

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica  
PPMec

Maurício de Oliveira Silva

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES E DO GRAU DE RESTRIÇÃO  
NA DISTORÇÃO ANGULAR EM SOLDAGEM MIG/MAG DOS AÇOS  
INOXIDÁVEIS 304L E 316L**

Dissertação para Obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia Mecânica

Rio Grande  
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica  
PPMec

Maurício de Oliveira Silva

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES E DO GRAU DE RESTRIÇÃO  
NA DISTORÇÃO ANGULAR EM SOLDAGEM MIG/MAG DOS AÇOS  
INOXIDÁVEIS 304L E 316L**

Orientador: Professor Douglas Bezerra de Araújo, Dr.

Rio Grande  
2015

Maurício de Oliveira Silva

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES E DO GRAU DE RESTRIÇÃO  
NA DISTORÇÃO ANGULAR EM SOLDAGEM MIG/MAG DOS AÇOS  
INOXIDÁVEIS 304L E 316L**

Dissertação apresentada à Universidade  
Federal do Rio Grande – FURG, como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de  
Fabricação

Data: 30/03/2015

Resultado: APROVADA

**Banca Examinadora:**

Douglas B. de Araújo

Orientador: Professor Douglas Bezerra de Araújo, Dr. (PPMec/FURG)

L. O. Vilarinho

Professor Louriel Oliveira Vilarinho Dr. (Pós Graduação em Engenharia Mecânica-UFU)

Ruham Pablo Reis

Professor Ruham Pablo Reis, Dr. (Pós Graduação em Engenharia Mecânica-UFU)

Luciano Volcanoglo Biehl

Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl  
Coordenador do PPMec/FURG

Dedico este trabalho a minha família

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Douglas Bezerra de Araújo pela ajuda durante a execução deste trabalho.

A Daniel Souza pelo incentivo e ajuda durante todos os ensaios dos experimentos.

Aos professores membros da banca examinadora que se disponibilizaram a contribuir para a realização desta dissertação.

Aos professores Cleiton Rodrigues Teixeira, Carlos A. M. Casanova, Luciano Volcanoglo Biehl pela amizade e auxílio na realização deste trabalho.

Aos colegas Fabio, Ederson, Márcio, Leonardo, Rodrigo, Vagner, pela amizade e aprendizagem.

À FAPERGS pelo apoio financeiro.

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>01</b>
<b>2</b>	<b>Revisão de literatura .....</b>	<b>03</b>
<b>2.1</b>	<b>Aços inoxidáveis .....</b>	<b>03</b>
<b>2.2</b>	<b>Tipos de aços inoxidáveis .....</b>	<b>04</b>
2.2.1	Aços inoxidáveis austeníticos .....	04
2.2.2	Aços inoxidáveis ferríticos .....	04
2.2.3	Aços inoxidáveis dúplex .....	05
2.2.4	Aços inoxidáveis martensíticos .....	05
2.2.5	Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação .....	06
<b>2.3</b>	<b>Tipos de aços inoxidáveis austeníticos .....</b>	<b>06</b>
2.3.1	Aços inoxidáveis austeníticos 304 e 304L .....	09
2.3.2	Aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L .....	09
<b>2.4</b>	<b>Processo de soldagem MIG/MAG .....</b>	<b>11</b>
<b>2.5</b>	<b>Energia de soldagem .....</b>	<b>12</b>
<b>2.6</b>	<b>Distorções no processo de soldagem .....</b>	<b>12</b>
2.6.1	Maneiras de reduzir a distorção no processo de soldagem .....	16
2.6.1.1	No projeto de estruturas soldadas .....	17
2.6.1.2	Na fabricação .....	19
2.6.1.3	Após a soldagem (correção da distorção) .....	23
<b>3</b>	<b>Materiais e métodos .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais utilizados .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>25</b>
3.2.1	Parametrização .....	26
3.2.1.1	Fonte de soldagem e alimentador de arames .....	27
3.2.1.2	Determinação do arame-eletrodo .....	28
3.2.1.3	Gás de proteção utilizado nas soldagens .....	31
3.2.1.4	Sistema de translação da tocha .....	32
3.2.2	Confecção das placas de teste para soldagem .....	32
3.2.3	Confecção do suporte de fixação das placas de teste .....	35
3.2.4	Medição com a máquina de medir coordenadas .....	36
3.2.5	Procedimento de soldagem .....	39
3.2.5.1	Soldagem das placas de aço AISI 304L .....	40

3.2.5.2	Soldagem das placas de teste do aço AISI 316L .....	42
3.2.6	Medição do ângulo de distorção .....	43
<b>4</b>	<b>Resultados e discussão .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Parametrização soldagem das placas de 304L .....</b>	<b>45</b>
4.2.1	Passe de raiz .....	45
4.2.2	Passe de raiz + 1 passe de enchimento .....	46
4.2.3	Passe de raiz + 2 passes de enchimento .....	47
<b>4.3</b>	<b>Parametrização soldagem das placas de 316L .....</b>	<b>48</b>
4.3.1	Passe de raiz .....	48
4.3.2	Passe de raiz + 1 passe de enchimento .....	49
4.3.3	Passe de raiz + 2 passes de enchimento .....	50
<b>4.4</b>	<b>Medição inicial de coordenadas .....</b>	<b>51</b>
<b>4.5</b>	<b>Medição placas de 304L na máquina de medir coordenadas após a soldagem .....</b>	<b>53</b>
4.5.1	Medição 304L - passe de raiz + 1 passe de enchimento – sem restrição .....	53
4.5.2	Medição 304L - passe de raiz + 2 passes de enchimento – sem restrição .....	58
4.5.3	Medição 304L - passe de raiz + 1 passe de enchimento – com restrição .....	62
4.5.4	Medição 304L - passe de raiz + 2 passes de enchimento – com restrição .....	66
4.5.5	Comparação das deformações com passe de raiz + 1 passe de enchimento e passe de raiz + 2 passes de enchimento, com e sem restrições .....	70
<b>4.6</b>	<b>Medição placas de 316L na máquina de medir coordenadas após a soldagem .....</b>	<b>72</b>
4.6.1	Medição 316L - passe de raiz + 1 passe de enchimento – sem restrição .....	72
4.6.2	Medição 316L - passe de raiz + 2 passes de enchimento – sem restrição .....	77
4.6.3	Medição 316L - passe de raiz + 1 passe de enchimento – com	

	restrição .....	81
4.6.4	Medição 316L - passe de raiz + 2 passes de enchimento – com restrição .....	85
4.6.5	Comparação das deformações com passe de raiz + 1 passe de enchimento e passe de raiz + 2 passes de enchimento, com e sem restrições .....	89
<b>4.7</b>	<b>Comparação geral .....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>95</b>
	<b>Apêndices .....</b>	<b>98</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1	Esquema de soldagem MIG/MAG .....	11
Figura 2.2	(a) Imperfeição geométrica inicial de um painel enrijecido de um bloco de plataforma semissubmersível. (b) Problema de Distorção angular em um painel de um Navio Sonda .....	13
Figura 2.3	Distorção em função do tempo de aquecimento e resfriamento.....	14
Figura 2.4	Representação dos tipos básicos de distorção em uma junta soldada .....	15
Figura 2.5	Exemplos de distorções complexas causadas pelo processo de soldagem .....	16
Figura 2.6	Diminuição da distorção com técnicas utilizadas no projeto de soldagem .....	18
Figura 2.7	Técnicas para reduzir a distorção (a) Soldagem com passes intermitentes (b) Soldagem com redução do número de passes (c) Soldagem próximo a linha neutra (d) Soldagem balanceada .....	19
Figura 2.8	Métodos de reduzir a distorção (a) Soldagem reversa (b) Peças pré-ajustadas .....	20
Figura 2.9	Técnicas para reduzir a distorção (a) Pré-dobrado (b) Braçadeiras em contraposição (c) Soldagem sequencial (d) Soldagem sequencial .....	21
Figura 2.10	Técnica para reduzir a distorção utilizando calços .....	22
Figura 2.11	Método de redução da distorção. Desempenho com aquecimento localizado .....	23
Figura 3.1	Fluxograma do roteiro de passos executados nesse trabalho .....	26
Figura 3.2	(a) Fonte de soldagem (Lincoln Electric) (b) Alimentador de arame (Lincoln Electric) .....	27
Figura 3.3	Regiões do diagrama de Schaeffler que são suscetíveis a problemas na zona fundida .....	28
Figura 3.4	Resultado da simulação da composição química da zona fundida utilizando o diagrama de Schaeffler (Diluição utilizada = 30%) .....	29
Figura 3.5	Resultado da simulação da composição química da zona fundida utilizando o diagrama de Schaeffler (Diluição utilizada = 30%).....	31

Figura 3.6	(a) Ilustração dos 6 graus de liberdade do robô de soldagem. (b) Área de alcance da tocha de soldagem no robô .....	32
Figura 3.7	Dimensões da seção transversal da placa de teste (comprimento de 200mm) .....	33
Figura 3.8	Equipamento de Corte a Plasma .....	34
Figura 3.9	Aplainamento para ajuste do ângulo do chanfro e retirada da zona termicamente afetada pelo corte térmico .....	34
Figura 3.10	Ponteamto das placas de teste para manutenção da abertura requerida (as setas em amarelo mostram as posições dos pontos de solda) .....	35
Figura 3.11	Projeto suporte para fixação das placas de teste .....	35
Figura 3.12	Suporte para fixação das placas de teste (atentar para o rasgo na base do suporte para proporcionar soldagem) .....	36
Figura 3.13	Pontos de medição do plano de referencia da máquina de coordenadas [mm] .....	37
Figura 3.14	Malha das localizações das medições de distorção [mm] .....	38
Figura 3.15	Mesa de medição por coordenadas .....	39
Figura 4.1	Aço Inoxidável Austenítico AISI 304L .....	44
Figura 4.2	Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L .....	44
Figura 4.3	Macrografia da seção transversal do passe de raiz (reforço de raiz = 1,3 mm) .....	46
Figura 4.4	Macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 40-41 .....	47
Figura 4.5	Macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 75-76-77.....	48
Figura 4.6	Macrografia da seção transversal do passe de raiz (reforço de raiz = 1,3 mm) .....	49
Figura 4.7	Macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 55-59 .....	50
Figura 4.8	Macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 69-70-71.....	51
Figura 4.9	Medição das placas de teste antes da soldagem para o aço 304L.....	52
Figura 4.10	Medição das placas de teste antes da soldagem para o aço 316L.....	52

Figura 4.11	Medição inicial das placas de teste sem soldagem .....	53
Figura 4.12	Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 1 passe de enchimento (sem restrição) .....	54
Figura 4.13	Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) .....	54
Figura 4.14	Pontos para identificação do ângulo da distorção angular .....	55
Figura 4.15	Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento do 304L sem restrição .....	56
Figura 4.16	Medição inicial das placas de teste sem soldagem .....	58
Figura 4.17	Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 2 passe de enchimento (sem restrição) .....	59
Figura 4.18	Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) .....	59
Figura 4.19	Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento do 304L sem restrição .....	60
Figura 4.20	Medição inicial das placas de teste sem soldagem .....	62
Figura 4.21	Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 1 passe de enchimento (com restrição) .....	63
Figura 4.22	Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) .....	63
Figura 4.23	Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento do 304L com restrição .....	64
Figura 4.24	Medição inicial das placas de teste sem soldagem .....	66
Figura 4.25	Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 2 passe de enchimento (com restrição) .....	67
Figura 4.26	Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) .....	67
Figura 4.27	Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento do 304L com restrição .....	68
Figura 4.28	Comparativo da medição real com e sem restrição do aço 304L.....	70
Figura 4.29	Medição inicial das placas de teste sem soldagem .....	73
Figura 4.30	Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 1	

	passe de enchimento (sem restrição) .....	73
Figura 4.31	Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) .....	74
Figura 4.32	Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento do 316L sem restrição .....	75
Figura 4.33	Medição inicial das placas de teste sem soldagem .....	77
Figura 4.34	Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 2 passe de enchimento (sem restrição) .....	78
Figura 4.35	Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) .....	78
Figura 4.36	Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento do 316L sem restrição .....	79
Figura 4.37	Medição inicial das placas de teste sem soldagem .....	81
Figura 4.38	Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 1 passe de enchimento (com restrição) .....	82
Figura 4.39	Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) .....	82
Figura 4.40	Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento do 316L com restrição .....	83
Figura 4.41	Medição inicial das placas de teste sem soldagem .....	85
Figura 4.42	Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 2 passe de enchimento (com restrição) .....	86
Figura 4.43	Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) .....	86
Figura 4.44	Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento do 316L com restrição .....	87
Figura 4.45	Medição real com e sem restrição do aço 316L .....	89

## Lista de tabelas

Tabela 2.1	Alguns tipos de aços inoxidáveis austeníticos, sua composição básica e aplicações .....	7-8
Tabela 2.2	Composição química dos aços inoxidáveis AISI 304L e 316L .....	10
Tabela 2.3	Propriedades mecânicas para laminados a frio dos aços inoxidáveis AISI 304L e 316L .....	10
Tabela 3.1	Valores regulados para o corte a plasma .....	33
Tabela 3.2	Valores para energia de soldagem utilizada .....	40
Tabela 3.3	Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 304L .....	40
Tabela 3.4	Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 304L .....	41
Tabela 3.5	Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 304L .....	41
Tabela 3.6	Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 316L .....	42
Tabela 3.7	Parâmetros utilizados para soldagem placas de testes de 316L ...	42
Tabela 3.8	Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 316L .....	43
Tabela 4.1	Valores médios monitorados .....	45
Tabela 4.2	Valores médios de tensão e corrente monitorados para a condição de passe de raiz + 1 passe de enchimento do aço 304L.	46
Tabela 4.3	Valores médios de tensão e corrente monitorados para a condição passe de raiz + 2 passes de enchimento do aço 304L ....	47
Tabela 4.4	Valores médios monitorados .....	49
Tabela 4.5	Valores médios de tensão e corrente monitorados para a condição passe de raiz + 1 passe de enchimento do aço 316L .....	50
Tabela 4.6	Valores médios de tensão e corrente monitorados para a condição 2 do aço 316L .....	51
Tabela 4.7	Valores medidos dos cortes transversais a peça .....	57
Tabela 4.8	Ângulos obtidos do corte transversal .....	57
Tabela 4.9	Valores medidos dos cortes transversais a peça .....	61
Tabela 4.10	Ângulos obtidos do corte transversal .....	61
Tabela 4.11	Valores medidos dos cortes transversais a peça .....	65
Tabela 4.12	Ângulos obtidos do corte transversal .....	65
Tabela 4.13	Valores medidos dos cortes transversais a peça .....	69
Tabela 4.14	Ângulos obtidos do corte transversal .....	69
Tabela 4.15	Comparação do ângulo de deformação para o aço inoxidável	

