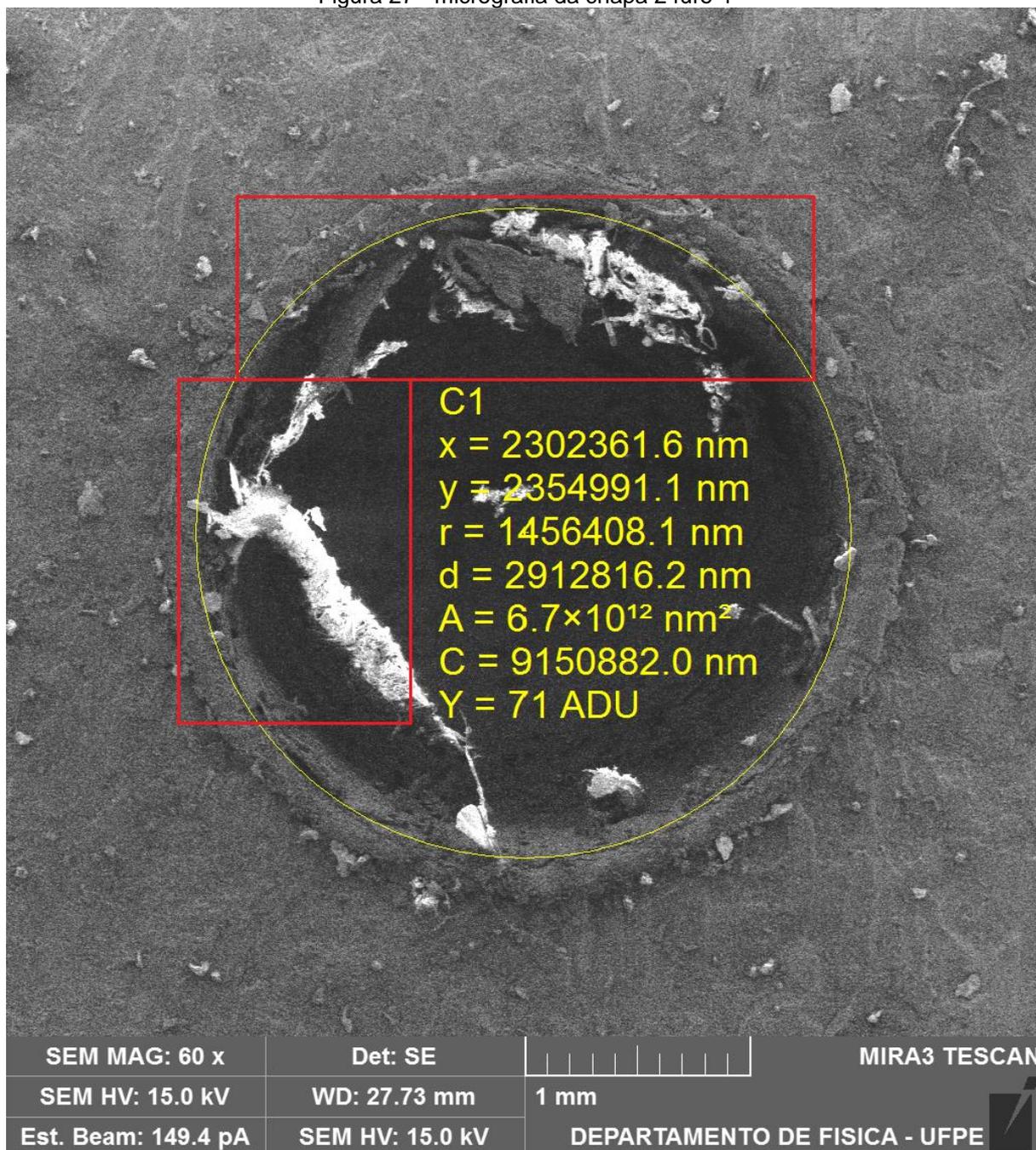
Fonte: (O Autor, 2018).

A figura 27 refere-se a micrografia realizada no microscópio eletrônico de varredura, da chapa 2 furo 4. Observa-se problemas referentes a usinagem bem como o excesso da rebarba.

A partir do software do microscópio eletrônico de varredura, destacado em cor amarela, foi identificado que a geometria do furo não é de uma circunferência adequada para inferir tensões residuais pelo método DPC que exige dados mais

precisos das coordenadas  $x$ ,  $y$ . Pois a falta de precisão das coordenadas  $x$ ,  $y$  compromete no cálculo da deformação (equação 9), por conseguinte, nos cálculos das tensões residuais de acordo com as equações 10 e 11.

Figura 27 - micrografia da chapa 2 furo 4



Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 7 apresenta os valores para as tensões residuais em módulo, para a chapa 1, cuja direção da soldagem é transversal em relação à direção da laminação.

Sendo  $|\sigma_y|$  a tensão residual na direção transversal em relação ao cordão de solda e  $|\sigma_x|$  a tensão residual na direção longitudinal em relação ao cordão de solda (vide fig. 8).

Os valores obtidos estão de acordo com o esperado para a chapa 1 cuja direção da soldagem é transversal em relação à direção da laminação, ou seja, a tensão residual na direção transversal em relação ao cordão de solda é menor que a tensão residual na direção longitudinal em relação ao cordão de solda. ( $|\overline{\sigma_y}| = 54,10$  MPa  $|\overline{\sigma_x}| = 93,39$  MPa,  $|\overline{\sigma_x}| > |\overline{\sigma_y}|$ ).

Na tabela 7, verifica-se que as tensões residuais inferidas para a chapa 1 estão de acordo com a literatura, ou seja, as tensões residuais devem ser menores que o limite de escoamento do metal de base (Fitzpatrick and Lodini, 2003; Modenesi *et al.*, 2005).

Tabela 7 - Tensões residuais para a chapa 1 (Transversal)

Furo (distância da margem do cordão de solda)	$ \sigma_x $ [MPa]	$ \sigma_y $ [MPa]	Tensões Residuais [MPa]
1 (2mm)	103,41	85,17	133,97
3 (2mm)	170,82	78,12	187,84
5 (2mm)	92,55	37,82	99,98
2 (4mm)	17,73	32,09	36,66
4 (4mm)	82,45	37,31	90,50

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 8 apresenta o valor médio das tensões residuais em módulo em conjunto com o desvio padrão e o intervalo de confiança ao nível de 95%.

Tabela 8 - Média das Tensões Residuais, o desvio padrão e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%

Furo	Média das Tensões residuais [MPa]	Desvio Padrão	Intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%
Furos 1, 2, 3, 4 e 5	109,79	55,88	41,05

Fonte: (O Autor, 2018).

Na tabela 9 são apresentadas as tensões residuais para a chapa 2, cuja direção da soldagem é longitudinal em relação à direção da laminação.

Assim como na chapa número 1, é verificada o efeito da anisotropia nos valores das tensões residuais, ou seja, para a chapa cuja direção de soldagem é

longitudinal à direção da laminação, a média dos valores das tensões residual em módulo na direção transversal em relação ao cordão de solda é maior que a média da tensão residual na direção longitudinal em relação ao cordão de solda ( $|\bar{\sigma}_x| = 34,77 \text{ MPa}$ ,  $|\bar{\sigma}_y| = 149,63 \text{ MPa}$ ,  $|\bar{\sigma}_x| < |\bar{\sigma}_y|$ ).

Tabela 9 - Tensões residuais para a chapa 2 (Longitudinal)

Furo (distância da margem do cordão de solda)	$ \sigma_x $ [MPa]	$ \sigma_y $ [MPa]	Tensões Residuais [MPa]
1 (2mm)	50,31	112,49	123,23
3 (2mm)	2,27	151,18	151,20
5 (2mm)	55,32	154,04	163,67
2 (4mm)	48,39	172,15	178,82
4 (4mm)	17,58	158,29	159,26

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 10 apresenta o valor médio das tensões residuais em módulo em conjunto com o desvio padrão e o intervalo de confiança ao nível de confiabilidade de 95% para a chapa 2.

Tabela 10 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%

Furo	Média das Tensões residuais [MPa]	Desvio Padrão	Intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%
Furos 1, 2, 3, 4 e 5	155,24	20,52	15,08

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 11 apresenta os valores para as tensões residuais para chapa número 5, cuja direção da soldagem é longitudinal em relação à direção da laminação.

Assim como na chapa 2, cuja direção da soldagem é longitudinal em relação a direção da laminação, é verificado o efeito da anisotropia nos valores das tensões residuais, ou seja, os valores médios para a tensão residual em módulo na direção transversal em relação ao cordão de solda são maiores que a média em módulo da tensão residual longitudinal em relação ao cordão de solda ( $|\bar{\sigma}_x| = 42,65 \text{ MPa}$ ,  $|\bar{\sigma}_y| = 83,98 \text{ MPa}$ ,  $|\bar{\sigma}_x| < |\bar{\sigma}_y|$ ).

Tabela 11 - Tensões residuais para a chapa 5 (Longitudinal)

Furo (distância da margem do cordão de solda)	$ \sigma_x $ [MPa]	$ \sigma_y $ [MPa]	Tensões Residuais [MPa]
1 (2mm)	36,99	116,16	121,90
3 (2mm)	58,75	72,09	93,00
5 (2mm)	6,82	63,38	63,75
2 (4mm)	45,47	114,91	123,58
4 (4mm)	65,22	53,36	84,27

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 12 apresenta o valor da tensão residuais média em conjunto com o desvio padrão e o intervalo de confiança ao nível de 95%.

Tabela 12 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%

Furo	Média das Tensões residuais [MPa]	Desvio padrão	Intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%
Furos 1, 2, 3, 4 e 5	97,30	25,55	15,36

Fonte: (O Autor, 2018).

Na tabela 13 são apresentados os valores para as tensões residuais para a chapa 6 na qual a direção da soldagem é transversal em relação à direção da laminação.

Assim como na chapa número 1 é verificada o efeito da anisotropia nos valores das tensões residuais, ou seja, para a chapa cuja direção de soldagem é transversal à direção da laminação, a média dos valores das tensões residual em módulo na direção transversal em relação ao cordão de solda é menor que a média da tensão residual na direção longitudinal em relação ao cordão de solda ( $|\overline{\sigma_x}| = 133,74$  MPa  $|\overline{\sigma_y}| = 125,37$  MPa,  $|\overline{\sigma_x}| > |\overline{\sigma_y}|$ ).

Tabela 13 - Tensões residuais para a chapa 6 (transversal)

Furo (distância da margem do cordão de solda)	$ \sigma_x $ [MPa]	$ \sigma_y $ [MPa]	Tensões Residuais [MPa]
1 (2mm)	10,87	67,95	68,81
3 (2mm)	352,51	174,76	<b>393,45</b>
5 (2mm)	202,82	250,13	322,02
2 (4mm)	88,88	48,68	101,34
4 (4mm)	13,65	85,32	88,40

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 14 apresenta o valor médio para as tensões residuais em módulo calculadas em conjunto com o desvio padrão e o intervalo de confiança para média ao nível de 95% para a chapa 6.