	304L para as condições abordadas .....	72
Tabela 4.16	Valores medidos dos cortes transversais a peça .....	76
Tabela 4.17	Ângulos obtidos do corte transversal .....	76
Tabela 4.18	Valores medidos dos cortes transversais a peça .....	80
Tabela 4.19	Ângulos obtidos do corte transversal .....	80
Tabela 4.20	Valores medidos dos cortes transversais a peça .....	84
Tabela 4.21	Ângulos obtidos do corte transversal .....	84
Tabela 4.22	Valores medidos dos cortes transversais a peça .....	88
Tabela 4.23	Ângulos obtidos do corte transversal .....	88
Tabela 4.24	Comparação do ângulo de deformação para o aço inoxidável 316L para as condições abordadas .....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Ampére
AID	Aço Inoxidável dúplex
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
Ar	Gás Argônio
arc	Arco
AWS	<i>American Welding Society</i>
bar	Unidade de pressão
BSSA	<i>British Stainless Steel Association</i>
C	Carbono
CCC	Cubica de Corpo Centrado
CFC	Cubica de Face Centrada
cm	Centímetro
Cr	Cromo
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Datasheet	Folha de dados
DBCP	Distância bico de contato peça
DBP	Distância Bocal Peça
E	Energia de soldagem
ER	Eletrodo Revestido
Fe	Ferro
°	Graus
°C	Graus Celsius
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
He	Hélio
Hz	Hertz
I	Corrente elétrica
Im	Corrente média monitorada
Ir	Corrente Regulada
LabView®	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
L	<i>Low</i>
m	coeficiente angular

MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de varredura
μ	Micron
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
min	Minuto
mm	Milímetro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
η	Eficiência de transferência
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
N <sub>2</sub>	Gás Nitrogênio
O	Oxigênio
P	Fósforo
Piting	Pontos
S	Enxofre
Se	Selênio
Si	Silício
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
tan	Tangente
Ti	Titânio
Um	Tensão média monitorada
Ur	Tensão de regulagem da fonte
V	Tensão
V	Volt
v	Velocidade linear de soldagem
V <sub>Alim</sub>	Velocidade de alimentação
V <sub>SOL</sub>	Velocidade de soldagem
X	Eixo das abscissas
x	Ponto 1 no eixo das abscissas
x <sub>0</sub>	Ponto 2 no eixo das abscissas
Y	Eixo das ordenadas
y	Ponto 1 no eixo das coordenadas

- $y_0$  Ponto 2 no eixo das coordenadas
- Z Eixo das cotas
- Zr Zircônio
- W Tungstênio
- $\alpha$  Ângulo de inclinação da reta

## RESUMO

Atualmente a utilização do aço inoxidável, vem ganhando cada vez mais espaço devido a sua excelente resistência à corrosão, acabamento superficial, capacidade de conformação e soldabilidade. Na indústria o mesmo está presente nas mais variadas aplicações como tubos, tanques, reatores, colunas de destilação, trocadores de calor e condensadores. A utilização dos aços inoxidáveis está ligada diretamente a processos de fabricação que, de alguma forma, podem gerar descontinuidades ou alterações de forma ou microestruturais. Os processos de soldagem são um destes processos que, por terem aplicações localizadas de calor podem gerar as distorções da estrutura. Estas distorções provocam grandes perdas econômicas por impossibilitar a montagem de estruturas e por promover mudanças indesejadas na geometria das peças. O nível de distorção causado na estrutura soldada depende de diversos fatores. Desta forma, foi feito um estudo sobre a influência do número de passes e do grau de restrição na distorção angular das placas de teste utilizando o processo MIG/MAG em chapas de aços inoxidáveis 304L e 316L. De acordo com os resultados obtidos, tanto o número de passes para formação da solda quanto o nível de restrição imposto ao material influencia o nível de distorção angular.

**Palavras-chave:** Distorção angular, MIG/MAG, 304L, 316L.

## ABSTRACT

Nowadays the use of stainless steel is gaining more space due to its excellent corrosion resistance, surface finishing, conformability and weldability. In the industry it is found in various applications such as pipes, tanks, reactors, distillation columns, heat exchangers and condensers. The use of stainless steel is limited to the fabrication process because it can generate discontinuances or modifications in its microstructure. One problem encountered in welding is the distortion caused by the heating and cooling process located in the welded piece. The distortion causes great economic losses because it makes impossible to assemble welded structures and it makes unwanted changes in the geometry of structural parts. The level of distortion caused in a welded structure depends of several factors. In this way, a study is carried out on the influence of the number of welding passes and the restriction degree on the angular distortion of test plates using the GMAW process in 304L and 316L stainless steel plates. The results showed that the number of passes and the restriction degree made to form the weld bead has an influence in the angular distortion of a structural piece.

**Keywords:** *Angular distortion, GMAW, 304L, 316L.*

# Capítulo 1 - Introdução

Com a nova fase da indústria naval e offshore no Brasil, especialmente as novas descobertas de petróleo e gás natural nas reservas do pré-sal, criou-se a necessidade de ampliar as frotas de unidades de exploração e prospecção desse petróleo. A fabricação de novos navios-sonda, plataformas de produção, navios aliviadores (petroleiros) e outras embarcações de apoio para essa nova demanda é algo real e já em andamento mencionado por Rocha (2014). Independente do tipo de embarcação e da sua aplicação, a utilização de equipamentos e estruturas em aço é largamente difundida devido a exigências dos esforços que nelas incidem.

Como estes tipos de estruturas demandam aços de diversos tipos, a necessidade de utilização de processos de fabricação para este tipo de material se faz imprescindível.

Os processos de soldagem possuem características diferenciadas bem como suas vantagens, aplicações e limitações. Escolher o processo correto para cada situação e também, conhecer suas possíveis descontinuidades, sabendo inclusive como minimizá-las é uma importante ferramenta para que se possa ter melhor qualidade, maior produtividade com menor custo e maior segurança do trabalho a ser executado (NOVAIS, 2010).

Os resultados destes processos podem tornar a fabricação das estruturas incrivelmente mais caras, ou ainda comprometer toda uma estrutura. Uma das consequências indesejadas dos processos de soldagem a arco elétrico são as distorções da estrutura. Isto se deve a imposição localizada de calor que por dilatações e contrações deformam a estrutura.

De acordo com Shen (2013), o custo para corrigir as distorções de soldagem em relação ao custo total de fabricação pode chegar a 30%. A existência de distorções devido a soldagem causam variações na estrutura soldada, e decresce a acuracidade dimensional e capacidade de carga de embarcações.

Este mesmo problema é observado nos mais diversos materiais incluindo os aços inoxidáveis. Estes tipos de aço apresentam vantagens com relação aos aços carbonos como a resistência à corrosão. Propriedades esta que favorece sua utilização em muitas aplicações em embarcações. Contudo, o custo destes materiais são bem mais altos do que os aços carbonos.

Existem uma gama muito grande de aços inoxidáveis. Entre estes estão os aços inoxidáveis austeníticos. Estes tipos de aço são amplamente utilizados na indústria, e de acordo com Wika (2012), são comumente utilizados em ambientes offshore nas mais variadas condições como em tanques, painéis de controle, caixas elétricas, heliportos e muitas outras aplicações. Pode-se observar no catálogo técnico da empresa Stahl (2010) que os aços inoxidáveis 304L e 316L têm grande aplicação nos equipamentos de instrumentação na área naval offshore.

Como a utilização dos aços inoxidáveis é muito grande e o custo destes materiais é muito alto, o desperdício ou a perda de estruturas devido aos processo de soldagem encarece em muito a construção de tais embarcações. Desta forma, conhecer os fatores que influenciam principalmente as distorções devido aos processo de soldagem é de extrema importância.

Dessa forma este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo sobre o grau de distorção angular em chapas de aços inoxidáveis 304L e 316L submetidas ao processo de soldagem MIG/MAG variando o número de passes e o grau de restrição durante a soldagem. Uma análise macroestrutural da sua zona afetada termicamente será realizada para verificar a homogeneidade do material, sua distribuição e natureza de possíveis falhas e qualidade da soldagem.

## Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

### 2.1 Aços inoxidáveis

A descoberta dos aços inoxidáveis se deu de maneira casual. De acordo com o a Associação Britânica dos Aços Inoxidáveis (British Stainless Steel Association - BSSA) o inglês Harry Brearly estava investigando o desgaste excessivo que ocorria no interior dos canos de armas de fogo devido a liberação do calor e dos gases liberados durante a explosão. Sua pesquisa consistia em obter uma liga com maior resistência a corrosão, mas quando realizou um ataque químico, com ácido nítrico, para revelar a microestrutura de uma dessas novas ligas Brearly percebeu que não conseguia visualizar efeito algum. Ele obteve uma liga metálica que era resistente a corrosão. Com a constante dificuldade de se obter uma liga capaz de resistir a ação de agentes corrosivos vários outros cientistas chegaram a soluções que hoje chamamos de aços inoxidáveis.

Desde a sua descoberta, os aços inoxidáveis passaram por uma grande evolução. Principalmente devido ao fato de suas diferentes características que melhoram a sua resistência à corrosão, sua aparência, sua resistência a altas e baixas temperaturas, entre outras que ampliaram e ampliam os campos de utilização como na área offshore, naval, alimentícia, etc. Uma descrição do que realmente representa esta liga é dada por Modenesi (2001) em seu livro “Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis” onde o autor explica que o termo “aço inoxidável” é usado para um grupo de ligas ferrosas que têm como característica principal a resistência à corrosão em meios aquosos na presença de minerais agressivos, sendo resistentes à corrosão a altas temperaturas.

No ASM Metals handbook volume 1, Washko (1990) descreve os aços inoxidáveis como sendo uma liga a base de ferro contendo pelo menos 10,5% de cromo. Sendo que poucos aços inoxidáveis contem mais do que 30% de cromo ou menos do que 50% de ferro. Essa característica de não oxidar se deve ao fato da liga formar em sua superfície uma camada invisível e aderente rica em óxido de cromo. Essa formação de óxido se regenera na presença de oxigênio. Alguns outros elementos como níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio, enxofre e selênio melhoram as características do aço inoxidável.

## 2.2 Tipos de Aços Inoxidáveis

De acordo com a ASM (1990) os aços inoxidáveis são divididos em cinco grupos distintos: Austeníticos, Ferríticos, Duplex (ferrítico-austeníticos), Martensíticos e endurecidos por precipitação (envelhecidos).

### 2.2.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e excelente resistência a corrosão. A obtenção dessa estrutura se dá por meio do uso de elementos austenitizantes como o níquel, cromo, manganês, e nitrogênio. A quantidade de cromo geralmente varia entre 16 a 26%, a de Ni pode chegar até 35% e de Mn até 15%. A série 2xx contem nitrogênio, manganês entre 4 a 15.5% e até 7% de níquel. A série 3xx contem grandes quantidades de níquel e até 2% de manganês. Molibdênio, cobre, silício, alumínio, titânio e nióbio podem ser adicionados ao aço para conferir algumas características específicas tais como haloide resistente a corrosão por pit ou a oxidação. Estes aços são essencialmente não magnéticos e podem ser endurecidos somente por trabalho a frio. (ASM,1990)

### 2.2.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são basicamente ligas Fe-Cr, sendo o cromo o principal elemento da liga o que atribui a esta família de aços elevada resistência a corrosão, e o nome que lhe foi atribuído se deve a sua estrutura cristalina ferrítica de cúbica de corpo centrado (CCC). A quantidade de cromo contido em sua estrutura varia entre 10,5 a 30%. Algumas séries contem molibdênio, silício, alumínio, titânio e nióbio que conferem algumas características particulares a elas. Enxofre e selênio podem ser acrescentados, para melhorar sua usinabilidade. Ligas ferríticas são ferromagnéticas. Elas podem ter boa ductibilidade e conformabilidade, mas a sua resistência a altas temperaturas é relativamente baixa comparado às séries austeníticas. (ASM, 1984).

### 2.2.3 Aços Inoxidáveis Dúplex

Os aços inoxidáveis dúplex (austenítico-ferríticos) são uma mistura de estrutura CCC (ferrita) e CFC (austenita). A quantidade exata de cada fase depende da sua composição e tratamento térmico. A maioria das ligas são projetadas para conter quantidades iguais de cada fase na sua condição enrijecida. Os principais elementos de liga são o cromo e níquel, mas nitrogênio, molibdênio, cobre, silício e tungstênio também podem ser acrescentados para controlar a sua estrutura de balanceamento e transmitir algumas características de resistência a corrosão. A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis dúplex é similar a dos aços inoxidáveis austeníticos com componentes de liga similares. Entretanto, os aços dúplex possuem maiores resistências à tensão de ruptura e à tração e também possuem uma melhora na resistência à trinca e corrosão do que os aços austeníticos similares. (ASM, 1990)

### 2.2.4 Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente ligas de cromo e carbono que possuem uma estrutura cúbica de corpo centrada distorcida (CCC) endurecida (martensita). Esses aços são ferromagnéticos, endurecíveis com tratamentos térmicos, e são geralmente resistentes à corrosão somente em ambientes relativamente moderados. A quantidade de cromo varia entre 10,5 a 18%, onde a quantidade de carbono pode exceder 1,2% sendo que ambas as quantidades de cromo e carbono devem ser balanceadas para assegurar uma estrutura martensítica após o endurecimento. Alguns elementos como o nióbio, silício, tungstênio e vanádio podem ser acrescentados para modificar a resposta à têmpera após o endurecimento. Pequenas quantidades de níquel podem ser adicionadas para melhorar a resistência à corrosão. (ASM, 1990)

### 2.2.5 Aços Inoxidáveis Endurecidos Por Precipitação

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são ligas cromo-níquel que contêm elementos precipitados endurecidos como cobre, alumínio ou titânio. Esses aços endurecidos podem ser tanto aços austeníticos quanto martensíticos mas recozidos. Os aços que são austeníticos recozidos são frequentemente transformáveis em martensíticos por meio de tratamento térmico, algumas vezes com tratamentos a temperaturas abaixo de zero. Na maioria dos casos, esses aços conseguem altas tensões pelo endurecimento por precipitações de uma estrutura martensítica.