Devido ao valor anômalo para o furo 3, cuja causa esta correlacionada aos fatores mencionados no parágrafo 4 e 5 da seção 4.3.1.2. (vide pág.46), este é desconsiderado nos cálculos apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%

Furo	Média das Tensões residuais [MPa]	Desvio padrão	Intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%
Furos 1, 2, 3, 4 e 5	85,52	44,14	16,28

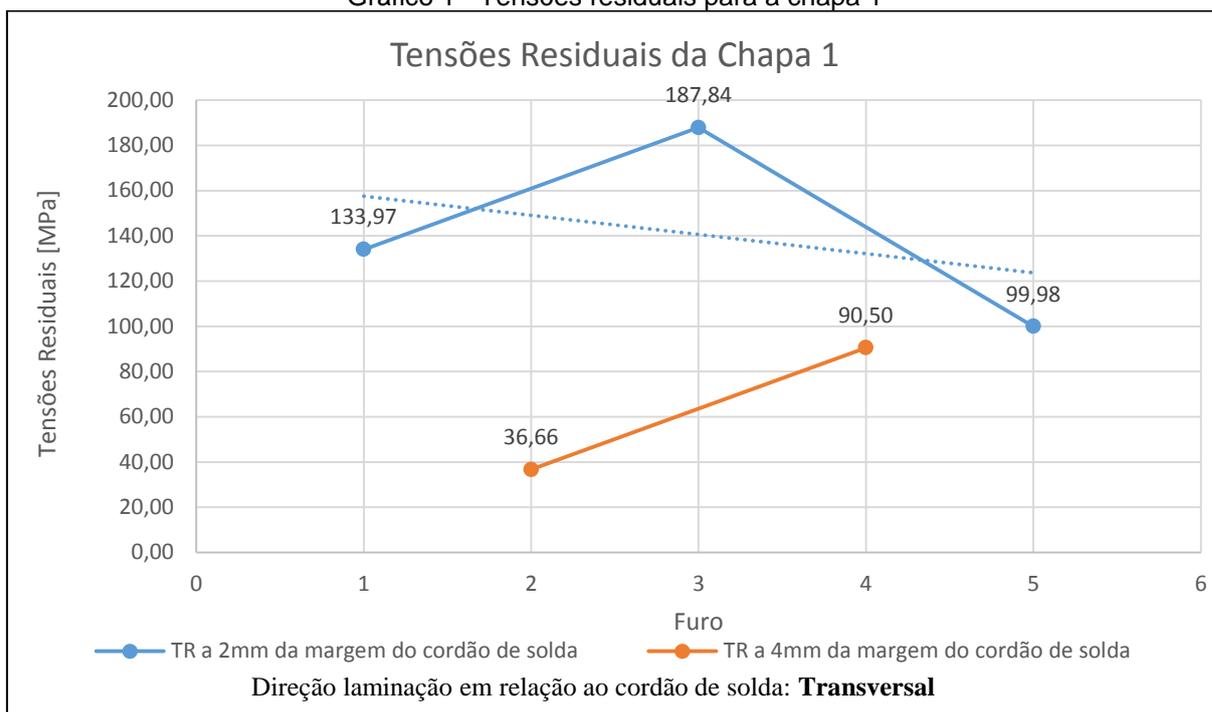
Fonte: (O Autor, 2018).

A seguir, os valores das tensões residuais para as chapas 1, 2, 5 e 6 são apresentados de forma gráfica, considerando-se a distância do furo em relação à margem do cordão de solda.

Verifica-se uma coerência nos valores das tensões residuais, onde nos furos a 2mm da margem do cordão de solda as tensões residuais são maiores em relação aos furos a 4 mm da margem do cordão de solda (Teng *et al.*, 2003)

O gráfico 1 demonstra os valores das tensões residuais em relação a distância do cordão de solda para a chapa número 1, cuja direção da soldagem é longitudinal em relação à direção da laminação.

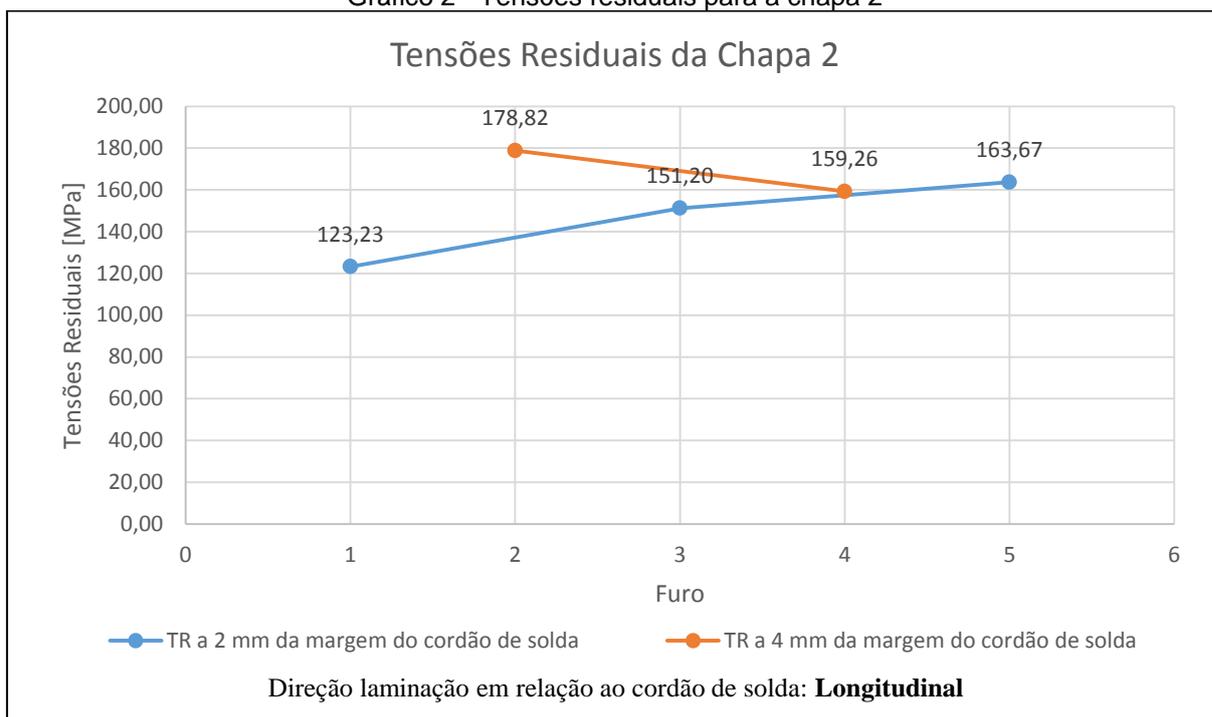
Gráfico 1 - Tensões residuais para a chapa 1



Fonte: (O Autor, 2018).

O gráfico 2 apresenta os valores das tensões residuais para a chapa número 2, cuja direção da soldagem é longitudinal em relação à direção da laminação.

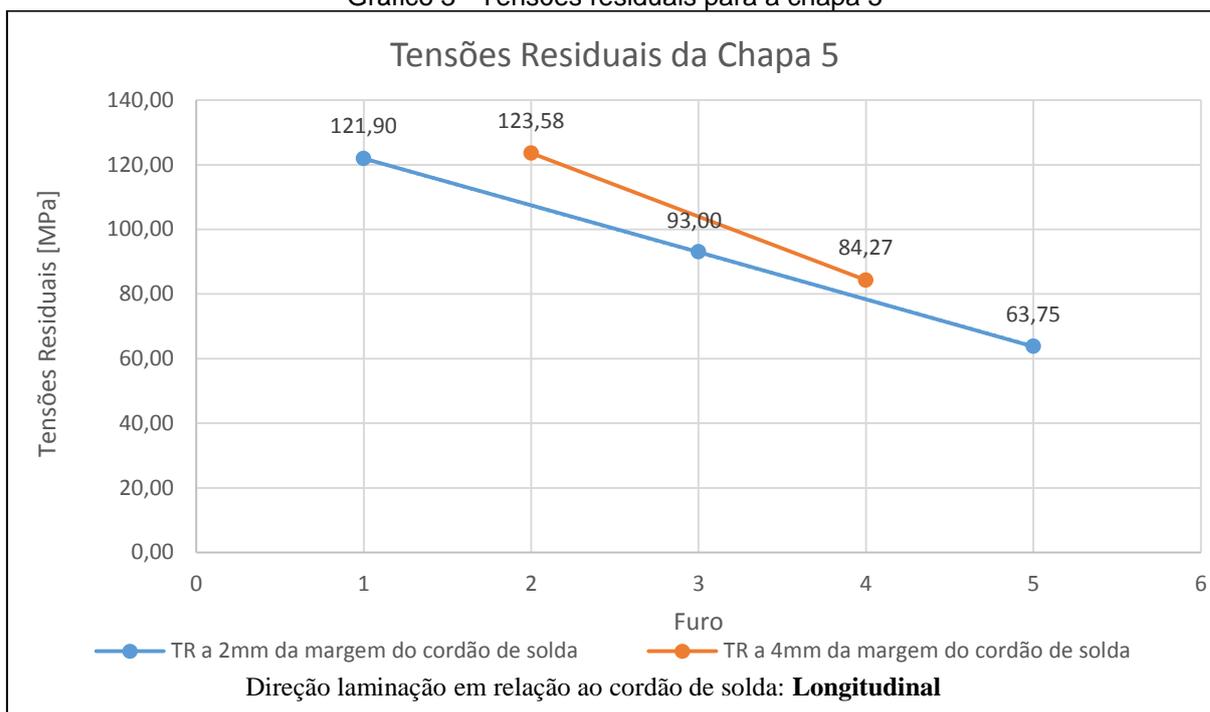
Gráfico 2 - Tensões residuais para a chapa 2



Fonte: (O Autor, 2018).

O gráfico 3 apresenta os valores das tensões residuais considerando a distância em relação ao cordão de solda para a chapa 5, cuja direção da soldagem é longitudinal em relação à direção da laminação.

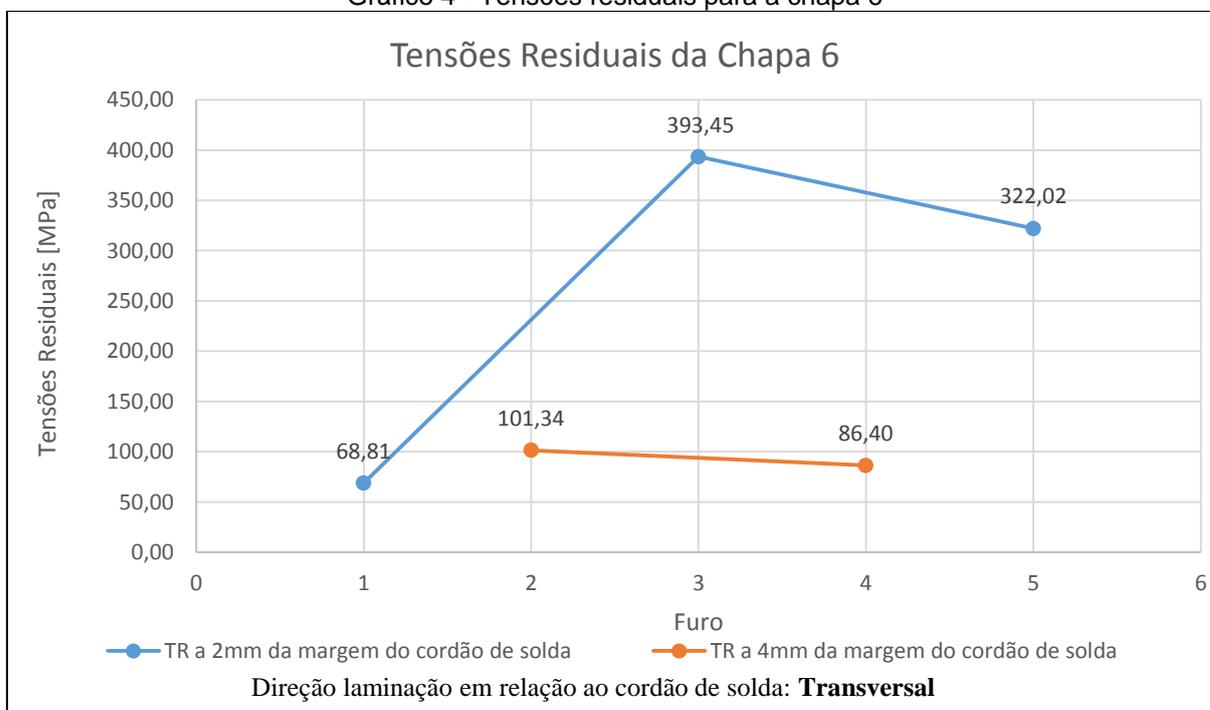
Gráfico 3 - Tensões residuais para a chapa 5



Fonte: (O Autor, 2018).