### 2.3 Tipos de Aços Inoxidáveis Austeníticos

Como neste trabalho se utilizam aços inoxidáveis austeníticos, dar-se-á ênfase na sua descrição. Os aços inoxidáveis austeníticos formam o grupo mais numeroso e utilizado dos aços inoxidáveis (MODENESI, 2001). Esses contêm entre cerca de 6 e 26% de níquel, 16 e 30% de cromo e menos de 0,30% de carbono, com um teor total de elementos de liga de, pelo menos 26%. São entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão. A utilização dessa família de aços está presente nos mais variados ramos de aplicações da indústria, como na indústria alimentícia, química, de petróleo e offshore entre outras. A Tab. 2.1 mostra alguns tipos destes aços, classificados segundo a AISI. (MODENESI, 2001)

Tabela 2.1 – Tipos de aços inoxidáveis austeníticos, sua composição básica e aplicações.

Tipo AISI	C	Cr	Ni	Outros Elementos	Propriedades Gerais e Aplicações típicas
301	0,15	16,0 18,0	6,0 8,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo para aplicações gerais; boa trabalhabilidade; ornamentação; utensílios domésticos, fins estruturais; equipamento para indústria química, naval, alimentícia, transportes, etc.
302	0,15	17,0 19,0	8,0 10,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Idem, para aplicações decorativas ou de resistência à corrosão como as indicadas para o tipo 301.
302B	0,15	17,0 19,0	8,0 10,0	Mn: 2,0 a 3,0 Si: 2,0 max.	Melhor resistência à formação de camada de óxido a altas temperaturas devida à presença de Si.
303	0,15	17,0 19,0	8,0 10,5	P/S/Se: 0,07 min. Zr/Mo: 0,60 max. Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo 18:8 de usinagem fácil, para eixos, parafusos, porcas, peças de carburadores, etc.
304	0,08	18,0 20,0	8,0 11,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo 18:8 de C mais baixo, soldável com menor perigo de corrosão intercrystalina, mesmas aplicações dos tipos 301 e 302.
308	0,08	19,0 21,0	10,0 12,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Maior resistência à corrosão que o 18:8; para consumíveis de soldagem, entre outras aplicações.
309	0,20	22,0 24,0	12,0 15,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Boa resistência à corrosão e mecânica a altas temperaturas: para equipamentos da indústria química, peças de fornos estufas, etc.

Tabela 2.1 – Tipos de aços inoxidáveis austeníticos, sua composição básica e aplicações. (continuação)

309S	0,08	22,0 24,0	12,0 15,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Devido ao baixo C, permite soldagem com menor perigo de corrosão intercrystalina.
310	0,25	24,0 26,0	19,0 22,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,5 max.	Boa estabilidade nas temperaturas de soldagem; consumíveis de soldagem, equipamentos para indústria química, peças de fornos, estufas; resistente à oxidação até temperaturas da ordem de 1100°C.
316	0,08	16,0 18,0	10,0 14,0	Mo: 2,0 a 3,0 Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Menor resistência à corrosão química; para equipamentos da indústria química, de papel, etc.
317	0,08	18,0 20,0	11,0 14,0	Mn: 3,0 a 4,0 Si: 1,0 max.	Melhor resistência à corrosão que o tipo 316, idênticas aplicações.
321	0,08	17,0 19,0	9,0 12,0	Ti=5x%C min. Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo 18:8, estabilizado contra corrosão intercrystalina a altas temperaturas; para aplicações que exigem soldagem.
347	0,08	17,0 19,0	9,0 12,0	Nb=10x%C min. Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo 18:8, estabilizado para serviço a alta temperatura e onde se exige soldagem.

Fonte: Modenesi (2001)

Os aços inoxidáveis austeníticos não são temperáveis, mas são facilmente trabalháveis a frio, apresentando uma elevada taxa de encruamento. Para evitar a formação de carbonetos, o material deve ser aquecido a 1040-1175°C. Eles podem sofrer precipitação de carbonetos nos contornos de grão entre 450 e 870°C. Esses aços apresentam elevada resistência à fluência até 650°C e também elevada tenacidade, mesmo a temperaturas muito baixas. Ligas com adição de W ou Mo tem melhor comportamento. Em relação a trabalhabilidade a quente os aços inoxidáveis austeníticos devem ser pré-aquecidos a cerca de 870°C, aquecido rapidamente para

1200°C e trabalhado até 1000°C. A resistência à corrosão desses aços depende fortemente do teor total de liga e é, em geral, superior aos outros grupos de aços inoxidáveis. Podem sofrer corrosão puntiforme ou sob tensão em ambiente contendo cloretos. (MODENESI, 2001)

### 2.3.1. Aços Inoxidáveis Austeníticos 304 E 304L

O aço inoxidável 304 é uma variação do aço 302, com uma quantidade de carbono menor e mais cromo. Este aço apresenta 0,08% de Carbono, de 18,0 a 20,0 % de Cromo e quantidades de Níquel de 8,0 a 11,0% com porcentagens de Manganês de no máximo a 2,0% e Silício no máximo 1,0%. O Aço inoxidável 304L tem propriedades mecânicas um pouco inferiores ao 304.

A utilização da letra L (Low) ao lado do 304L indica que o conteúdo de carbono da liga está no máximo com 0,03%. Esse nível mais reduzido de carbono é utilizado quando o material será soldado. O menor teor de carbono ajuda a prevenir a precipitação de cromo (formando carbonetos de cromo na região da solda) e portanto assegurando um mínimo de 11% de cromo e a possibilidade de formação do filme passivo que proporciona ao aço inox a resistência à corrosão. (AKSTEEL, 2007)

### 2.3.2. Aços Inoxidáveis Austeníticos 316 E 316L

O aço tipo 316 é uma liga de aço inoxidável contendo cromo-níquel que possui em sua composição o molibdênio. A propriedade desse aço são similares às do 304 exceto que o aço 316 tem resistências um pouco mais elevadas a alta temperaturas. Este aço apresenta 0,08% de Carbono, de 16,0 a 18,0 % de Cromo e quantidades de Níquel de 10,0 a 14,0% com porcentagens de Manganês de no máximo a 2,0%, Silício no máximo 1,0% e de 2,0 a 3,0% de molibdênio.

Assim como no caso do 304L nos aços 316L a utilização da letra L também indica que o conteúdo de carbono da liga está no máximo com 0,03%. A soldabilidade do 316L é melhor do que comparado aos 316 devido ao seu nível mais reduzido de carbono.

Os aços AISI 304L e 316L são de baixo teor de carbono e sua composição

química é apresentada na Tab. 2.2. Em comparação com os aços inoxidáveis 304 e 316 percebe-se a diferença no teor de carbono. Tais aços apresentam como características principais: excelente resistência à corrosão, excelente capacidade de conformação, alto coeficiente de expansão térmica e excelente soldabilidade. Normalmente estes aços têm aplicações industriais em função da similaridade de suas propriedades mecânicas apresentadas na Tab. 2.3. A diferença de comportamento entre o 316L e o 304L se deve a presença do molibdênio na composição química do 316L, tal elemento adicionado à liga retém mais ferrita na microestrutura (BHADESHIA & WOOLLIN, 2002).

Os aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L e 316L são amplamente utilizados em vários segmentos das indústrias de açúcar e álcool, farmacêutica, derivados de petróleo, aeronáutica, ferroviária, naval, papel e celulose, têxtil, hospitalar, entre outras. As aplicações são em tubulações, tanques, trocadores de calor, etc.

Tabela 2.2: Composição química dos aços inoxidáveis AISI 304L e 316L

AISI	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N
<b>304</b>	0,07	2,0	0,75	0,045	0,015	17,5 a 19,5	8,0 a 10,5	-	0,10
<b>304L</b>	0,03	2,0	0,75	0,045	0,015	17,5 a 19,5	8,0 a 10,5	-	0,10
<b>316</b>	0,07	2,0	1,5	0,045	0,015	16,5 a 18,0	10,0 a 13,0	2,0 a 2,5	0,10
<b>316L</b>	0,03	2,0	1,5	0,045	0,015	16,5 a 18,0	10,0 a 13,0	2,0 a 2,5	0,10

Fonte: Acesita-Aperam (2012)

Tabela 2.3: Propriedades mecânicas para laminados a frio dos aços inoxidáveis AISI 304L e 316L

AISI	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento 50mm (%)
<b>304</b>	720	320	57
<b>304L</b>	690	320	51
<b>316</b>	650	340	51
<b>316L</b>	650	340	51

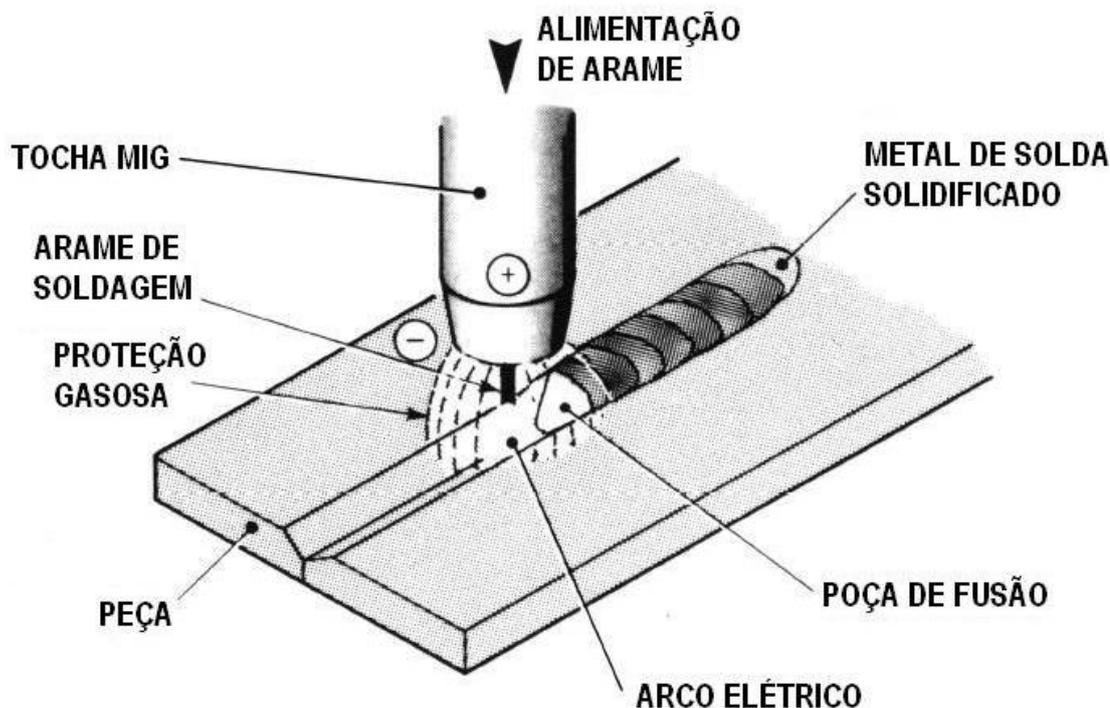
Fonte: Acesita-Aperam (2012)

## 2.4. Processo de Soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG também é conhecido pela sigla em inglês GMAW (Gas Metal Arc welding) que significa soldagem ao arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa e alimentação contínua de arame. De acordo com Scotti e Ponomarev (2008) o processo de soldagem MIG/MAG se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame no consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (comercialmente, Ar e He) ou ativo (usualmente  $\text{CO}_2$ ) ou misturas deles (no caso podendo incluir como gás ativo o  $\text{O}_2$  e o  $\text{N}_2$ ). A nomenclatura MIG/MAG é um acrograma advindo do inglês, onde MIG representa Metal Inert Gas (proteção por um gás, ou mistura, inerte) e MAG, Metal Active Gas (mistura de um ou mais dos gases ativos com gases inertes ou o  $\text{CO}_2$  puro).

A Fig. 2.1 apresenta um esquema de soldagem MIG/MAG onde pode-se perceber que a proteção gasosa protege a poça de fusão durante o processo de soldagem.