O gráfico 4 apresenta os valores das tensões residuais para a chapa 6 considerando a distância em relação à margem do cordão de solda.

Gráfico 4 - Tensões residuais para a chapa 6



Fonte: (O Autor, 2018).

A partir das comparações das tensões residuais, ver tabela 15, verifica-se quando a direção da soldagem é longitudinal à direção da laminação, os valores da média das tensões residuais em módulo na direção transversal em relação ao cordão de solda é maior que a média em módulo das tensões residuais na direção longitudinal em relação ao cordão de solda, vice-versa para as chapas cuja direção da soldagem é transversal à direção da laminação.

Assim é verificada o efeito da anisotropia nas tensões residuais, fato este devido a tensão de recuo, na qual se observa a diminuição do limite de escoamento do metal de base na direção da laminação.

Tabela 15 - Tensões residuais para as chapas 1, 2, 5 e 6

Chapa	Direção	$ \bar{\sigma}_x $ [MPa]	$ \bar{\sigma}_y $ [MPa]
1	Transversal	93,39	54,10
2	Longitudinal	34,77	149,63
5	Longitudinal	42,65	83,98
6	Transversal	133,74	125,37

Fonte: (O Autor, 2018).

#### 4.3.2 Tensões Residuais das Chapas 3, 4, 7 e 8

As chapas 3, 4, 7 e 8 foram soldadas da mesma forma que as chapas 1, 2, 5 e 6. Porém com um aporte térmico maior em comparação com as chapas 1, 2, 5 e 6, a tabela 16 apresenta os parâmetros utilizados para as soldas das chapas.

Tabela 16 - Parâmetros do processo da soldagem para as chapas 3, 4, 7 e 8

Chapa	Direção laminação em relação ao cordão de solda	Tensão [V]	Corrente [A]	Aporte térmico médio [kJ/m]
3	Longitudinal	18,5	175	442
4	Transversal	18,5	175	442
7	Transversal	18,5	163,3	543
8	Longitudinal	18,5	163,3	543

Fonte: (O Autor, 2018).

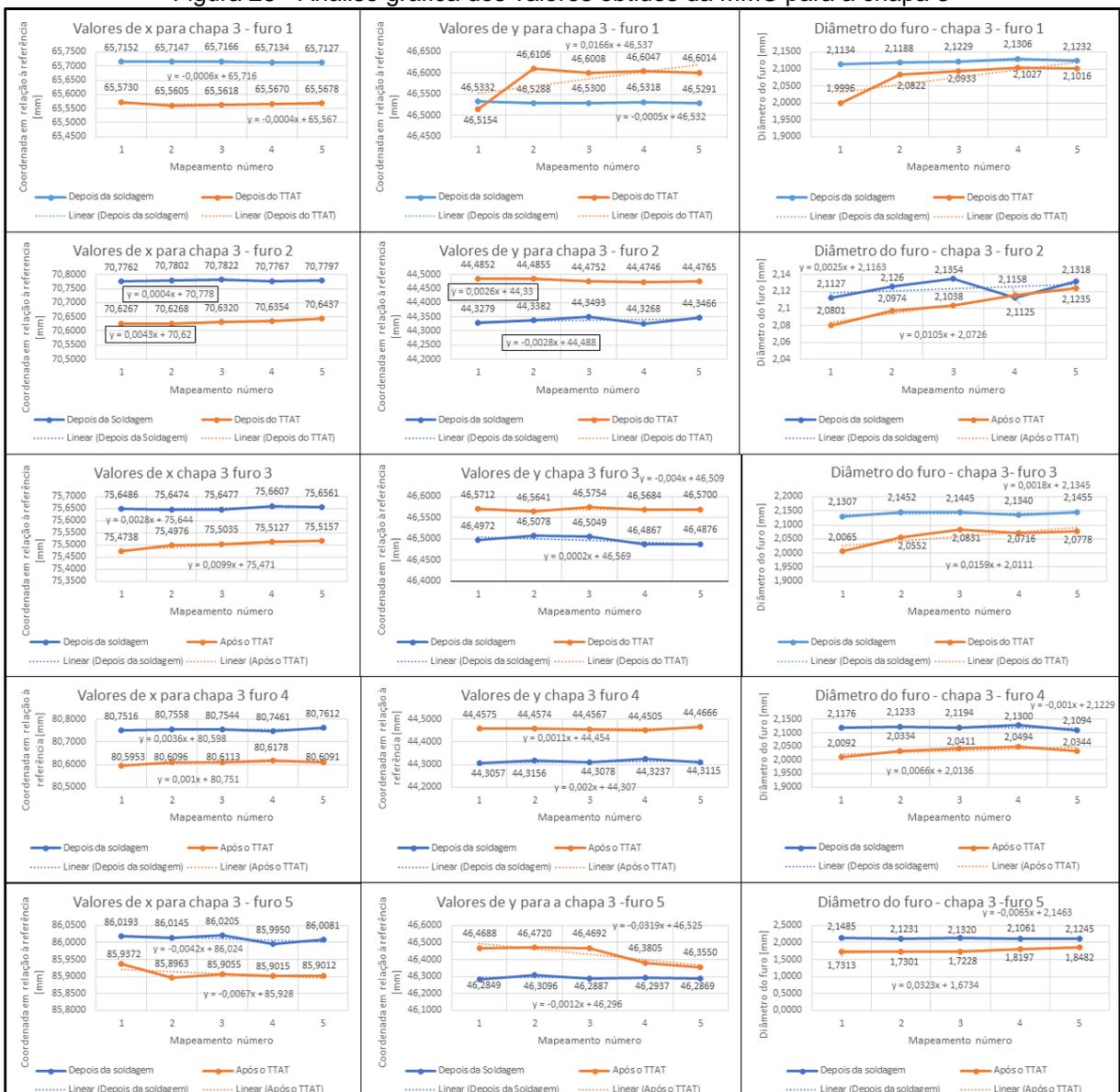
##### 4.3.2.1 Análise dos valores de x e y obtidos a partir do mapeamento na Máquina de Medições de Coordenadas

As figuras 28, 29, 30 e 31 apresenta apresentam as coordenadas de x, y e diâmetro do furo depois da soldagem e após o tratamento térmico de forma gráfica. Cada gráfico refere-se às coordenadas de um furo em particular e de x, y e do diâmetro obtidos da máquina de medição de coordenadas MMC depois do processo de soldagem e após o tratamento térmico de alívio de tensões. A abcissa refere-se à repetição do mapeamento do furo.

Os gráficos demonstram a falta de repetibilidade nas coordenadas de alguns furos que comprometem nos valores inferidos para as tensões residuais.

A figura 28 refere-se a análise gráfica da chapa 3, verifica-se de forma gráfica a falta de repetibilidade das coordenadas, comportamento semelhante com as análises gráficas da seção anterior. A falta de precisão das coordenadas (x, y) no mapeamento na MMC compromete no cálculo da deformação (equação 9), por conseguinte, nos cálculos das tensões residuais de acordo com as equações 10 e 11.

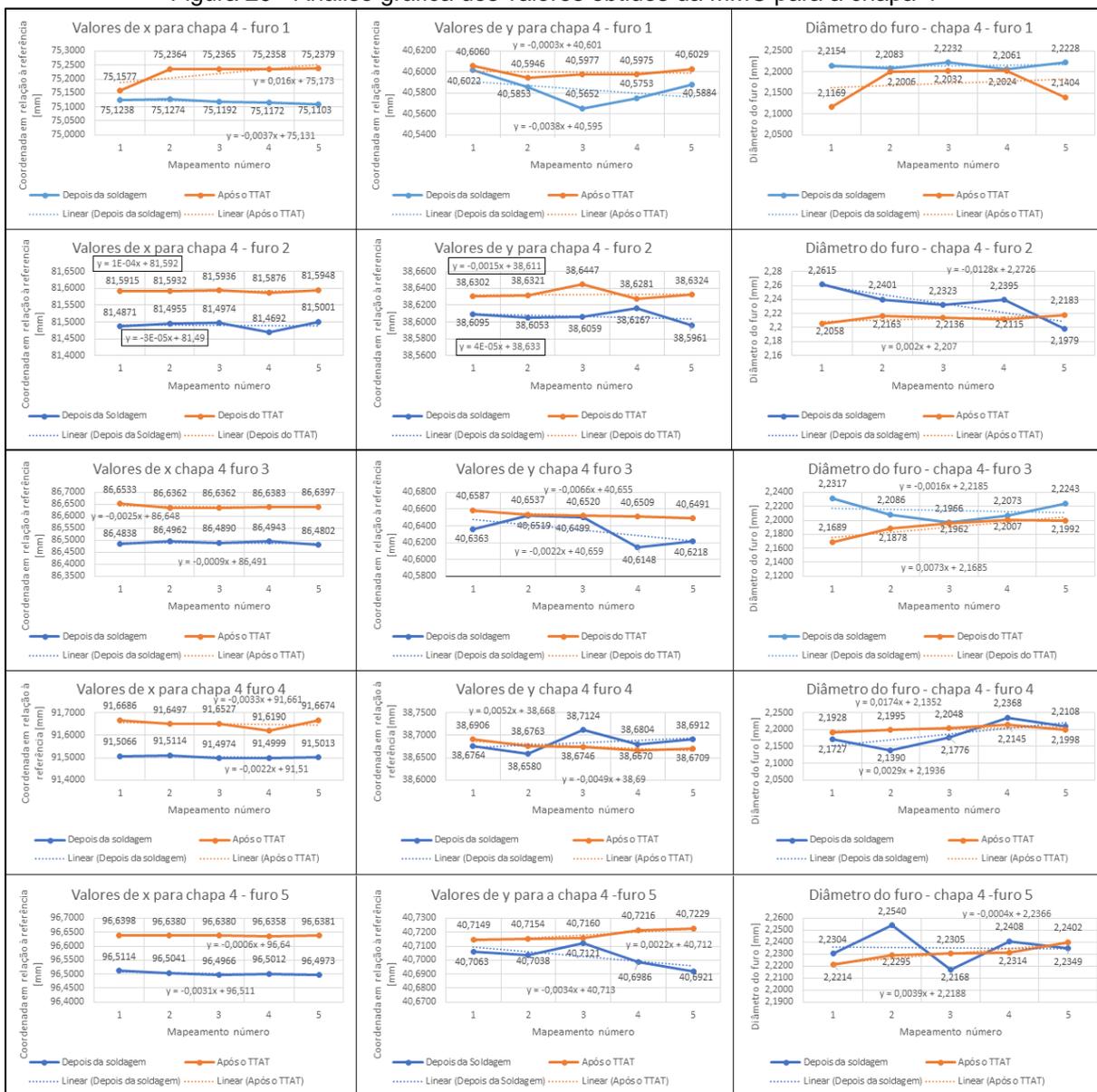
Figura 28 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 3



Fonte: (O Autor, 2018).

A figura 29 refere-se a análise gráfica da chapa 4, observa-se a falta de repetibilidade bem mais evidente em relação aos outros gráficos. Em função disto, nota-se valores das tensões residuais anômalos os quais são obtidas a partir destes valores segundo as equações 9, 10 e 11.

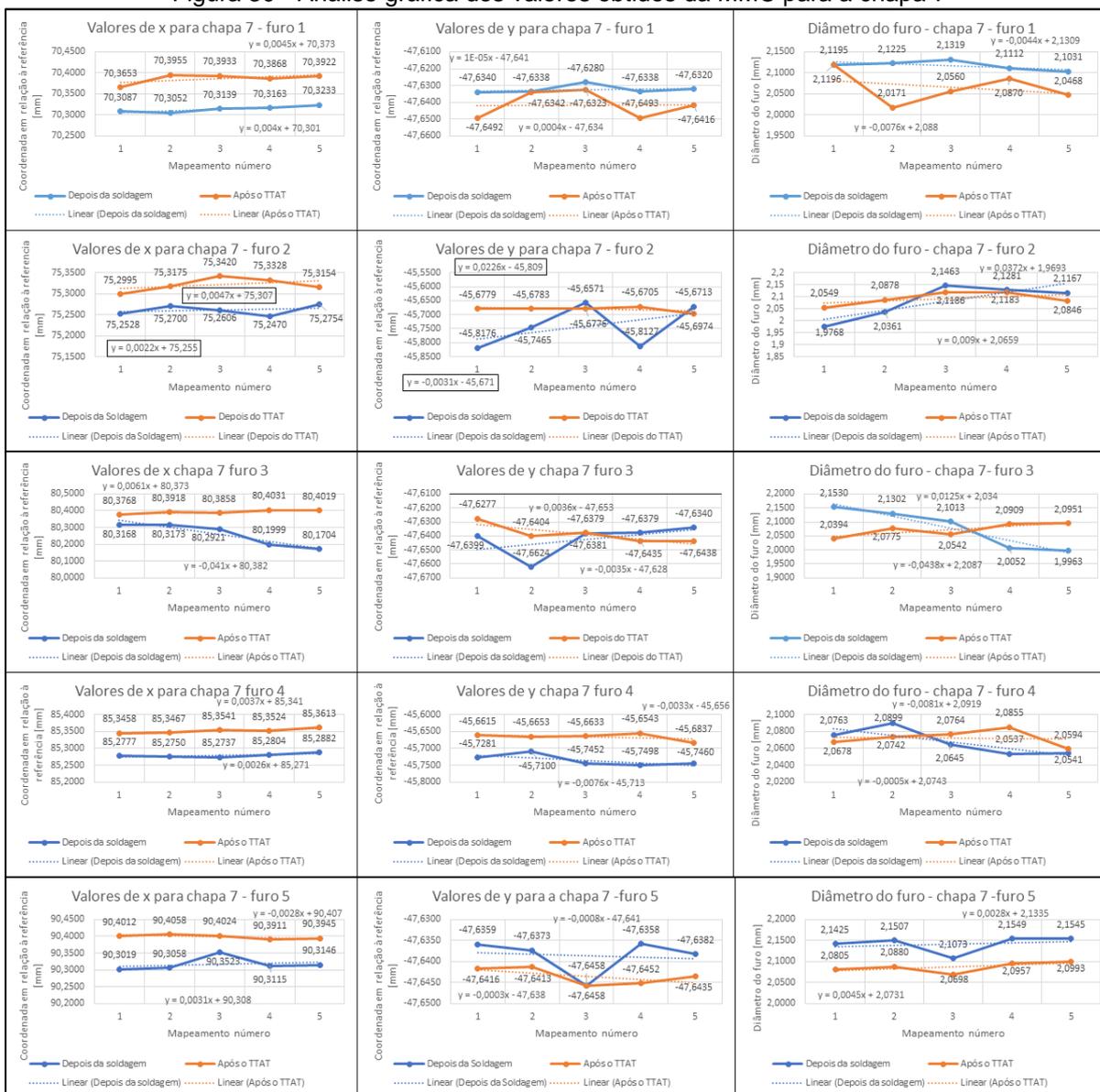
Figura 29 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 4



Fonte: (O Autor, 2018).

A figura 30 refere-se a análise gráfica da chapa 7, onde também se verifica a falta de repetibilidade das coordenadas (x, y) e do diâmetro do furo, comportamento semelhante com as análises anteriores.

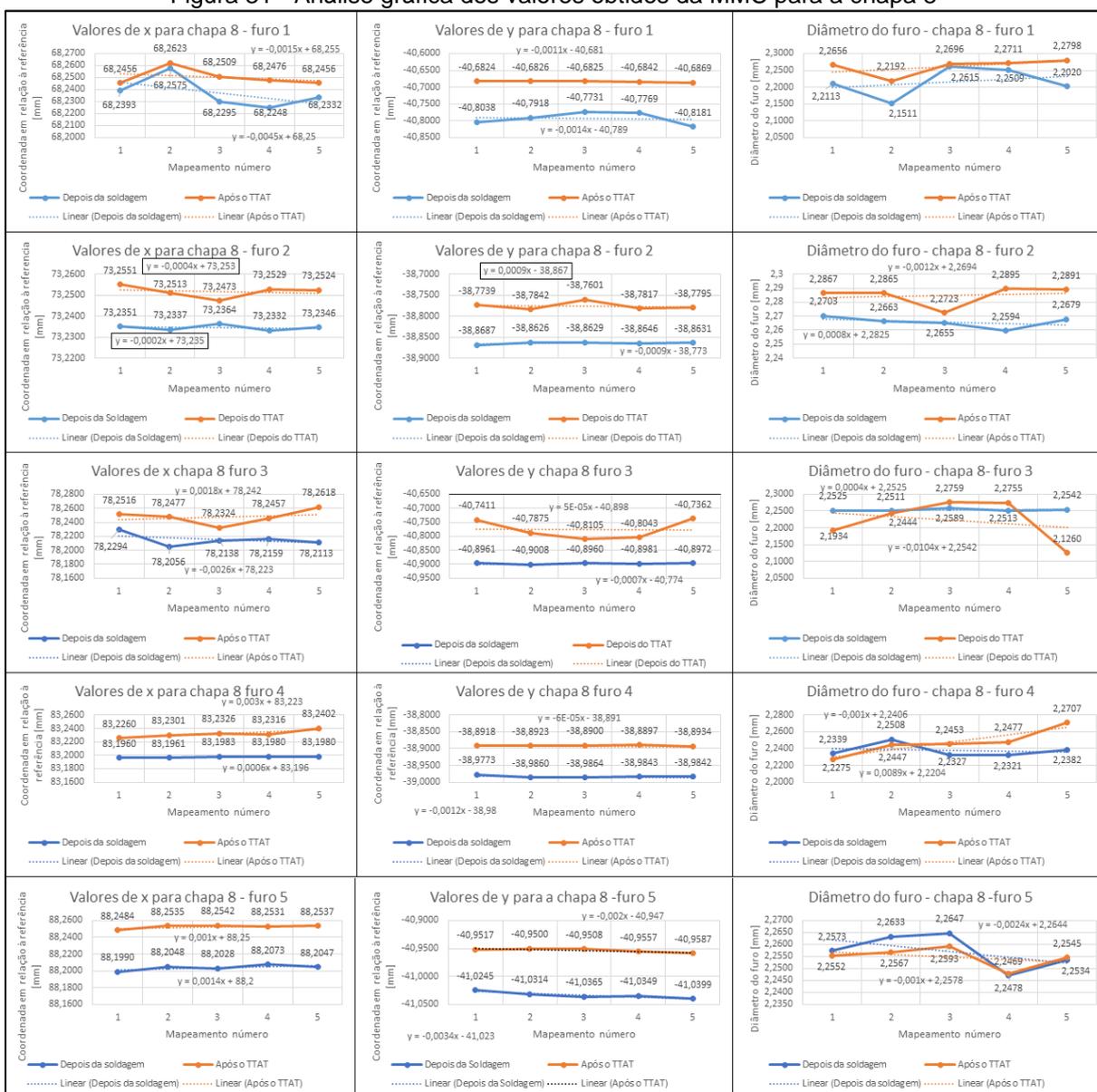
Figura 30 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 7



Fonte: (O Autor, 2018).

A figura 31 refere-se aos valores obtidos a partir do mapeamento na MMC, verifica-se o mesmo comportamento dos gráficos anteriores, isto é, a falta de repetibilidade que tem implicações no cálculo das tensões residuais, como será visto nas seções posteriores.

Figura 31 - Análise gráfica dos valores obtidos da MMC para a chapa 8



Fonte: (O Autor, 2018).

As análises gráficas revelam a falta de repetibilidade no mapeamento da máquina de medições de coordenadas, o qual é devida à deformação do furo como mostrado nas micrografias que se encontram na seguinte seção.

Além disso, apesar de não terem sido feitas análises do furo de referência, como este possui as mesmas características dos furos próximos ao cordão de solda, pode se afirmar que existe uma amplificação dos erros devido à falta de repetibilidade nas medições das coordenadas do furo de referência.

#### 4.3.2.2 Cálculo das Tensões Residuais para as chapas 3, 4, 7 e 8

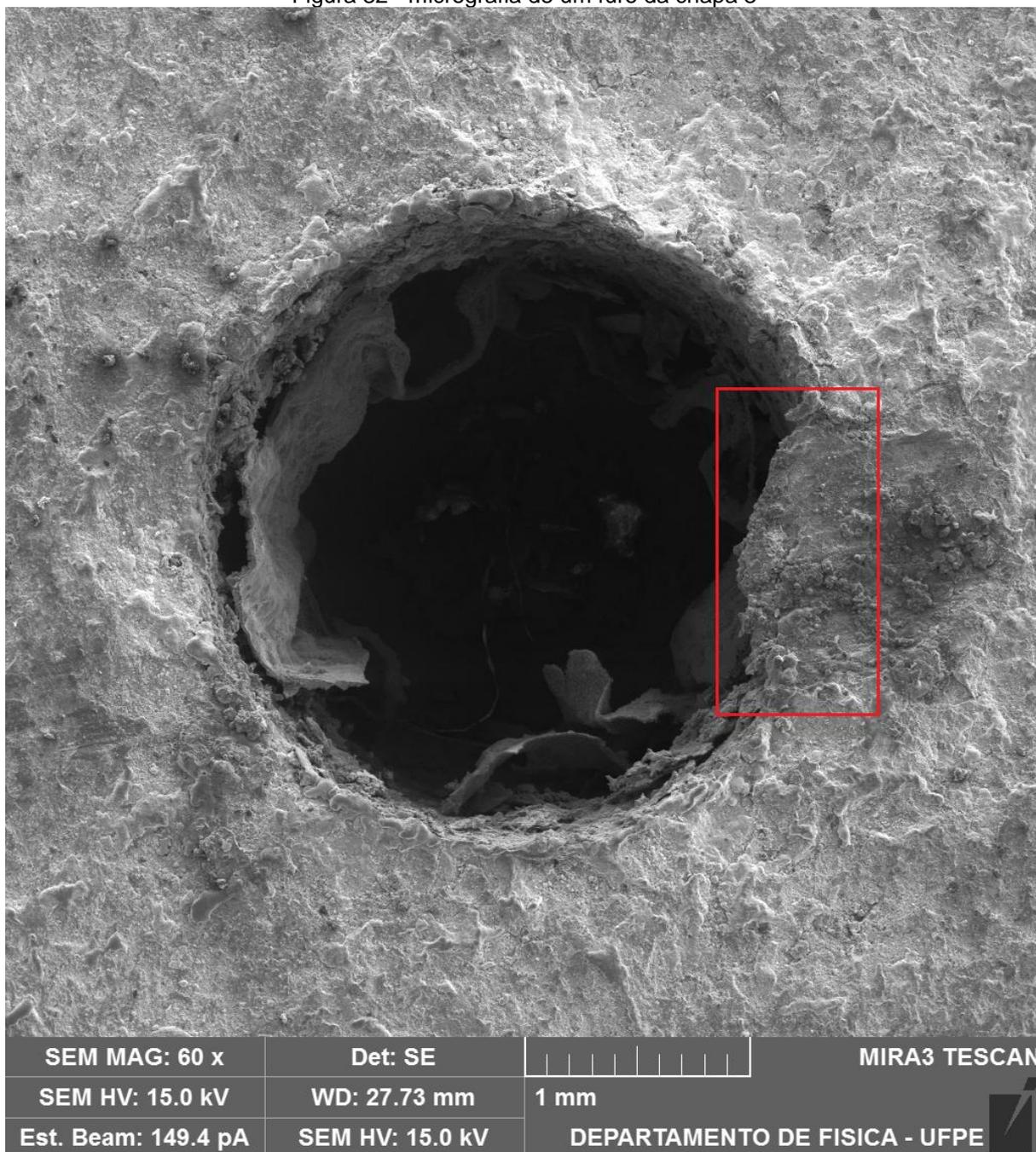
Verifica-se que os valores das tensões residuais inferidas são maiores que a da seção 4.3.1., cuja razão pode ser compreendida devido a solda ser realizada com aporte térmico superior ao das chapas 1, 2, 5 e 6. Nestes processos, isto é soldagem com um maior aporte térmico, a plastificação na ZTA que é cumulativa aumenta ainda mais à cada passe, elevando significativamente o limite de escoamento ao final do processo.