Figura 2.1 – Esquema de soldagem MIG/MAG



Fonte: Esab (2005)

## 2.5. Energia de Soldagem

De acordo com Zeemann (2003), a energia de soldagem é a quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear. A Eq. 1 apresenta a fórmula para a energia de soldagem.

$$E = \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$$

Onde:

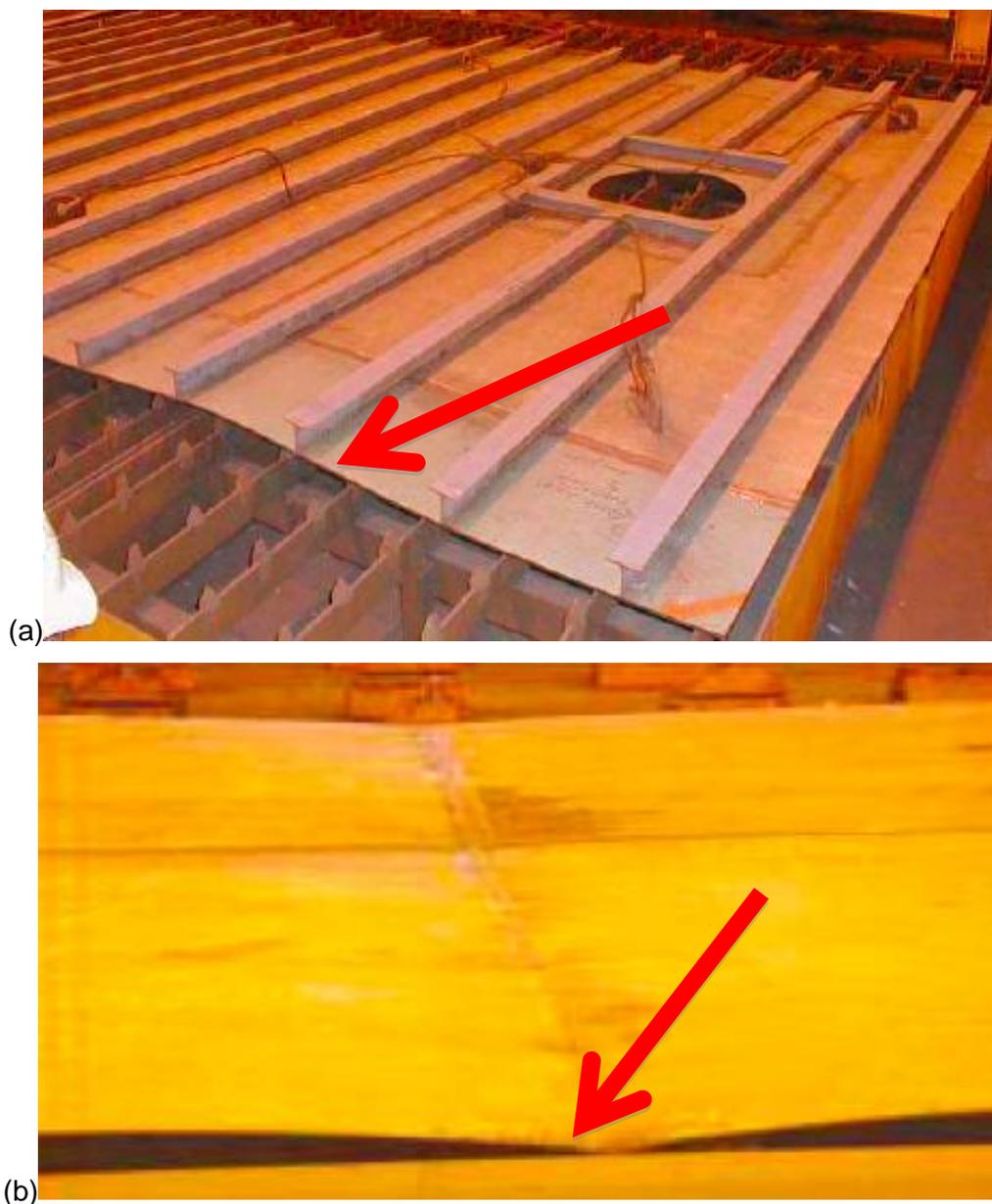
- E – Energia de soldagem [kJ/mm]
- V – tensão em volts [V]
- I – Corrente elétrica em Ampéres [A]
- v – velocidade linear de soldagem [mm/s]

A energia de soldagem é um parâmetro de rápida medida e simples obtenção, sendo muito utilizado em normas e trabalhos técnicos para especificar as condições de soldagem. (MODENESI, 2004)

## 2.6. Distorções no Processo de Soldagem

Na Fig. 2.2 (a) é possível verificar algumas imperfeições geométricas em um painel enrijecido de um bloco de plataforma semissubmersível. Na Fig. 2.2 (b) um problema típico de distorção angular em um painel de um navio sonda. Então tendo em vista a ampla aplicação dos aços inoxidáveis 304L e 316L no ramo naval e a elevada importância do grau de distorção devido ao processo de soldagem nos custos de fabricação, é imprescindível a busca por conhecimentos mais aprofundados nestes materiais visto a proximidade da universidade federal do Rio Grande - FURG com o polo naval de Rio Grande.

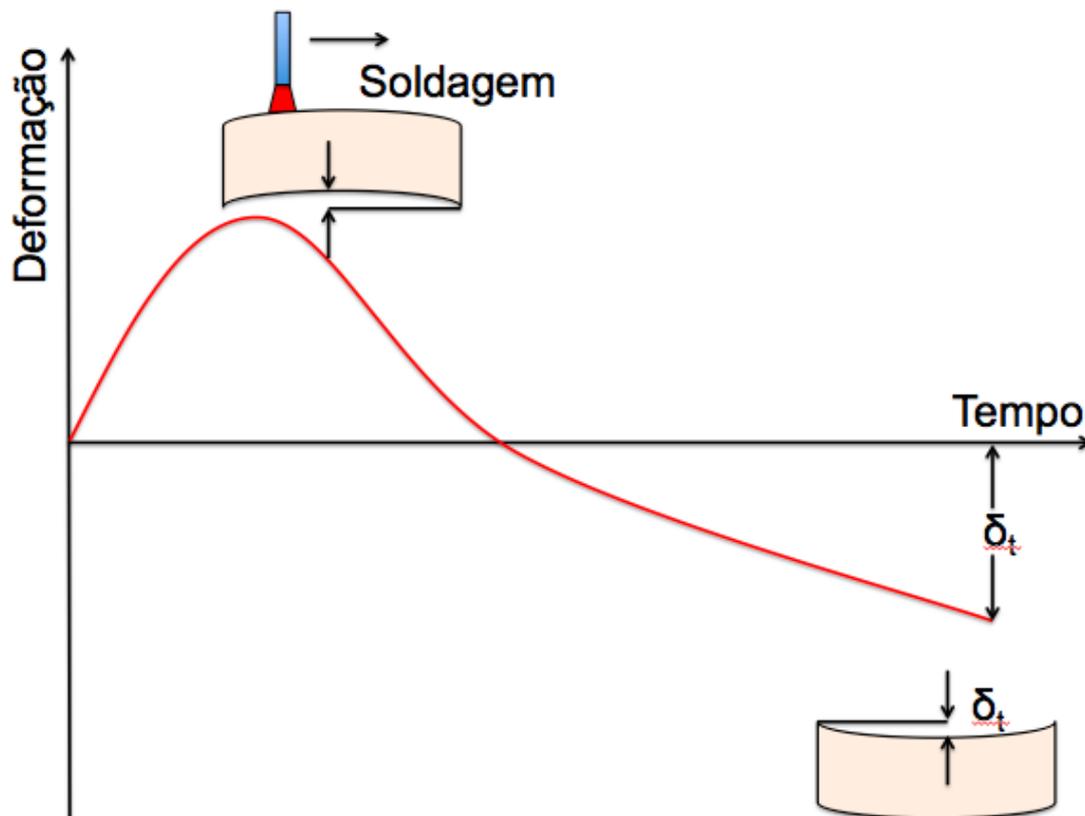
Figura 2.2: (a) Imperfeição geométrica inicial de um painel enrijecido de um bloco de plataforma semissubmersível. (b) Problema de Distorção angular em um painel de um Navio Sonda



Fonte: Amante (2006)

A distorção é uma alteração de forma e dimensões que componentes soldados sofrem como resultado do movimento de material que ocorre em função das tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem. A Fig. 2.3 apresenta a distorção de uma peça em função do tempo de aquecimento e resfriamento.

Figura 2.3 – Distorção em função do tempo de aquecimento e resfriamento



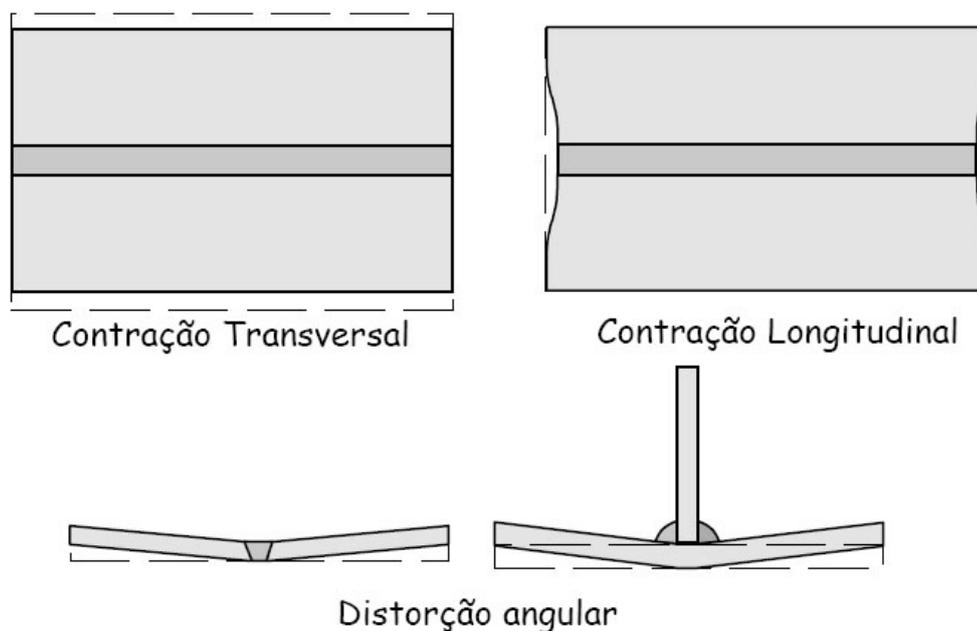
Fonte: Modenesi (2001) - (Modificado)

A distorção na soldagem resulta da expansão e contração do metal de solda e de base durante o ciclo térmico (aquecimento e resfriamento) do processo de soldagem. Durante o aquecimento e resfriamento, diferentes fatores influenciam as contrações do metal e causam a distorção, bem como alteram as propriedades físicas e mecânicas com o aporte de calor aplicado. Estas alterações afetam inclusive o fluxo e a uniformidade da distribuição de calor, sendo esta última a causa mais importante para a deformação durante a soldagem (FBTS, 2003). Dentre os fatores que afetam a distorção pode-se citar:

- Grau de restrição;
- Projeto da junta;
- Procedimento de montagem;
- Procedimento de soldagem;
- Propriedades do metal base;
- Energia de soldagem;
- Tensões internas;
- Sequência de soldagem;

Durante a soldagem, o aquecimento causa uma maior expansão térmica da região superior da peça e sua consequente distorção. Ao final da soldagem, com o resfriamento do material na região da solda, ocorre a sua contração. Como a região superior da peça foi a mais aquecida e pode ter sofrido uma maior deformação, a peça agora apresenta uma distorção final voltada para a direção oposta da distorção transiente máxima. Basicamente há três tipos de distorções em juntas simples, distorção transversal (perpendicular ao cordão de solda), distorção longitudinal (paralela ao cordão de solda) e distorção angular (rotação em torno do cordão de solda). A Fig. 2.4 ilustra os tipos de distorções básicas presentes em uma junta simples.

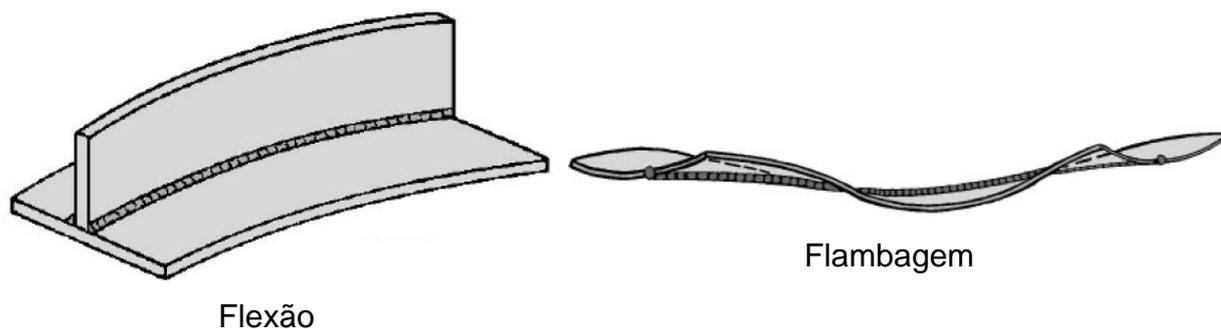
Figura 2.4 – Representação dos tipos básicos de distorção em uma junta soldada



Fonte: Neris (2012)

Essas distorções básicas causam distorções mais complexas em juntas reais de solda como, por exemplo, o dobramento e a torção de vigas e a distorção por flambagem em juntas de peças de pequena espessura. A Fig. 2.5 apresenta alguns exemplos de distorções mais complexas causadas durante o processo de soldagem.

Figura 2.5 – Exemplos de distorções complexas causadas pelo processo de soldagem



Fonte: Neris (2012) - (Modificado)

Existem diferentes medidas que podem ser utilizadas para reduzir a distorção em juntas soldadas dependendo de quando for tratado este problema, como por exemplo, durante o projeto das estruturas soldadas, durante a sua fabricação e após a soldagem (SOUZA, 2011). Fatores como projetar estruturas com a menor quantidade possível de soldas, utilização de chanfros que necessitem menor deposição de metal de adição, chanfros simétricos, aumento do grau de restrição das peças, alternar sequência de deposição dos cordões de solda e processos de conformação realizados após a soldagem são algumas maneiras de corrigir e/ou minimizar o grau de distorção de uma junta soldada.

#### 2.6.1. Maneiras de Reduzir a Distorção no Processo de Soldagem

O processo de soldagem visa a união localizada de materiais, similares ou não, de forma permanente. Nesse processo, há diversos fenômenos metalúrgicos envolvidos na soldagem. Pode-se citar, por exemplo, a fusão, a solidificação, as transformações no estado sólido, as deformações causadas pelo calor e as tensões de contração. Esses fenômenos podem causar diversos problemas durante a soldagem.

Se duas chapas estiverem restringidas às suas possibilidades de deformação, o nível de tensões internas se elevaria, havendo escoamento do cordão de solda no final e a peça se acomodaria na temperatura ambiente com um pequeno grau de deformação. Ou seja, quanto maior o grau de restrição, maior o nível de tensões internas, menor a possibilidade de deformação, porém é maior a possibilidade de

aparecimento de trincas.

Há diversas medidas que podem ser usadas para reduzir a distorção para peças a serem soldadas. Souza (2011) divide esses métodos em três grupos que na verdade são aplicados nas diferentes fases do processo de soldagem.