As chapas 3, 4, 7 e 8 apresentam valores anômalos em vários furos, observados principalmente nas chapas 3, 4 e 7.

A análise dos furos no microscópio eletrônico de varredura segundo as seguintes micrografias mostra os defeitos que comprometem no mapeamento dos furos e conseqüentemente nos valores das coordenadas x, y obtidas na MMC, por conseguinte no cálculo da deformação segundo a equação 9 e por sua vez nas tensões residuais de acordo com as equações 10 e 11.

A figura 32 apresenta a micrografia de um furo da chapa 3, a microscopia foi realizada com a chapa depois do tratamento de alívio térmico de tensões. Em destaque observa-se uma das causas do problema que acarreta a falta de repetibilidade no mapeamento na Máquina de Medições de Coordenadas.

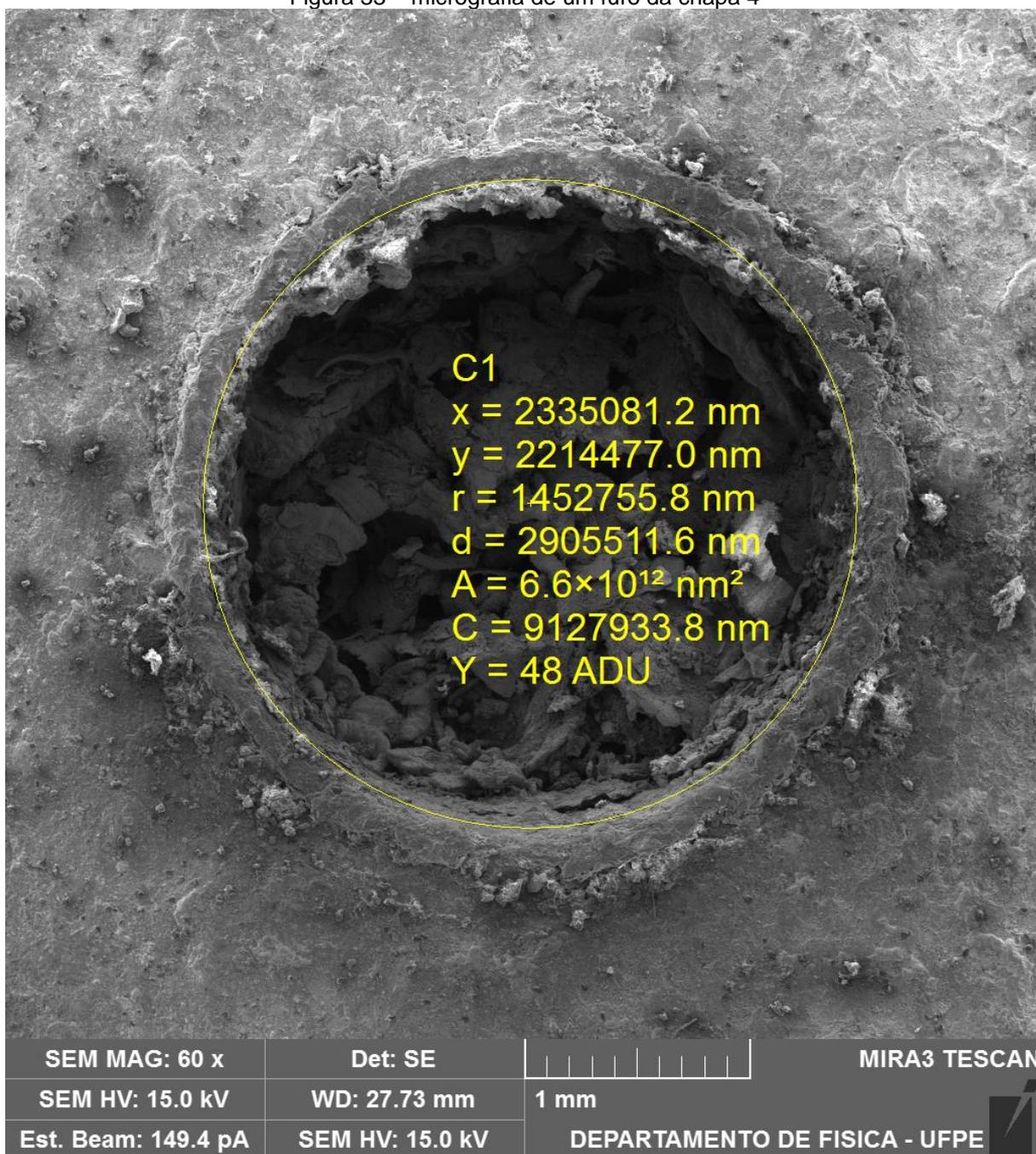
Figura 32 - micrografia de um furo da chapa 3



Fonte: (O Autor, 2018).

A figura 33 mostra a micrografia de um furo da chapa 4, na qual observa-se problemas decorrentes do processo de usinagem do furo, tais como rebarbas, o qual comprometem no mapeamento na MMC.

Figura 33 – micrografia de um furo da chapa 4



Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 17 apresenta os valores para as tensões residuais para a chapa 3 sendo a direção da soldagem longitudinal em relação a direção da laminação. Na tabela observa-se valores anômalos para as tensões residuais destacados em negrito e sublinhados, cuja causa é discutida a partir do terceiro parágrafo da seção 4.3.1.2 Cálculo das Tensões Residuais para a chapas 1, 2, 5 e 6.

Os valores obtidos estão de acordo com o esperado, isto é, verifica-se a diferença entre a tensão residual transversal e a longitudinal devido a anisotropia do metal de base, cuja razão encontra-se no efeito Bauschinger e por sua vez na tensão de recuo.

Em outras palavras, para chapa 3 cuja direção da soldagem é longitudinal em relação a direção da laminação a média dos valores das tensões residual em módulo na direção transversal em relação ao cordão de solda é maior que a média da tensão residual na direção longitudinal em relação ao cordão de solda ( $|\overline{\sigma}_x| = 59,57 \text{ MPa}$   $|\overline{\sigma}_y| = 364,01 \text{ MPa}$ ,  $|\overline{\sigma}_x| < |\overline{\sigma}_y|$ ).

Tabela 17 - Tensões residuais para a chapa 3 (Longitudinal)

Furo (distância da margem do cordão de solda)	$ \sigma_x $ [MPa]	$ \sigma_y $ [MPa]	Tensões Residuais [MPa]
1 (2mm)	123,37	155,25	198,31
3 (2mm)	107,85	218,21	243,41
5 (2mm)	24,61	<b>475,48</b>	<b>476,12</b>
2 (4mm)	23,40	<b>479,28</b>	<b>479,85</b>
4 (4mm)	18,62	<b>491,83</b>	<b>492,19</b>

Fonte: (O Autor, 2018).

Na tabela 18 são apresentados o valor médio das tensões residuais em módulo, o desvio padrão e o intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95% para a chapa 3.

Devido aos valores anômalos nos furos 2, 4 e 5 (destacados em negrito e sublinhados) estão foram desconsiderados nos cálculos apresentados na tabela 18, cuja causa encontra-se na falta da precisão das coordenada x, y referentes as repetições dos 5 mapeamentos realizados na MMC.

Tabela 18 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%

Furo	Média das Tensões residuais [MPa]	Desvio padrão	Intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%
Furos 1, 2, 3, 4 e 5	220,86	31,89	34,43

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 19 apresenta os valores para as tensões residuais para a chapa 4 sendo a direção da soldagem transversal em relação a direção da laminação. Nesta, a média dos valores das tensões residual em módulo na direção transversal em

relação ao cordão de solda é menor que a média da tensão residual na direção longitudinal em relação ao cordão de solda ( $|\overline{\sigma}_x| = 179,61$  MPa  $|\overline{\sigma}_y| = 110,72$  MPa,  $|\overline{\sigma}_x| > |\overline{\sigma}_y|$ ).

Tabela 19 - Tensões residuais para a chapa 4 (Transversal)

Furo (distância da margem do cordão de solda)	$ \sigma_x $ [MPa]	$ \sigma_y $ [MPa]	Tensões Residuais [MPa]
1 (2mm)	149,73	112,73	187,42
3 (2mm)	215,58	138,59	256,28
5 (2mm)	191,97	121,78	227,34
2 (4mm)	165,03	159,93	229,81
4 (4mm)	175,74	20,58	176,94

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 20 apresenta o valor médio das tensões residuais em módulo, o desvio padrão e o intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%.

Tabela 20 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%

Furo	Tensões residuais [MPa]	Desvio padrão	Intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%
Furos 1, 2, 3, 4 e 5	215,56	32,72	19,67

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 21 apresenta as tensões residuais para a chapa 7 cuja direção da soldagem é transversal em relação à direção da laminação.

Para chapa 7 cuja direção da soldagem é transversal em relação a direção da laminação a média dos valores das tensões residual em módulo na direção transversal em relação ao cordão de solda é menor que a média da tensão residual na direção longitudinal em relação ao cordão de solda ( $|\overline{\sigma}_x| = 223,35$  MPa  $|\overline{\sigma}_y| = 166,56$  MPa,  $|\overline{\sigma}_x| > |\overline{\sigma}_y|$ ).

Tabela 21 - Tensões residuais para a chapa 7 (Transversal)

Furo (distância da margem do cordão de solda)	$ \sigma_x $ [MPa]	$ \sigma_y $ [MPa]	Tensões Residuais [MPa]
1 (2mm)	153,35	8,92	153,61
3 (2mm)	305,29	107,24	323,58
5 (2mm)	178,50	33,44	181,61
2 (4mm)	218,90	315,75	<b>384,21</b>
4 (4mm)	260,74	367,45	<b>450,55</b>

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 22 apresenta o valor médio das tensões residuais em módulo para a chapa 7 em conjunto com o desvio padrão e para o intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%. Nesta não foram consideradas os valores dos furos 2 e 4 por apresentarem valores anômalos, cuja causa encontra-se na falta da precisão das coordenadas x, y referentes as 5 repetições do mapeamento dos furos na MMC.

Tabela 22 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%

Furo	Tensões residuais [MPa]	Desvio padrão	Intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%
Furos 1, 2, 3, 4 e 5	219,60	91,13	65,36

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 23 apresenta os valores das tensões residuais para a chapa 8 cuja direção da soldagem é longitudinal à direção da laminação.

Para a chapa cuja direção é longitudinal em relação a direção da laminação, como esperado, a média dos valores das tensões residual em módulo na direção transversal em relação ao cordão de solda é maior que a média da tensão residual na direção longitudinal em relação ao cordão de solda ( $|\bar{\sigma}_x| = 170,50$  MPa  $|\bar{\sigma}_y| = 456,15$  MPa,  $|\bar{\sigma}_x| < |\bar{\sigma}_y|$ ).

Tabela 23 - Tensões residuais para a chapa 8 (Longitudinal)

Furo (distância da margem do cordão de solda)	$ \sigma_x $ [MPa]	$ \sigma_y $ [MPa]	Tensões Residuais [MPa]
1 (2mm)	165,10	<b>498,69</b>	<b>525,31</b>
3 (2mm)	206,37	<b>563,40</b>	<b>600,01</b>
5 (2mm)	170,19	380,90	<b>417,20</b>
2 (4mm)	141,84	<b>407,17</b>	<b>431,17</b>
4 (4mm)	169,02	<b>430,90</b>	<b>426,56</b>

Fonte: (O Autor, 2018).

A tabela 24 apresenta o valor médio das tensões residuais em módulo para a chapa 8 em conjunto com o desvio padrão e o intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%.

Tabela 24 - Média das Tensões Residuais e o respectivo intervalo de confiança ao nível de 95%

Furo	Tensões residuais [MPa]	Desvio padrão	Intervalo de confiança para média das TR ao nível de 95%
Furos 1, 2, 3, 4 e 5	487,25	75,54	45,42

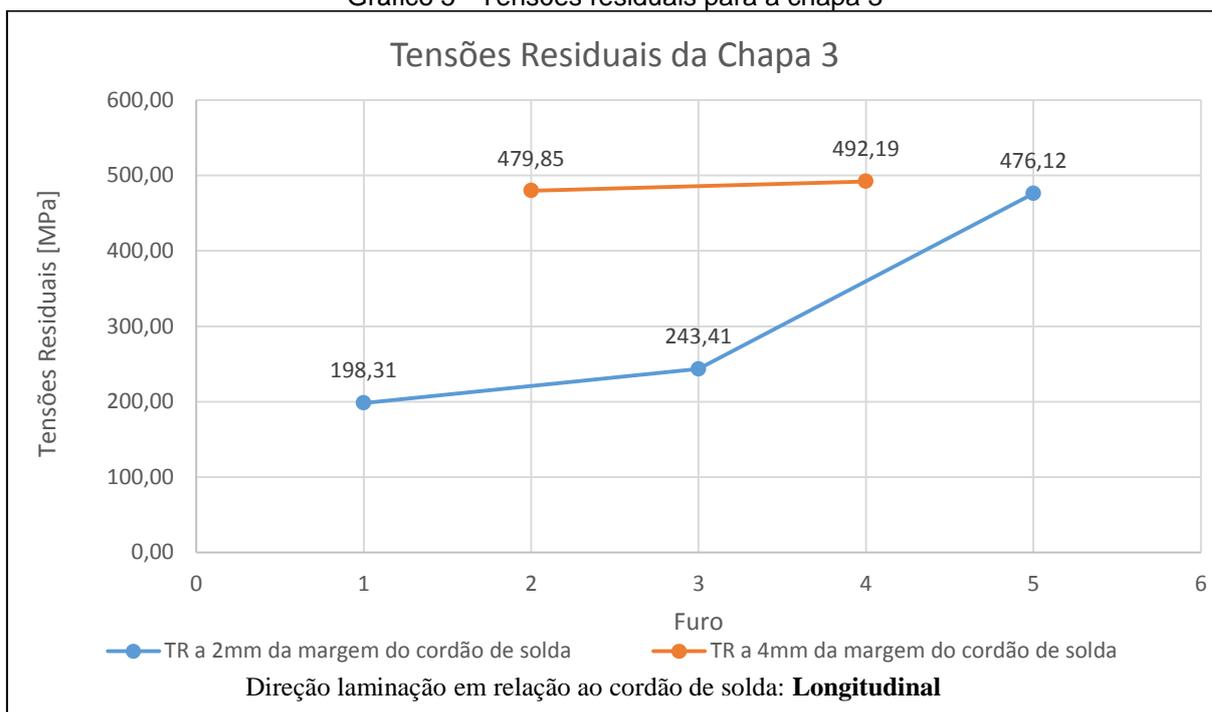
Fonte: (O Autor, 2018).

Os gráficos 5, 6, 7 e 8 apresentam os valores das tensões residuais para as chapas 3, 4, 7 e 8, considerando-se a distância do furo em relação à margem do cordão de solda.

Nos gráficos seguintes apesar dos valores das tensões residuais em alguns casos não se mostrarem claramente numericamente maiores nos furos mais próximos a margem do cordão de solda, os valores se mostram consistentes uma vez que os valores estão próximos devido a pequena diferença entre as distâncias entre os furos em relação à margem do cordão de solda.

No gráfico 5 é apresentado o valor da tensão residual considerando a distância do furo em relação à margem do cordão de solda para a chapa 3.

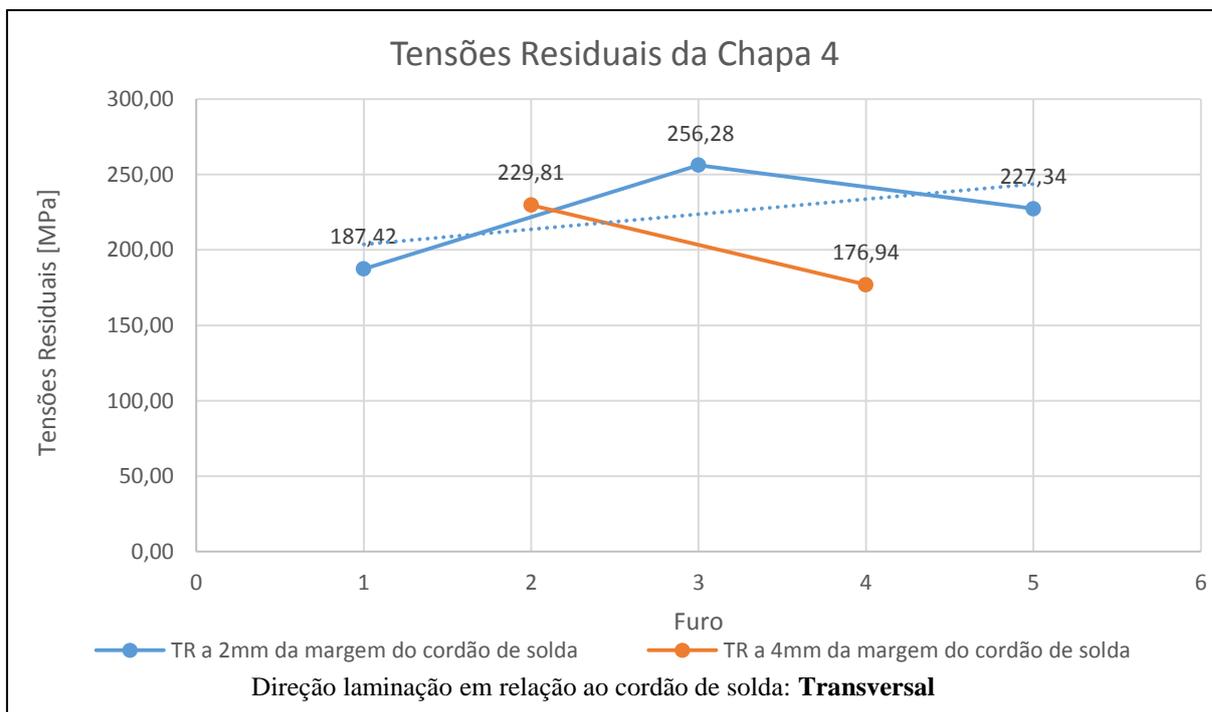
Gráfico 5 - Tensões residuais para a chapa 3



Fonte: (O Autor, 2018).

O gráfico 6 apresenta os valores das tensões residuais considerando-se a localização do furo, apesar do gráfico não mostrar com clareza que os valores das tensões residuais serem maiores numericamente nos furos mais próximos a margem do cordão de solda, em média os valores nos furos 1, 3 e 5 são maiores que a dos furos 2 e 4, de acordo com o esperado

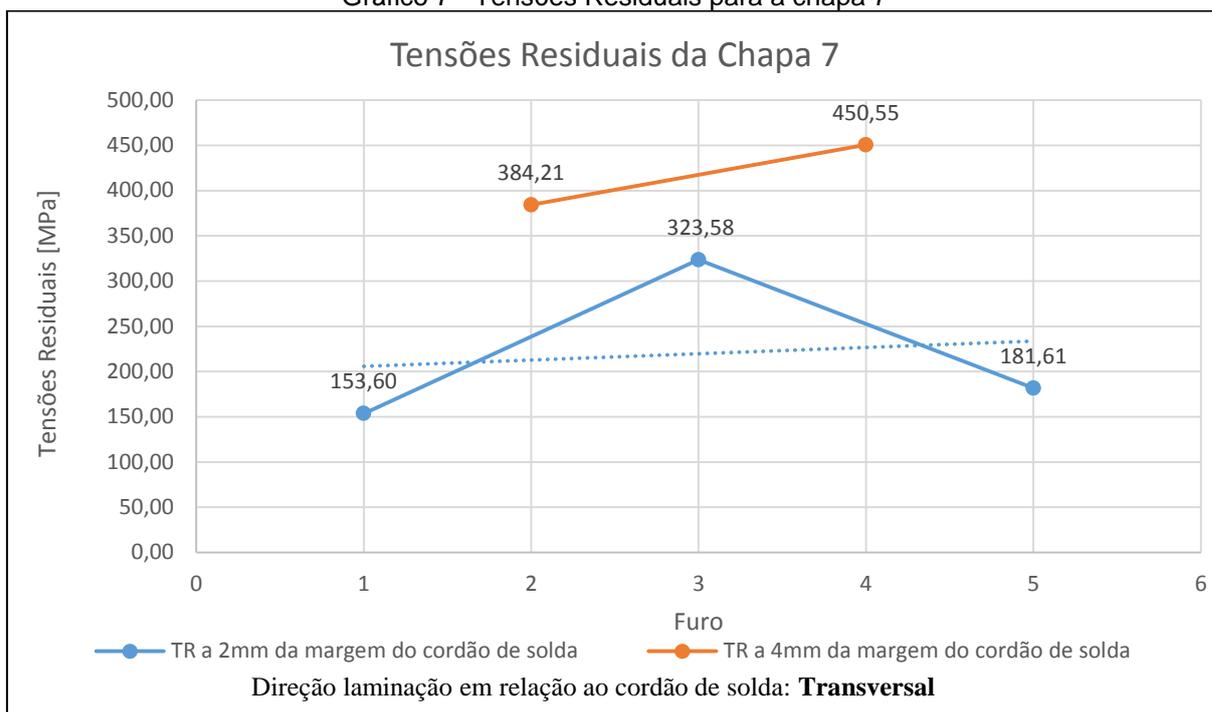
Gráfico 6 - Tensões residuais para a chapa 4



Fonte: (O Autor, 2018).

No gráfico 7 é apresentado o valor da tensão residual considerando se a distância do furo em relação à margem do cordão de solda para a chapa 7.