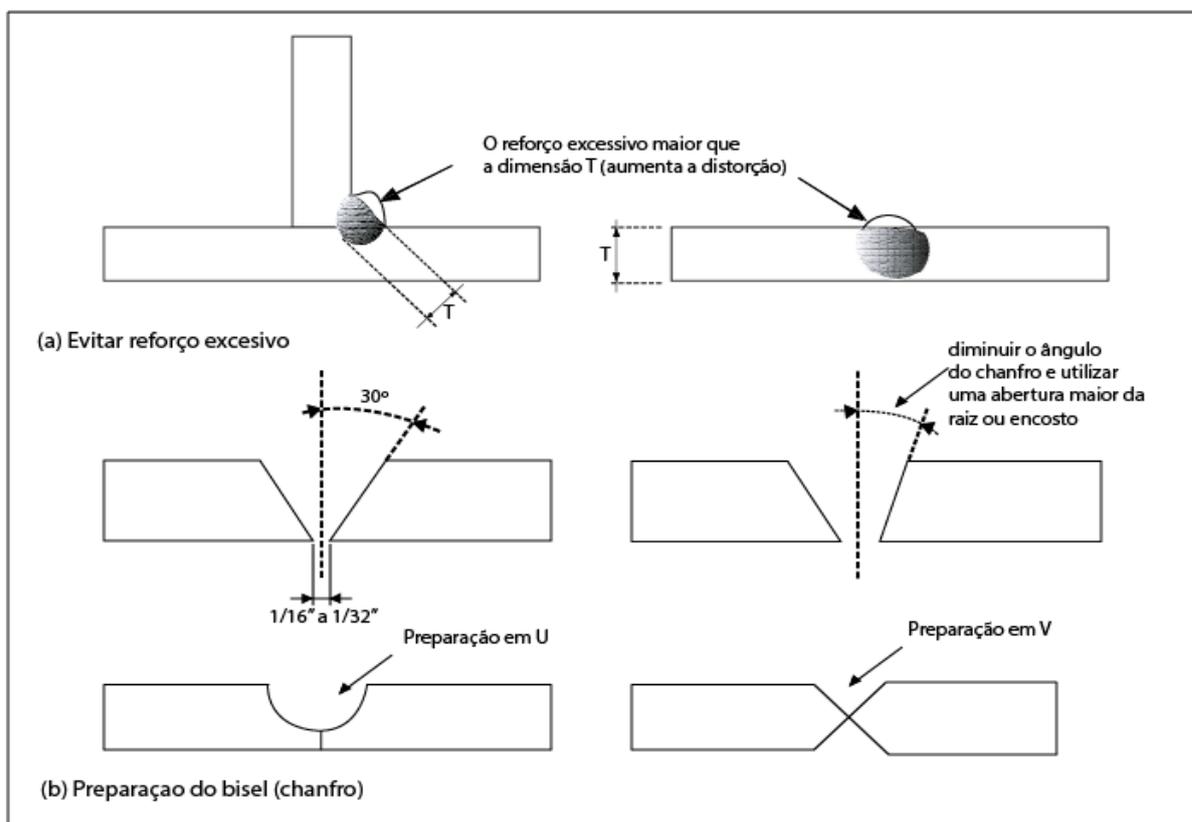
#### 2.6.1.1. No Projeto de Estruturas Soldadas

Durante o projeto de estruturas soldadas é possível reduzir o efeito da distorção das seguintes maneiras:

- Projetar estruturas com a menor quantidade possível de soldas;
- Usar chanfros que necessitem a deposição de menos metal de adição;
- Usar chanfros simétricos (X, K, Duplo U, etc);
- Posicionar soldas junto da linha neutra da peça ou em posições simétricas em relação à linha neutra;
- Especificar o menor tamanho possível das soldas compatível com as solicitações existentes;

A Fig. 2.6 ilustra algumas maneiras de diminuir a distorção durante o projeto de soldagem de uma junta.

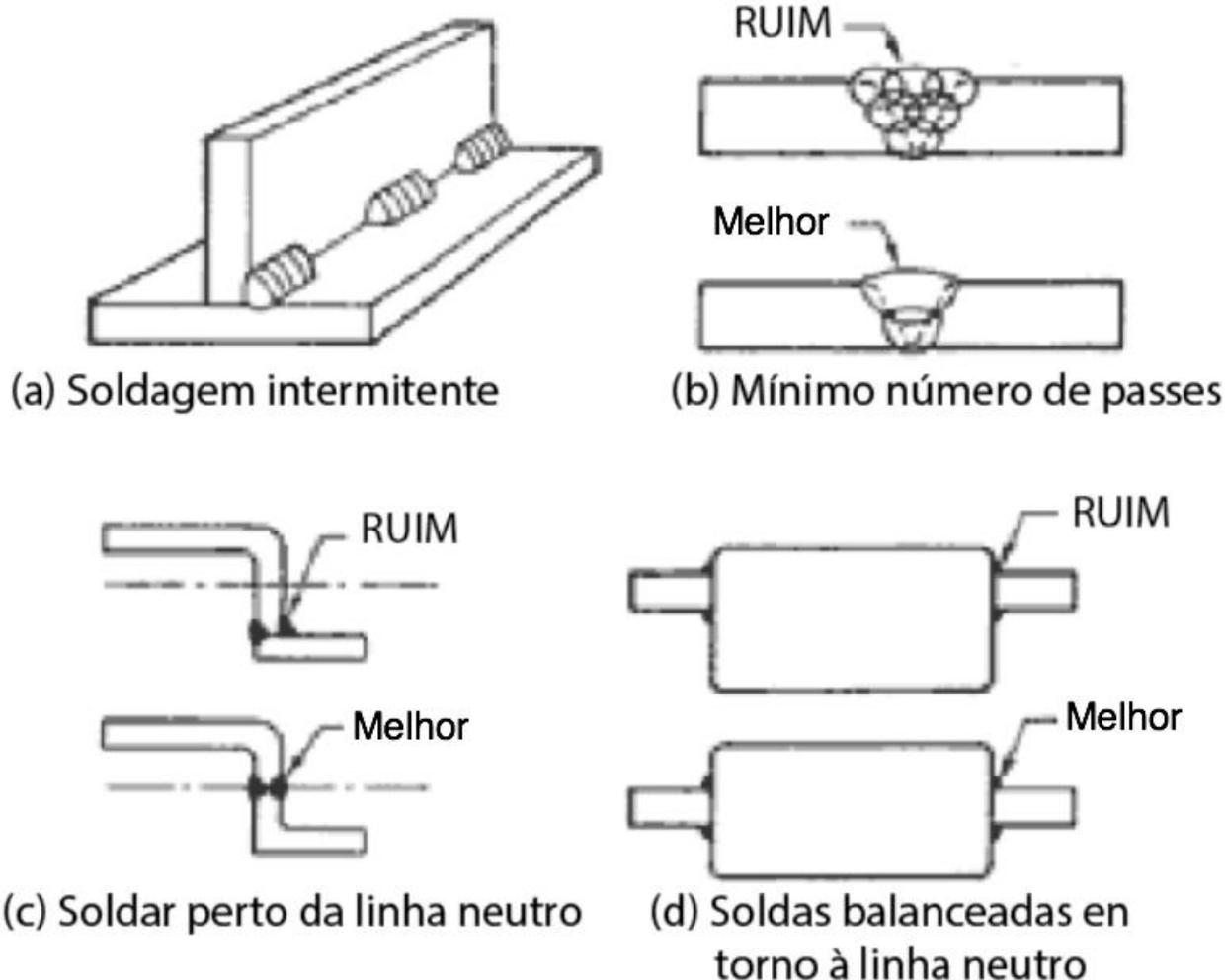
Figura 2.6 – Diminuição da distorção com técnicas utilizadas no projeto de soldagem.



Fonte: Lincoln Electric (2013)

Algumas outras técnicas para reduzir a distorção na soldagem são ilustradas na Fig. 2.7.

Figura 2.7 – Técnicas para reduzir a distorção (a) Soldagem com passes intermitentes (b) Soldagem com redução do número de passes (c) Soldagem próximo a linha neutra (d) Soldagem balanceada.



Fonte: Lincoln Electric (2013)

#### 2.6.1.2. Na Fabricação

O efeito da distorção pode ser minimizado durante o processo de fabricação das seguintes maneiras:

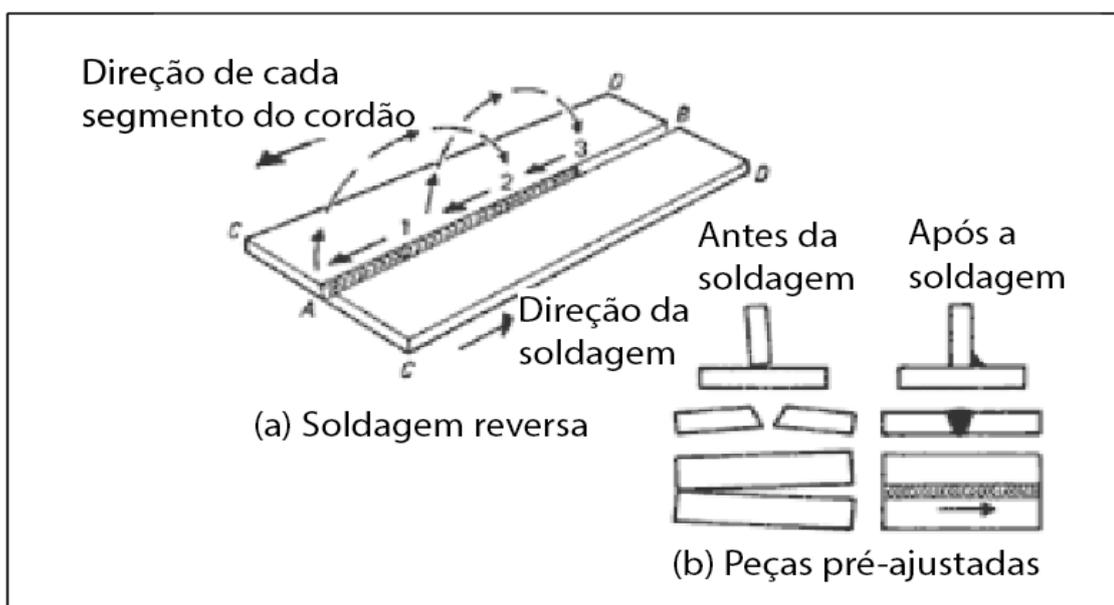
- Estimar a distorção que ocorrerá na estrutura e posicionar as peças de forma a compensar esta distorção, difícil de aplicar em estruturas complexas;
- Colocar peças na posição correta, ou próximo desta, e utilizar dispositivos de fixação ou outras técnicas para aumento da restrição das peças ao movimento (ponteamento antes da soldagem, gabaritos, etc);

- Usar sequência de deposição de cordões de solda (deposição por partes, uso de mais de um soldador iniciando a operação no mesmo ponto e soldando em direções opostas) e de montagem (montagem por subcomponentes, etc) que minimizem a distorção;

- Usar técnicas ativas de controle da distorção. Em geral, estas técnicas usam, durante a soldagem, fontes adicionais de aquecimento (e de resfriamento) de forma a gerar tensões térmicas adicionais capazes de contrabalancear as tensões geradas pela soldagem e, desta forma, reduzir a distorção. Um exemplo desta técnica envolve o emprego de fontes de aquecimento (maçaricos) colocadas lateralmente e deslocando-se junto com a tocha de soldagem. Estas técnicas ainda são muito pouco usadas industrialmente.

A Fig 2.8 ilustra um dos métodos de reduzir a distorção na soldagem durante o processo de fabricação.

Figura 2.8 – Métodos de reduzir a distorção (a) Soldagem reversa  
(b) Peças pré-ajustadas

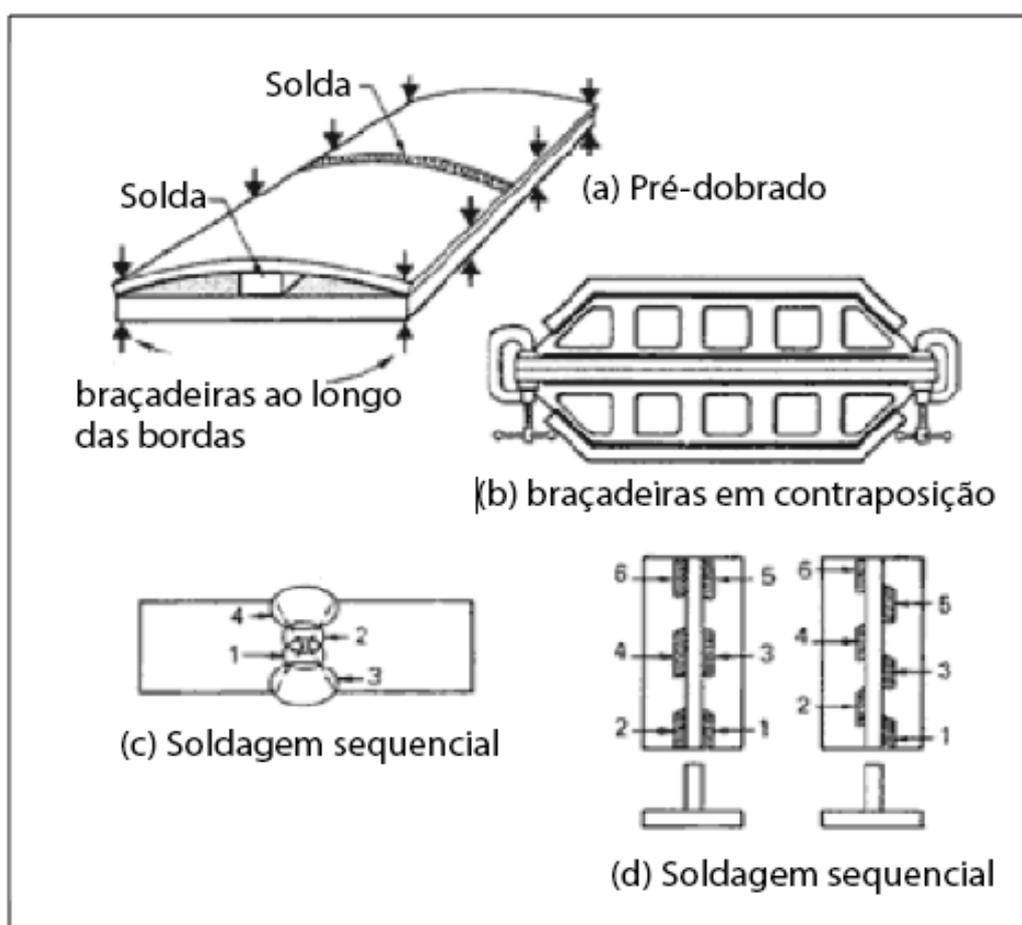


Fonte: Souza (2011)

Nessa técnica, no momento de colocar o cordão, as bordas aquecidas tendem a expandir, onde temporariamente ocorre uma separação das chapas no ponto B. Porém conforme o calor move-se através da chapa no ponto C, a expansão ao longo dos pontos CD faz as chapas se juntar novamente. Essa separação será maior concomitantemente com a colocação do primeiro cordão. Quanto maior a sucessão de cordões de solda, as chapas vão se expandindo menos devido às restrições dos cordões de solda anteriores.