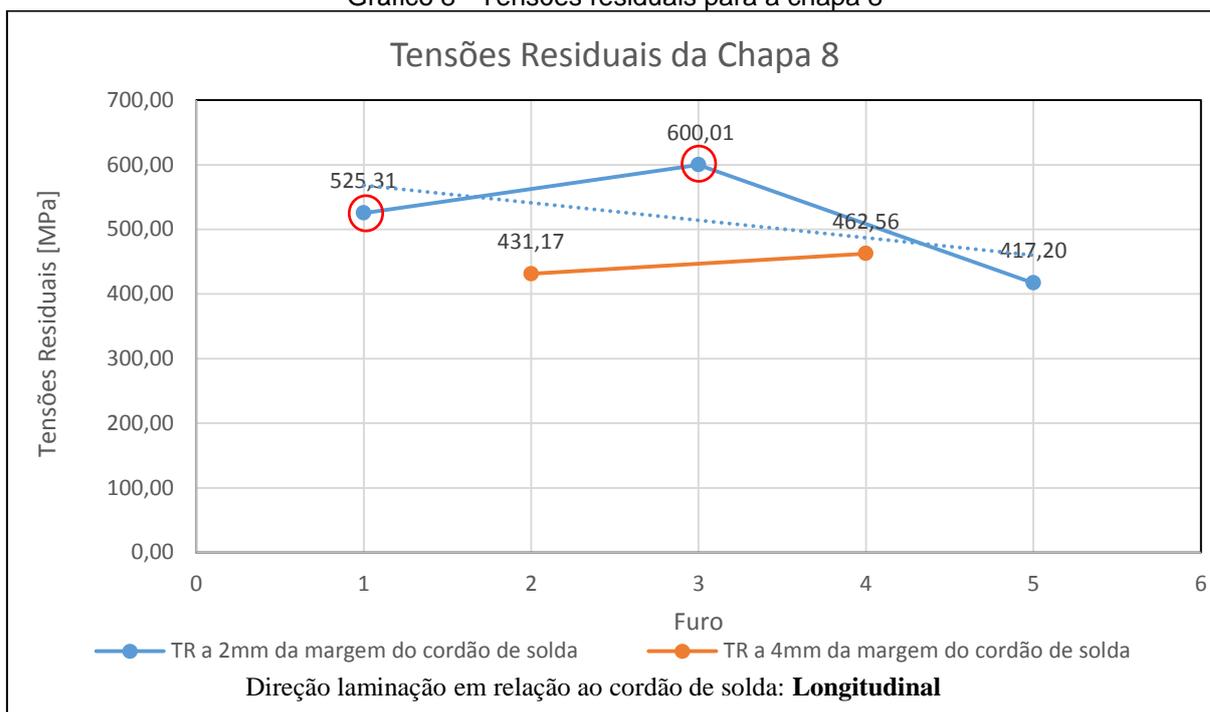
Gráfico 7 - Tensões Residuais para a chapa 7



Fonte: (O Autor, 2018).

O gráfico 8 apresenta os valores das tensões residuais considerando-se a localização do furo. Neste verifica-se valores anômalos marcados com um círculo vermelho, cuja causa encontra-se na falta de precisão das coordenadas x, y referente às 5 repetições dos mapeamentos dos furos na MMC.

Gráfico 8 - Tensões residuais para a chapa 8



Fonte: (O Autor, 2018).

A partir das comparações das tensões residuais, vide tabela 25, verifica-se quando a direção da soldagem é longitudinal à direção da laminação, os valores para a média em módulo das tensões residuais na direção transversal em relação ao cordão de solda é maior que a média em módulo das tensões residuais na direção longitudinal em relação ao cordão de solda, vice-versa para as chapas cuja direção da soldagem é transversal à direção da laminação.

Tabela 25 - Tensões residuais para a chapas 3, 4, 7 e 8

Chapa	Direção	$ \bar{\sigma}_x $ [MPa]	$ \bar{\sigma}_y $ [MPa]
3	Longitudinal	59,57	364,01
4	Transversal	179,61	110,72
7	Transversal	223,35	166,56
8	Longitudinal	170,50	456,15

Fonte: (O Autor, 2018).

A comparação das chapas 2 e 5 com as chapas 3 e 8 cuja direção da laminação em relação ao cordão de solda são as mesmas, ou seja, direção longitudinal, diferindo apenas no aporte térmico, sendo as chapas 3 e 8 aquelas que foram soldadas com um maior aporte térmico, constata-se como esperado e de acordo com a literatura que as tensões residuais aumentam em valor com o aumento do aporte térmico médio, vide tabela 26 e 27.

Nas tabelas 26 e 27 alguns dos furos apresentam valores anômalos, ou seja, valores maiores que o limite de escoamento do metal de base, valores estes destacados em negrito e sublinhados. Cujas causas encontram-se na falta de precisão das coordenadas x, y referentes aos 5 mapeamentos realizados na MMC para cada furo.

Tabela 26 - Comparação das tensões residuais com o aporte térmico

Chapa	Direção laminação	TR médio furos 1, 3 e 5 [MPa]	TR médio furos 2 e 4 [MPa]	Aporte térmico [kJ/m]
2	Longitudinal	146,03	169,04	409
5	Longitudinal	92,88	103,93	390
3	Longitudinal	359,76	<b><u>486,02</u></b>	442
8	Longitudinal	<b><u>514,17</u></b>	<b><u>446,86</u></b>	543

Fonte: (O Autor, 2018).

O mesmo comportamento é verificado para as chapas 1 e 6 com as chapas 4 e 7, as últimas soldadas com um maior aporte térmico.

Tabela 27 - Comparação das tensões residuais com o aporte térmico

Chapa	Direção laminação	TR médio furos 1, 3 e 5 [MPa]	TR médio furos 2 e 4 [MPa]	Aporte térmico [kJ/m]
1	Transversal	140,60	63,58	409
6	Transversal	261,43	86,40	390
4	Transversal	223,68	203,37	442
7	Transversal	219,60	<b><u>417,38</u></b>	543

Fonte: (O Autor, 2018).

Verifica-se também a partir das comparações das tabelas anteriores que independente da direção da laminação em relação ao cordão de solda, as tensões residuais aumentam de acordo com o aporte térmico.

#### 4.3.3 Macrografias das Soldas

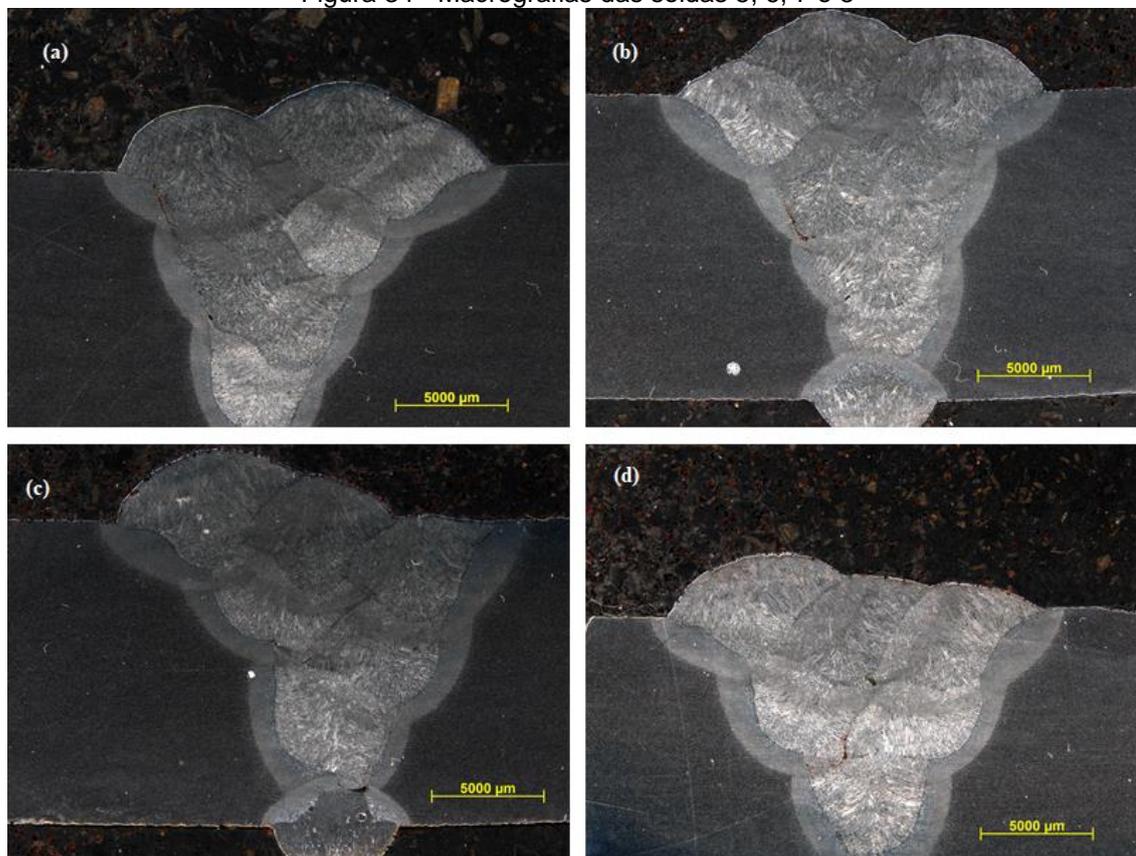
As figuras 34 (a), (b), (c) e (d) referem-se as macrografias da região da junta soldada das chapas número 5, 6, 7 e 8 respectivamente.

Sendo o aporte térmico das chapas 5 e 6 de 390 kJ/m e as tensões residuais respectivamente de 100,56 MPa e 217,67 MPa, assim como, para as chapas 7 e 8 o aporte térmico de 543 kJ/m e as tensões residuais respectivamente de 277,34 MPa e 487,25 MPa.

Observa-se que a largura da zona termicamente afetada para as chapas 5, 6, 7 e 8 apresentam valores respectivamente de 1026  $\mu\text{m}$ , 1048  $\mu\text{m}$ , 1180  $\mu\text{m}$  e de

1307  $\mu\text{m}$ , cujos valores estão coerentes com o aporte térmico devido as soldas 7 e 8 possuírem aporte térmico maiores quando comparados com as soldas 5 e 6.

Figura 34 - Macrografias das soldas 5, 6, 7 e 8



Fonte: (O Autor, 2017).

#### 4.4 Comparação dos valores das tensões residuais obtidas pela técnica da difração dos raios-X com o DPC

A tabela 28 apresenta a comparação dos valores das tensões residuais obtidas na presente pesquisa pela técnica DPC com a técnica da difração dos raios-x de trabalhos anteriores do grupo de pesquisa (Gonçalves, 2015).

Os valores apresentados na tabela 45 inferidos com a técnica da difração dos raios-x e pela técnica DPC utilizam o mesmo metal de base, assim como, o mesmo processo de soldagem, valor do aporte térmico praticamente similares e inferidos na mesma região, ou seja, na região da zona termicamente afetada.

A partir da comparação dos valores das tensões residuais inferidos pela técnica consagrada da difração dos raios-X, verifica-se que os valores inferidos pela técnica DPC estão bastante similares, o qual confere à técnica do Deslocamento dos

Pontos Coordenados como uma técnica confiável para inferir tensões residuais em juntas soldadas.

Tabela 28 - Comparação das tensões residuais

Ponto	Difração de raios-X [MPa]	Técnica DPC [MPa]
1	322 ± 88	256,28 ± 60
2	228 ± 70	227,34 ± 31
3	312 ± 83	229,81 ± 45

Fonte: (O Autor, 2017).

## 5 CONCLUSÃO

A partir do presente estudo, foi verificado como a anisotropia afeta nas tensões residuais em juntas soldadas, ou seja, para as chapas 2, 3, 5 e 8 cuja direção da laminação é longitudinal em relação ao cordão de solda, a tensão longitudinal média ( $\sigma_x$ ) foi de 73,51 MPa e a tensão transversal média ( $\sigma_y$ ) foi de 278,31 MPa,  $\sigma_x < \sigma_y$ .

Para as chapas 1, 4, 6 e 7 cuja direção da laminação é transversal em relação ao cordão de solda, a tensão longitudinal média ( $\sigma_x$ ) foi de 176,51 MPa e a tensão transversal média ( $\sigma_y$ ) foi de 117,42 MPa, sendo nesta:  $\sigma_x > \sigma_y$ . Efeito este justificado pela tensão de recuo.

Assim como, foi observado que pequenas diferenças no afastamento dos pontos, em relação ao cordão de solda, produzem diferenças significativas nas tensões residuais. Bem como, a excentricidade dos furos cuja causa se encontra na usinagem dos furos, produz diferenças significativas nos valores das tensões residuais.

Finalmente, foram verificados como o aporte térmico influencia significativamente nos valores das tensões residuais. A plastificação é intensificada aumentando o encruamento, por conseguinte, elevando os valores das tensões residuais.

## 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Realização da modelagem computacional utilizando os valores obtidos pelo grupo de pesquisa tanto para a simulação quanto para a validação do modelo matemático.
- b) Modelagem matemática para previsão das distorções devido ao processo da soldagem. Bem como o estudo da minimização através dos modelos matemáticos para a minimização das distorções.
- c) Planejamento de experimentos para o estudo da minimização das tensões residuais assim como, estudo mais abrangente da Zona Termicamente Afetada para melhorar a tenacidade do material.

## REFERÊNCIAS

A.S.T.M. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method. ASTM International, 2013.

A.W.S. Standard welding terms and definitions. Miami, FL: American Welding Society, 1994.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th Edition: Ninth Edition. John Wiley and Sons, Incorporated, 2013.

CHRISTODOULOU, N.; WOO, O.; MACEWEN, S. Effect of stress reversals on the work hardening behaviour of polycrystalline copper. *Acta Metallurgica*, v. 34, n. 8, p. 1553-1562, 1986.

CHUN, B. K.; JINN, J. T.; LEE, J. K. Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part I: theory. *International Journal of Plasticity*, v. 18, n. 5, p. 571-595, 2002

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. Elements of X-Ray Diffraction (3rd Edition). Pearson, 2001.

DENG, D. FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects. *Materials & Design*, v. 30, n. 2, p. 359-366, 2009.

DOWLING, N. Comportamento Mecânico dos Materiais: Tradução da 4a edição. Elsevier Editora Ltda., 2017.

ESPOSITO, L. Type IV creep cracking of welded joints: numerical study of the grain size effect in HAZ. *Procedia Structural Integrity*, v. 2, p. 919-926, 2016

FENG, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion. Elsevier Science, 2005.

FITZPATRICK, M.; FRY, A.T.; HOLDWAY, P.; KANDIL, F.A.; SHACKLETON, J.; SUOMINEN, L. Determination of residual stresses by X-ray diffraction. 2005.

FITZPATRICK, M. E.; LODINI, A. Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation. CRC Press, 2003.

GERY, D.; LONG, H.; MAROPOULOS, P. Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 167, n. 2, p. 393-401, 2005

GONÇALVES, I.; BARROS, P.S.; de MELO, L.G.T.C.; PINA, E.A.C.; SUGAHARA, H.J.; YADAVA, Y.P.; FERREIRA, R.A.S. Influência da temperatura no tratamento de alívios de tensões em uma junta soldada baseado no deslocamento de pontos coordenados. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016

GONÇALVES, I. L. Influência da temperatura no tratamento de alívios de tensões em uma junta soldada baseado no método DPC. 2015. (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco

HASEGAWA, T.; YAKOU, T.; KARASHIMA, S. Deformation behaviour and dislocation structures upon stress reversal in polycrystalline aluminium. *Materials Science and Engineering*, v. 20, p. 267-276, 1975.

HASHIMOTO, T.; OSAWA, Y.; HIRANO, S.; MOCHIZUKI, M.; NISHIMOTO, K. Accuracy improvement of X-ray residual stress measurement in welds of Ni based alloy by two-dimensional detector with multiaxial rocking. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 16, n. 3, p. 261-266, 2011

HENRY PETROSKI 2019. Disponível em:  
< [https://www.brainyquote.com/quotes/henry\\_petroski\\_694516](https://www.brainyquote.com/quotes/henry_petroski_694516) >. Acesso em 08 Dezembro 2019.

HU, J.; CHEN, B.; SMITH, D. J.; FLEWITT, P. E. J.; COCKS, A. C. F. On the evaluation of the Bauschinger effect in an austenitic stainless steel—The role of multi-scale residual stresses. *International Journal of Plasticity*, v. 84, p. 203-223, 2016

IGNATIEV, A.; EROFEEV, V.; TRETYAKOV, A. Residual Stress Measurements Using Elasto-plastic Indentation and ESPI. *Materials Science Forum*, 2016, Trans Tech Publ. p.161-166.

JAVADI, Y.; HASANI, M.; SADEGHI, S. Investigation of Clamping Effect on the Welding Sub-surface Residual Stress and Deformation by Using the Ultrasonic Stress Measurement and Finite Element Method. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 34, n. 1, p. 3, January 31 2015.

KANDIL, F.; LORD, J.D.; FRY, A.T.; GRANT, P.V. A review of residual stress measurement methods. *A Guide to Technique Selection*, NPL, Report MATC (A), v. 4, 2001.

KASUYA, T.; YURIOKA, N.; OKUMURA, M. Methods for predicting maximum hardness of heat-affected zone and selecting necessary preheat temperature for steel welding. *Nippon Steel Technical Report*, p. 7-14, 1995.

KIM, J.-S.; LEE, B.-Y.; HWANG, W.-G.; KANG, S.-S. The Effect of Welding Residual Stress for Making Artificial Stress Corrosion Crack in the STS 304 Pipe. 2015. 1-7.

KIM, K.; JUNG, H. Nondestructive Testing of Residual Stress on the Welded Part of Butt-welded A36 Plates Using Electronic Speckle Pattern Interferometry. *Nuclear Engineering and Technology*, v. 48, n. 1, p. 259-267, 2016

KRISHNAMOORTHY, K. S.; KRISHNAMOORTHY, V. R.; PENNATHUR, A. A First Course in Quality Engineering: Integrating Statistical and Management Methods of Quality, Third Edition. CRC Press, 2018.

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

MACH, J. C., BUDROW, C. J.; PAGAN, D. C.; RUFF, J. P. C.; PARK, J. S.; OKASINSKI, J.; BEAUDOIN, A. J.; MILLER, M. P. Validating a Model for Welding Induced Residual Stress Using High-Energy X-ray Diffraction. *JOM*, v. 69, n. 5, p. 893-899, 2017

MAMUN, A. A.; MOAT, R. J.; KELLEHER, J.; BOUCHARD, P. J. Origin of the Bauschinger effect in a polycrystalline material. *Materials Science and Engineering: A*, v. 707, p. 576-584, 2017

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Ed. da UFMG, 2005.

MASUBUCHI, K. Analysis of welded structures : residual stresses, distortion, and their consequences. Oxford; New York, 1980.

MELO, L. G. T. C. D. Influência de parâmetros de soldagem GMAW no cálculo de tensões residuais através do método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC) em chapas navais. 2017. (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco

MENDES, C. E.; MELO, L.G. T. C.; BARROS, P.S.; ROLIM, T. L.; YADAVA, Y. P.; FERREIRA, R. A. S. The Back Stress Behavior Study Analyzed in Residual Stress of Welded Naval Plates in Different Lamination Directions and Different Thermal Contributions. *Materials Research*, v. 20, p. 722-728, 2017.

MILLER, M.; HARLEY, E.; BAMMANN, D. Reverse yield experiments and internal variable evolution in polycrystalline metals. *International Journal of Plasticity*, v. 15, n. 1, p. 93-117, 1999.

MISSORI, S.; COSTANZA, G.; SILI, A.; TATA, M. E. Metallurgical modifications and residual stress in welded steel with average carbon content. *Welding International*, v. 29, n. 2, p. 124-130, 2015

MOCHIZUKI, M. Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress–corrosion cracking. *Nuclear Engineering and Design*, v. 237, n. 2, p. 107-123, 2007

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem - fundamentos e tecnologia. UFMG, 2005.

NARAYANAN, P. R.; SUWAS, S.; SINHA, P.P.; RANGANATHAN, S. Anisotropy in Residual Stress Measurements in Aluminum Alloys Used in the Aerospace Industry. *Materials Performance and Characterization*, v. 6, n. 3, p. 362-375, 2017.

NASIR, N. S. M.; RAZAB, M. K. A. A.; MAMAT, S.; IQBAL, M. Review on welding residual stress. *stress*, v. 2, n. 5, p. 8-10, 2006.

NOYAN, I. C.; COHEN, J. B. Residual stress: measurement by diffraction and interpretation. Springer, 2013.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. Engenharia de soldagem e aplicações. LTC, 1982.

QIAN, Z.; CHUMBLEY, S.; KARAKULAK, T.; JOHNSON, E. The Residual Stress Relaxation Behavior of Weldments During Cyclic Loading. 2013.

QOZAM, H.; CHAKI, S.; BOURSE, G.; ROBIN, C.; WALASZEK, H.; BOUTEILLE, P. Microstructure Effect on the Lcr Elastic Wave for Welding Residual Stress Measurement. *Experimental Mechanics*, v. 50, n. 2, p. 179-185, February 01 2010.

R. CHAKRABARTI, P. B., S. C. SAHA. A Review on Welding Residual Stress Measurement by Hole Drilling Technique and its Importance. *Journal of Welding and Joining*, v. 36, n. 4, p. 75-82, 08 2018.

RADAJ, D. Welding residual stress and distortion. In: (Ed.). Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992. p.129-246.

SANDIFER, J.; BOWIE, G. Residual stress by blind-hole method with off-center hole. *Experimental Mechanics*, v. 18, n. 5, p. 173-179, 1978.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods*, v. 9, n. 7, p. 671-5, Jul 2012.

SIQUEIRA FILHO, A. V.; GUIMARÃES, P. B.; CARDOSO, F. I. B.; MACIEL, T. M.; YADAVA, Y. P.; ROLIM, T.L.; FERREIRA, R. A. S. Development of methodology for measurements of residual stresses in welded joint based on displacement of points in a coordinated table. *Materials Research*, v. 16, p. 322-326, 2013.

SMITH, M. C.; SMITH, A. C.; OHMS, C.; WIMPORY, R. C. The NeT Task Group 4 residual stress measurement and analysis round robin on a three-pass slot-welded plate specimen. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 164, p. 3-21, 2018

TENG, T.-L.; CHANG, P.-H.; TSENG, W.-C. Effect of welding sequences on residual stresses. *Computers & structures*, v. 81, n. 5, p. 273-286, 2003.

TSUJI, A.; OKANO, S.; MOCHIZUKI, M. Method of X-ray residual stress measurement for phase transformed welds. *Welding in the World*, v. 59, n. 4, p. 577-583, 2015.

VOURNA, P.; K TENA, A.; TSAKIRIDIS, P.E.; HRISTOFOROU, E. A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels. *NDT & E International*, v. 71, p. 33-42, 2015. ISSN 0963-8695.

WEBSTER, G. A.; EZEILO, A. N. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes. *International Journal of Fatigue*, v. 23, p. 375-383, 2001

WITHERS, P.; BHADESHIA. Residual stress. Part 1: Measurement techniques. 2001. 355-365.

XUE, W.; PAN, Q.-G.; REN, Y.-Y.; SHANG, W.; ZENG, H.-Q.; LIU, H. Microstructure and type IV cracking behavior of HAZ in P92 steel weldment. *Materials Science and Engineering: A*, v. 552, p. 493-501, 2012.

YOSHIDA, F.; UEMORI, T. A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation. *International Journal of Plasticity*, v. 18, n. 5, p. 661-686, 2002

ZHAO, Q.; CHEN, K.; CHEN, M.; BRISEGHELLA, B.; GUO, Z.; YANG, G. Use of Plastic Correction Formula to Improve Accuracy of Welding Residual Stress Test with Blind-Hole Method. *Transactions of Tianjin University*, v. 24, n. 5, p. 480-488, September 01 2018.