A Fig. 2.9 ilustra outros métodos de reduzir a distorção na soldagem durante o processo de fabricação.

Figura 2.9 – Técnicas para reduzir a distorção (a) Pré-dobrado (b) Braçadeiras em contraposição (c) Soldagem sequencial (d) Soldagem sequencial

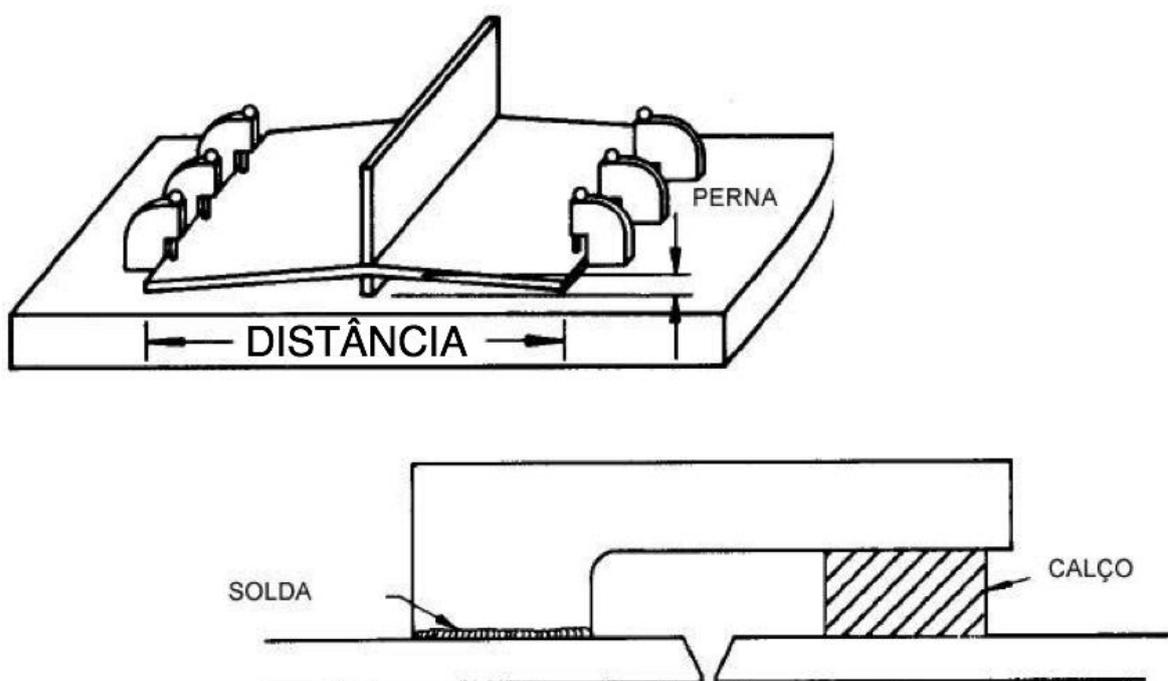


Fonte: Souza (2011)

Nessa técnica faz-se um pré-ajuste as peças, antes da soldagem fazendo com que as forças de tração trabalhem a favor do alinhamento da peça após o processo de soldagem. A face do chanfro da solda, a qual conterà a maior parte do metal soldado, é alongada quando as chapas são pré-ajustadas. Quando as braçadeiras são liberadas após a soldagem, as chapas retornam à forma plana, permitindo à solda a liberação das tensões longitudinais de tração encurtadas a uma linha reta. As duas ações coincidem, e as chapas assumirão o nivelamento desejado.

A Fig. 2.10 ilustra um dos métodos de reduzir a distorção na soldagem durante o processo de fabricação.

Figura 2.10 – Técnica para reduzir a distorção utilizando calços



Fonte: Neris 2012

Nessa técnica de redução da distorções utilizam-se calços para prender e travar a peça a ser soldada. Esses calços fazem com que a peça permaneça na posição desejada restringindo a distorção mas aumentando a tensão interna da peça.

### 2.6.1.3. Após a Soldagem (Correção Da Distorção):

O efeito da distorção pode ser minimizado após a soldagem através dos seguintes processos:

#### **Remoção a quente:**

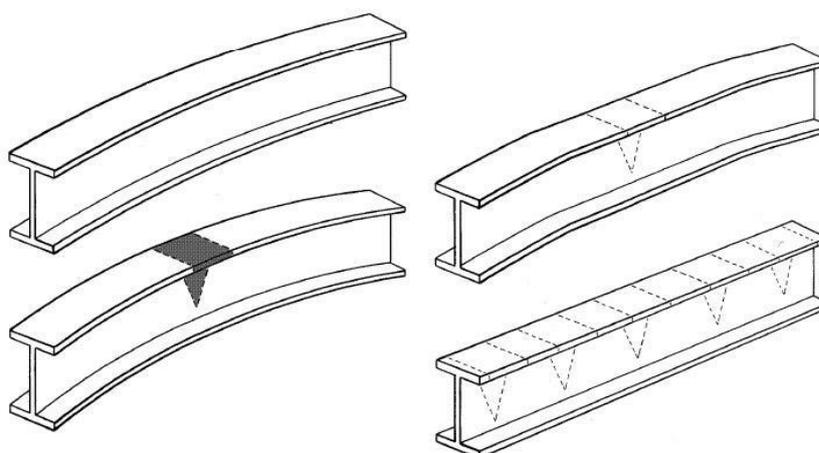
- Aquecimento localizado (isto é, de forma similar ao que gerou a distorção, mas de forma a contrabalanceá-la).
- Aquecimento uniforme e conformação mecânica.

#### **Remoção a frio**

- Calandragem;
- Prensagem;
- Martelamento;

Na Fig. 2.11 é possível verificar como minimizar o efeito da distorção após a soldagem realizando um processo de aquecimento localizado.

Figura 2.11 – Método de redução da distorção. Desempeno com aquecimento localizado.



Fonte: Neris (2012)

A escolha do método de reduzir a distorção no processo de soldagem melhora a qualidade do produto final. Um projeto elaborado onde a presença de técnicas de

redução da distorção são empregadas reduz drasticamente a necessidade de retrabalhos e custos da obra.

Para se executar uma solda sem defeitos, é necessário determinar os parâmetros e as variáveis antes da operação de deposição. Por isso, é exigida, em determinadas condições, a qualificação dos procedimentos de soldagem, como também, qual método de diminuir a distorção empregada na produção.

## Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Neste item será apresentada uma descrição de matérias-primas, equipamentos e metodologia desenvolvida neste trabalho.

### 3.1 Materiais Utilizados

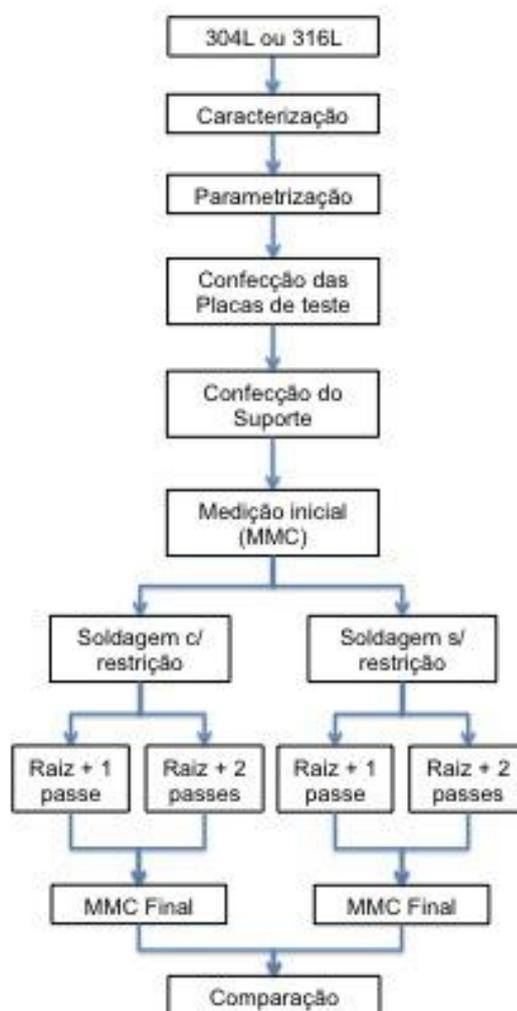
Os materiais escolhidos foram os aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L e 316L com a espessura de 9,5 mm. Foram adquiridas duas chapas de 1250x2000 mm de aços AISI 304L e 316L.

### 3.2 Metodologia

A metodologia do trabalho consistiu em realizar as soldagens em multipasses em duas condições de enchimento da junta sem a utilização de cobrejunta; passe de raiz mais um passe de enchimento e passe de raiz mais dois passes de enchimento. Para tanto, buscou-se a parametrização de cada condição em separado. Parametrizou-se o passe de raiz, que serve às duas condições propostas, depois se parametrizou a condição com um passe de enchimento e depois com dois passes. Para verificação posterior da influência de cada passe na microestrutura dos mesmos, propôs-se a confecção de cordões de solda com cada configuração, ou seja, passe de raiz, passe de raiz mais um passe de enchimento, passe de raiz mais primeiro passe de enchimento e passe de raiz mais dois passes de enchimento. O processo de soldagem utilizado foi MIG/MAG convencional.

A Fig. 3.1 ilustra um fluxograma dos passos executados nesse trabalho.

Figura 3.1: Fluxograma do roteiro de passos executados nesse trabalho



Fonte: Próprio autor

### 3.2.1 Parametrização

As soldagens de cada passe foram realizadas de forma que a regulagem dos parâmetros produzem cordões visualmente conformes (bom acabamento superficial e isento de defeitos superficiais). Os sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação foram adquiridos por um sistema de aquisição de dados comercial a uma taxa de 5 kHz. Para a aquisição e armazenamento dos dados das soldagens realizadas, foi utilizado um programa (em linguagem LabView<sup>®</sup>) de captura de dados durante a soldagem e após o término da aquisição os apresentava em forma de gráficos.

### 3.2.1.1. Fonte de Soldagem e Alimentador de Arames

Para a realização das soldagens foi utilizada uma fonte eletrônica da marca Lincoln Electric modelo Power Wave 455M/STT em conjunto com o alimentador de arames modelo Power Feed 10M do mesmo fabricante, conforme mostrado na Fig. 3.2. A fonte utilizada é do tipo inversora de três fases, multiprocesso, faixa de corrente entre 5 até 570 A e tensão de trabalho entre 10 até 43 V. A tensão em vazio vai de 25 a 90 V, corrente máxima de 570 A e tensão máxima de 43 V ambas com um fator de trabalho de 60%. Para um fator de trabalho de 100% se obtém 450 A de corrente máxima e 40 V para a tensão máxima.

Utilizou-se da característica estática de tensão constante, com regulagem da velocidade de alimentação de arame e de tensão.

Figura 3.2 (a) Fonte de soldagem (Lincoln Electric) (b) Alimentador de arame (Lincoln Electric)



(a)

Fonte: Lincoln Electric (2014)



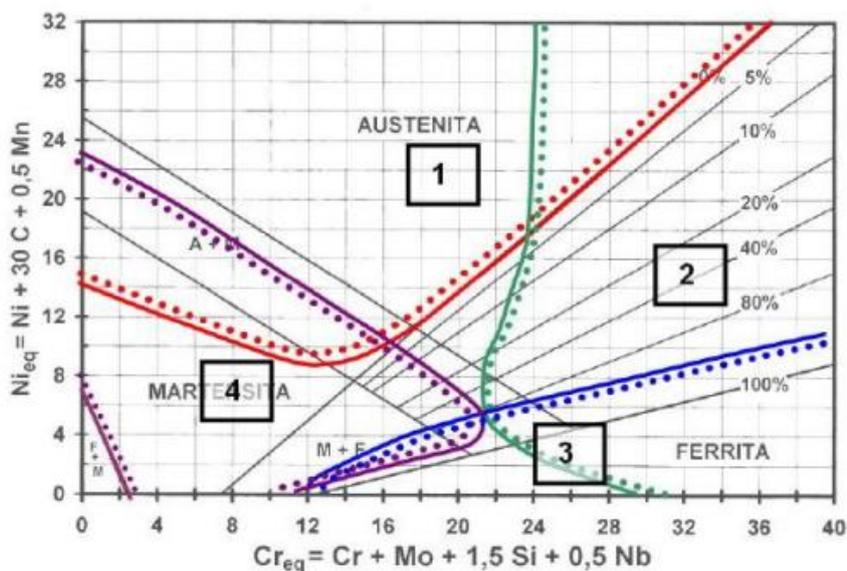
(b)

Fonte: Ferramenta (2014)

### 3.2.1.2. Determinação do Arame-Eletrodo

Para soldagem de aços inoxidáveis é necessária a determinação do arame-eletrodo adequado em função do metal de base. Um dos métodos é a utilização do diagrama de Schaeffler que permite prever a microestrutura da zona fundida com base na composição do metal de base e do arame-eletrodo. Além disso, o diagrama apresenta regiões onde a composição da zona fundida promove um cordão de solda sujeito a problemas que podem causar defeitos (Fig. 3.3). O primeiro metal de base a ser soldado é o AISI 304L, para isto se propôs a utilização do arame-eletrodo AWS ER 308L. A composição química do metal de base e o *datasheet* do arame-eletrodo utilizado são mostrados no Apêndice I.

Figura 3.3 – Regiões do diagrama de Schaeffler que são suscetíveis a problemas na zona fundida



Regiões problemáticas típicas na soldagem de aços inoxidáveis: (1) Formação de trincas de solidificação ou por perda de ductilidade acima de 1250°C; (2) fragilização por formação de fases intermetálicas após aquecimento entre cerca de 450 e 900°C; (3) fragilização por crescimento de grão; e (4) fragilização e fissuração por formação de martensita.

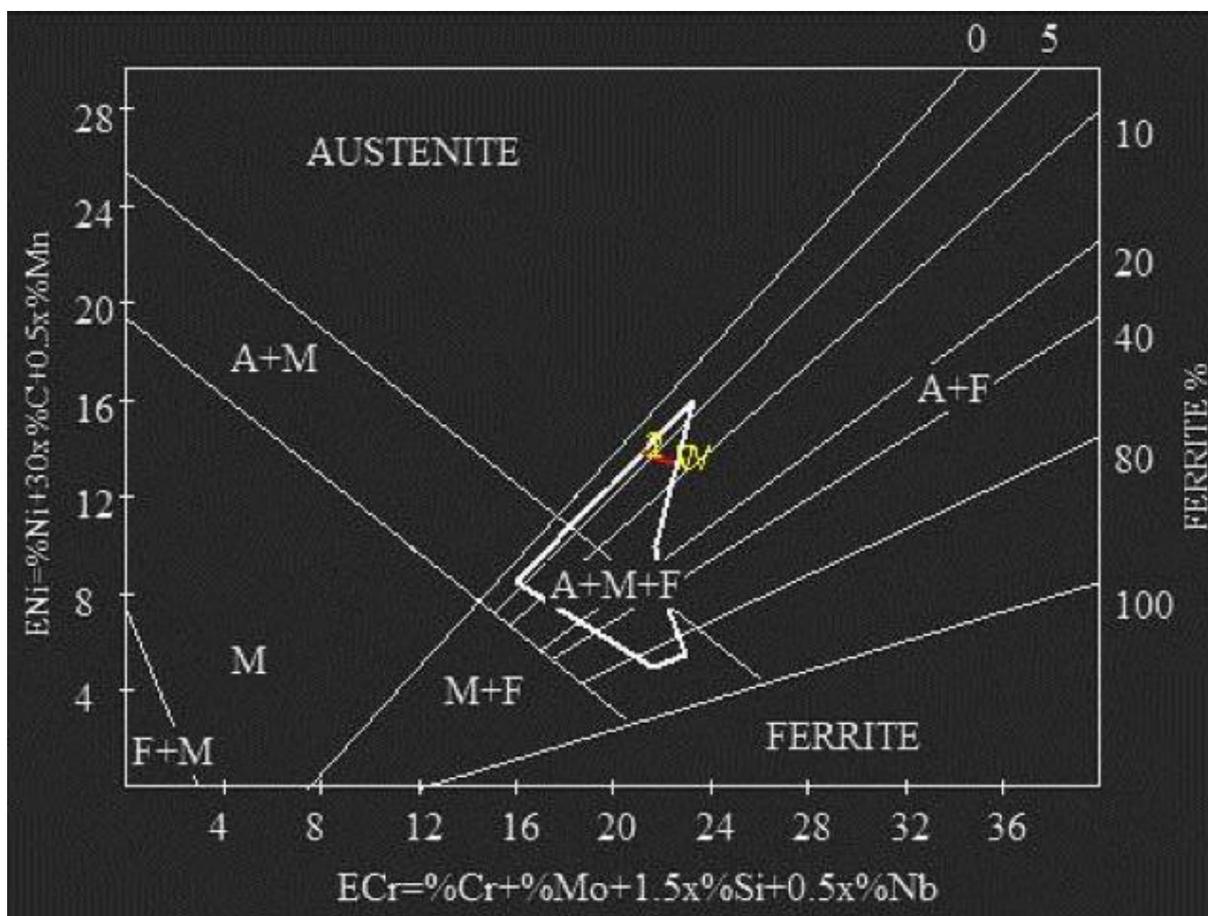
Fonte: Modenesi (2001)



da solda. A presença de Mo garante uma maior resistência à fluidência a alta temperatura e à corrosão localizada em pontos (“pitting”) em atmosfera contendo elementos halogênicos. A presença de Silício (Si) possibilita uma maior fluidez à poça de fusão e facilita a soldagem particularmente com o processo GMAW. A composição química do metal de base e o *datasheet* do arame-eletrodo utilizado também são mostrados no Apêndice I.

A Fig. 3.5 apresenta o resultado da simulação (utilizando um programa comercial da esab) da soldagem do metal de base com o arame-eletrodo propostos. Pode-se verificar que a zona fundida do cordão de solda (*weld*) terá uma microestrutura que encontra na região do diagrama livre de problemas e será formada por Austenita + Martensita + Ferrita. Assim, pode-se utilizar o arame-eletrodo AWS ER 316LSi na soldagem do metal de base requerido.

Figura 3.5 – Resultado da simulação da composição química da zona fundida utilizando o diagrama de Schaeffler (Diluição utilizada = 30%)



Fonte: Esab (2014)

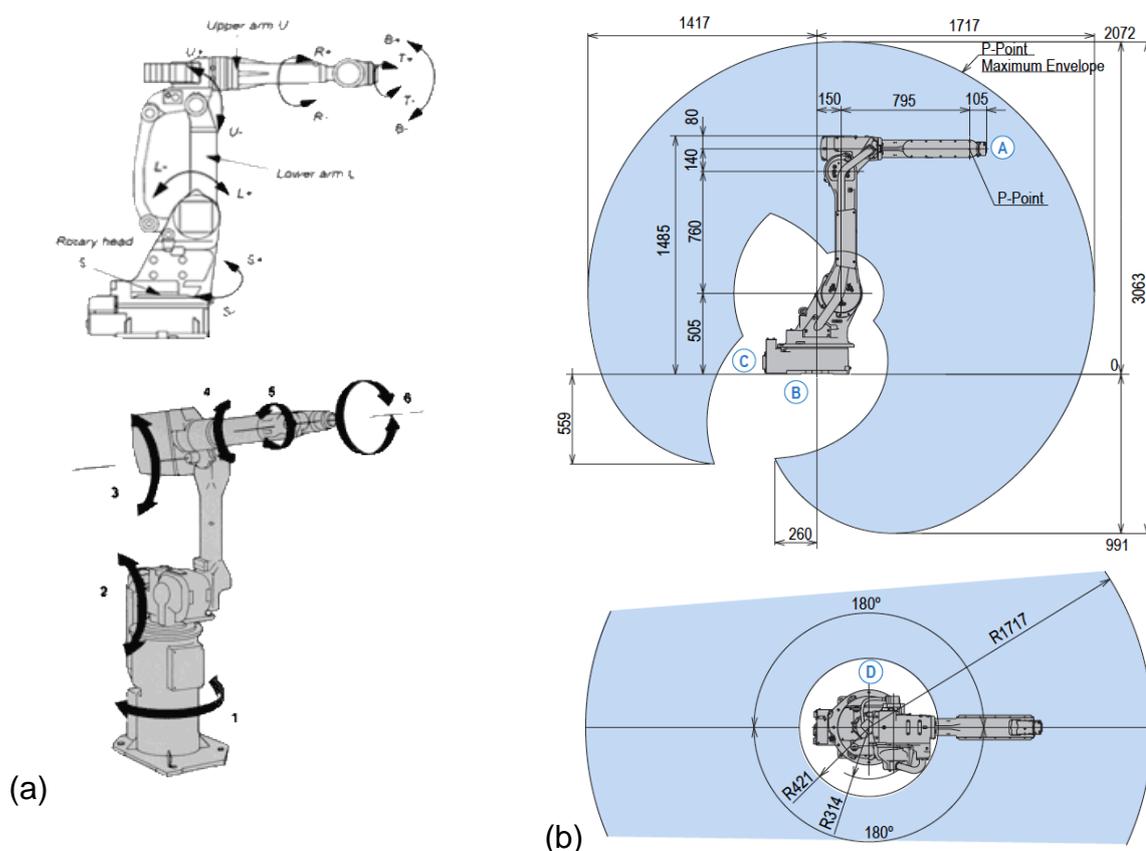
### 3.2.1.3. Gás de Proteção Utilizado nas Soldagens

O gás de proteção utilizado para as soldagens foi a mistura de Ar + 2%O<sub>2</sub> escolhido em função da recomendação de Scotti (2008). O argônio possui um baixo potencial de ionização garantindo um arco estável e com facilidade de abertura. A adição de oxigênio com teor de 2% para aços inoxidáveis aumenta a estabilidade do arco e a frequência de transferência, diminui a corrente de transição e influencia na forma do cordão de solda.

### 3.2.1.4. Sistema de Translação da Tocha

A condução da tocha de soldagem foi realizada por um robô com seis graus de liberdade do fabricante Motoman modelo HP20D e capacidade de carga na flange de 20 kg conforme observado na Fig. 3.6 onde a mesma apresenta a área de abrangência do robô de soldagem.

Figura 3.6 – (a) Ilustração dos 6 graus de liberdade do robô de soldagem. (b) Área de alcance da tocha de soldagem no robô.

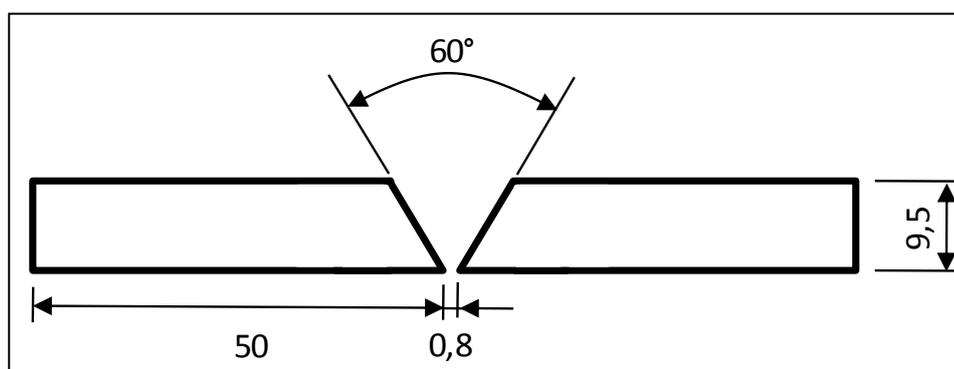


Fonte: Motoman (2014)

### 3.2.2. Confecção das Placas de Teste para Soldagem

Para confecção das placas de teste foi utilizada uma chapa de aço inoxidável 304L e 316L ambas com espessura de 9,5 mm. A Fig. 3.7 mostra as dimensões da placa de teste.

Figura 3.7 – Dimensões da seção transversal da placa de teste (comprimento de 200 mm)



dimensões em [mm]

Fonte: Próprio autor

Para preparação das placas de teste foi utilizado o processo de corte a plasma. O equipamento de corte a plasma utilizado é do fabricante Hypertherm modelo Powermax 1650 G3 series conforme visto na Fig. 3.8. O corte foi ajustado de forma a se gerar o ângulo do chanfro. Para isto, a tocha foi inclinada com ângulo de 30°. Os parâmetros utilizados para corte são mostrados na Tab. 3.1. Após o corte, a face do chanfro foi aplainada com objetivo de ajuste das dimensões e retirada da zona termicamente afetada pelo corte térmico (Fig. 3.9). Para montagem da configuração configuração da junta e para manter a abertura de raiz com a dimensão uniforme, a placa de teste foi ponteadada, conforme mostrado na Fig. 3.10, e foi utilizado um espaçador entre as chapas para produzir a abertura de raiz desejada.

Tabela 3.1 – Valores regulados para o corte a plasma

Inclinação da tocha (°)	Pressão (bar)	Ir (A)	DBP (mm)	Velocidade de corte (mm/min)
30	5	0	3	800

*Ir = Corrente regulada; DBP = distância bocal peça*

Figura 3.8 – Equipamento de Corte a Plasma



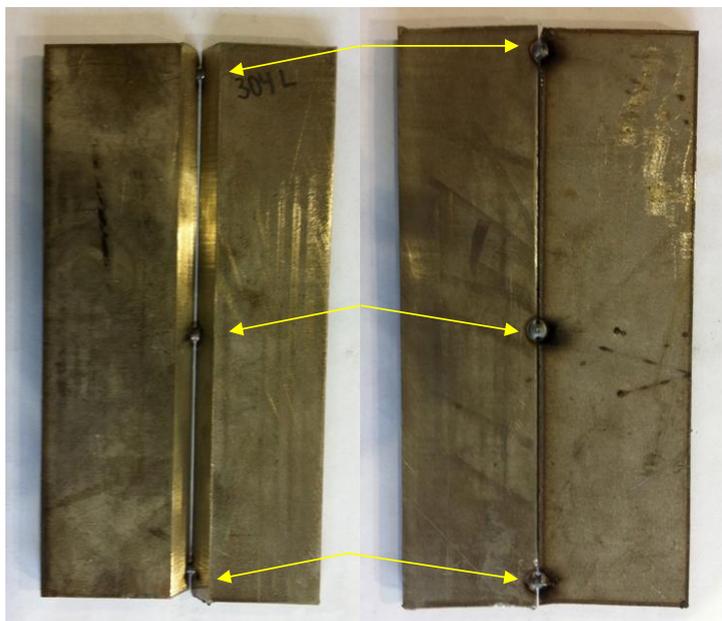
Fonte: Hypertherm (2014)

Figura 3.9 – Aplainamento para ajuste do ângulo do chanfro e retirada da zona termicamente afetada pelo corte térmico



Fonte: Próprio autor

Figura 3.10 – Ponteamento das placas de teste para manutenção da abertura requerida (as setas em amarelo mostram as posições dos pontos de solda)

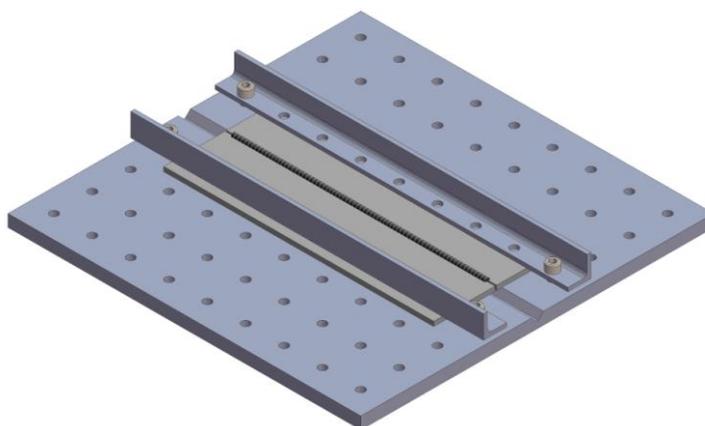


Fonte: O autor

### 3.2.3. Confeção do Suporte de Fixação das Placas de Teste

A fim de impedir a movimentação e restringir o empenamento das placas de teste durante a soldagem, foi concebido um projeto de suporte para fixação das mesmas conforme ilustrado na Fig. 3.11. A Fig. 3.12 mostra um corpo de prova fixado no suporte de fixação. O suporte de fixação das placas de teste apresenta um rasgo na sua base para proporcionar a soldagem sem a utilização de cobrejunta.

Figura 3.11 – Projeto suporte para fixação das placas de teste.



Fonte: Próprio autor

Figura 3.12 – Suporte para fixação das placas de teste (atentar para o rasgo na base do suporte para proporcionar soldagem)



Fonte: Próprio autor

Para a condição de tecimento do tipo “Zig-Zag”, utilizou-se uma amplitude de movimento de 6,0 mm e uma frequência de 3 Hz para a realização do cordão de solda.

#### 3.2.4. Medição com a Máquina de Medir Coordenadas

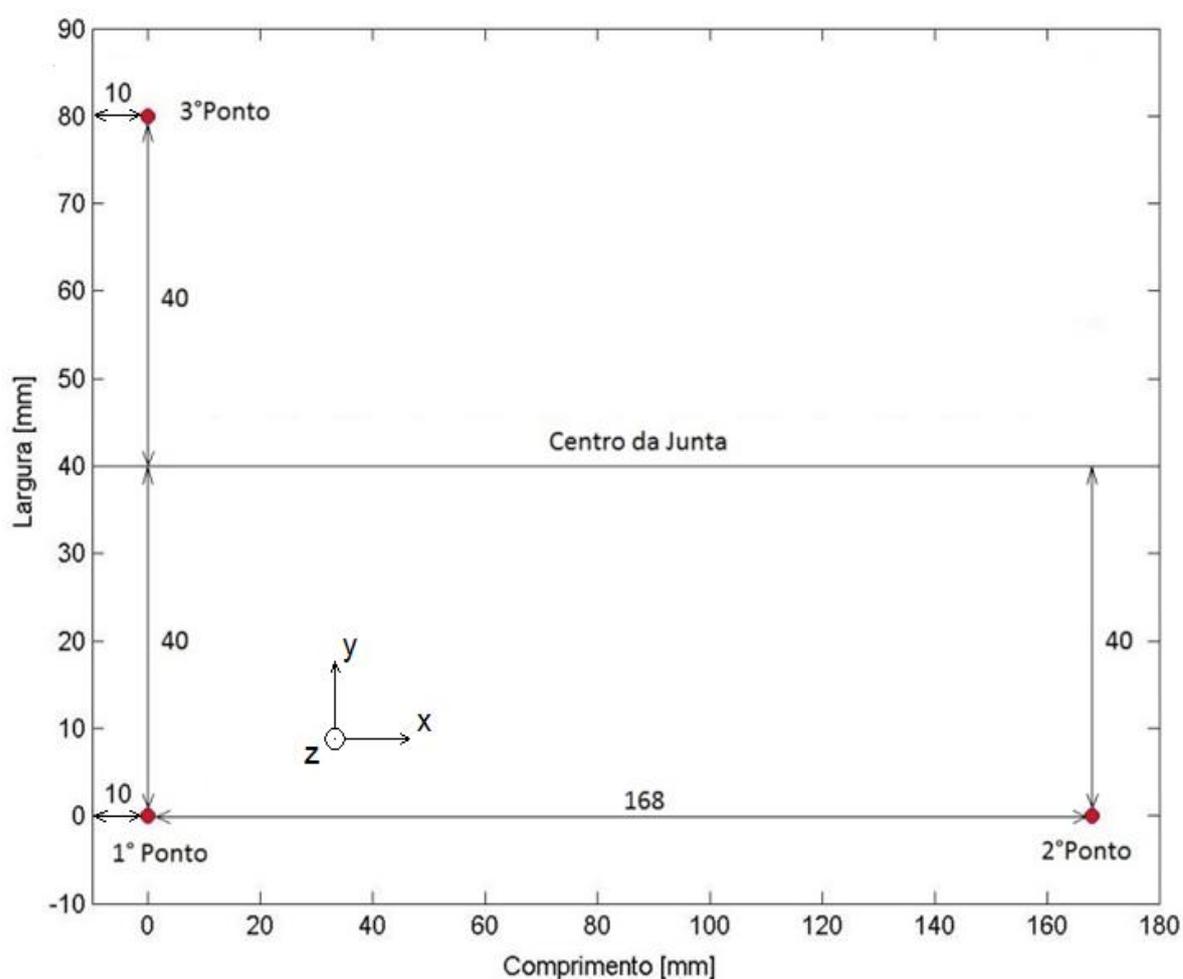
Com o objetivo de quantificar os níveis de distorções resultantes apenas do processo de soldagem, foram necessárias dois conjuntos de medições para cada amostra. O primeiro conjunto de medições foi feito antes do processo de soldagem, com as duas chapas a serem unidas apenas com ponteamento nas extremidades e no centro. O segundo conjunto de medições foi feito depois que as chapas foram soldadas. No final, os resultados de deslocamento em Z do segundo conjunto de medições são subtraídos do primeiro conjunto de medições. Sendo que as posições X e Y são as mesmas nas duas condições.

Este primeiro conjunto de medições identifica problemas de empenamento e desalinhamento das chapas antes da soldagem, fazendo com que estas condições iniciais sejam subtraídas dos resultados finais das distorções. Já para o segundo conjunto de medições, depois de soldadas as chapas foram mantidas na sala climatizada por 24 horas com uma temperatura constante de 20°C. Esta temperatura

foi a mesma do primeiro conjunto de medições. No intervalo entre um passe e outro, esperou-se que a temperatura das chapas estabilizar na temperatura ambiente.

Para o início das medições, as chapas ponteadas e não soldadas são marcadas em três pontos, conforme mostra a Fig. 3.13. Este três pontos definem um plano de referência na máquina indicando como valor de  $Z=0$ . Estas marcações são para que os planos de referência antes e depois da soldagem sejam os mesmos ou muito próximos, minimizando assim erros de medições.

Figura 3.13. Pontos de medição plano de referência da máquina de coordenadas [mm].



Fonte: Próprio autor

Para as medições, deve ser criada uma malha de pontos com a posição XY, definidas na programação da mesa de coordenadas, conforme mostra a Fig. 3.14. A malha definida é de 15 x 4 de um lado e do outro do cordão de solda com distanciamento de 12 mm na direção X e 11 mm na direção Y. Estas medições são



Figura 3.15. Mesa de medição por coordenadas



Fonte: Próprio autor

### 3.2.5. Procedimento de Soldagem

Foram realizadas soldagens nas chapas de aço inoxidável 304L e 316L com e sem restrições nas condições de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento e 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento. Em cada condição analisada foram soldados 3 corpos de prova num total de 24 corpos de prova.

Para todas as soldagem buscou-se a utilização da mesma energia de soldagem para as condições de passe de raiz + 1 passe de enchimento e passe de raiz + 2 passes de enchimento conforme a Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Valores para energia de soldagem medida

		Raiz			Enchimento 1			Enchimento 2			E
		U [V]	I [A]	Vsol [cm/min]	U [V]	I [A]	Vsol [cm/min]	U [V]	I [A]	Vsol [cm/min]	
304L	Raiz + 1 passe	16,6	155	25	27,5	253	18	-	-	-	489,4
	Raiz + 2 passes	16,6	153	25	24,3	230	29	24,2	230	29	486,2
316L	Raiz + 1 passe	15,2	144	25	23,5	233	16	-	-	-	429,8
	Raiz + 2 passes	15,4	142	25	22,4	221	29	22,4	220	29	428,1

Fonte: Próprio autor

## 3.2.5.1. Soldagem das Placas de Aço AISI 304L

**Passe de Raiz**

Os parâmetros utilizados para soldagem dos passes de raiz para o aço 304L são mostrados na Tab. 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 304L.

Teste	Ur (V)	Valim (m/min)	Vsold (cm/min)	DBCP (mm)
32 (raiz)	16,5	5,5	25	12

*Ur = tensão de regulada na fonte; Valim = velocidade de alimentação; Vsold = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça.*

**Condição 1: Passe de Raiz + 1 Passe de enchimento**

Os parâmetros utilizados para soldagens as placas de teste de 304L com 2 passes são mostrados na Tab. 3.4. O passe de enchimento foi realizado com a

tocha reta posicionando-se o arame transversalmente no centro do passe de raiz previamente realizado.

Tabela 3.4. Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 304L.

Teste	Ur (V)	Valim (m/min)	Vsold (cm/min)	DBCP (mm)
40 (raiz)	16,5	5,5	25	12
41 (enchimento)	27,0	14,2	18	18

*Ur = tensão de regulada na fonte; Valim = velocidade de alimentação; Vsold = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça.*

### Condição 2: Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento

Os parâmetros utilizados para soldagens as placas de teste de 304L com 3 passes são mostrados na Tab. 3.5. O 1º passe de enchimento foi realizado com a tocha reta posicionando-se o arame no centro do passe de raiz previamente realizado. O 2º passe foi realizado com a tocha inclinada em 20º puxando com o arame transversalmente posicionado no centro do 1º passe.

A inclinação da tocha de soldagem para a realização do processo influência na penetração do cordão de solda. A inclinação de 20º puxando foi necessária pois permitiu que uma maior penetração fosse alcançada para assim conseguir um cordão de solda com reforço apropriado.

Tabela 3.5. Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 304L.

Teste	Ur (V)	Valim (m/min)	Vsold (cm/min)	DBCP (mm)
75 (raiz)	16,5	5,5	25	12
76 (1º passe)	23,0	13,7	29	18
77 (2º passe - enchimento)	23,0	13,7	29	18

*Ur = tensão de regulada na fonte; Valim = velocidade de alimentação; Vsold = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça.*

### 3.2.5.2. Soldagem das Placas de Teste do Aço AISI 316L

#### Passe de Raiz

Os parâmetros utilizados para soldagem dos passes de raiz para o aço 316L são mostrados na Tab. 3.6.

Tabela 3.6. Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 316L

Teste	Ur (V)	Valim (m/min)	Vsold (cm/min)	DBCP (mm)
55 (raiz)	15	5,0	25	12

*Ur = tensão de regulada na fonte; Valim = velocidade de alimentação; Vsold = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça.*

#### Condição 1: Passe de Raiz + 1 Passe de enchimento

Os parâmetros utilizados para soldagens das placas de teste de 316L são mostrados na Tab. 3.7. O passe de enchimento foi realizado de forma reta posicionando-se o arame no centro do passe de raiz previamente realizado.

Tabela 3.7. Parâmetros utilizados para soldagem placas de testes de 316L

Teste	Ur (V)	Valim (m/min)	Vsold (cm/min)	DBCP (mm)
55 (raiz)	15	5,0	25	12
59 (enchimento)	23	13	16	18

*Ur = tensão de regulada na fonte; Valim = velocidade de alimentação; Vsold = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça.*

#### Condição 2: Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento

Os parâmetros utilizados para soldagens as placas de teste de 316L com 3 passes são mostrados na Tab. 3.8. O 1º passe de enchimento foi realizado com a tocha reta posicionando-se o arame no centro do passe de raiz previamente realizado. O 2º passe foi realizado também com a tocha reta com o arame transversalmente posicionado no centro do 1º passe.

Tabela 3.8 - Parâmetros utilizados para soldagem placas de teste de 316L.

Teste	Ur (V)	Valim (m/min)	Vsold (cm/min)	DBCP (mm)
69 (raiz)	15	5,0	25	12
70 (1º passe)	22	13,7	29	18
71 (2º passe - enchimento)	22	13,7	29	18

*Ur = tensão de regulada na fonte; Valim = velocidade de alimentação; Vsold = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça.*

Em ambas as placas serão realizadas soldagens sem restrição e com restrição ao movimento angular.

### 3.2.6 . Medição do Ângulo de Distorção

Para a medição do ângulo de distorção é necessário aplicar um corte transversal ao cordão de solda e utilizar a Eq. fundamental da reta.

$$y - y_0 = m(x - x_0) \quad (2)$$

Onde:

- y – Ponto 1 no eixo das coordenadas
- y<sub>0</sub> – Ponto 2 no eixo das coordenadas
- m – coeficiente angular
- x – Ponto 1 no eixo das abscissas
- x<sub>0</sub> – Ponto 2 no eixo das abscissas

O coeficiente angular “m” também é conhecido como a declividade de uma reta é o numero real que expressa a tangente trigonométrica de sua inclinação, ou seja  $m = \tan \alpha$ . Isolando o coeficiente angular e substituindo tem-se a Eq. 3.

$$\alpha = \arctan \left( \frac{y - y_0}{x - x_0} \right) \quad (3)$$

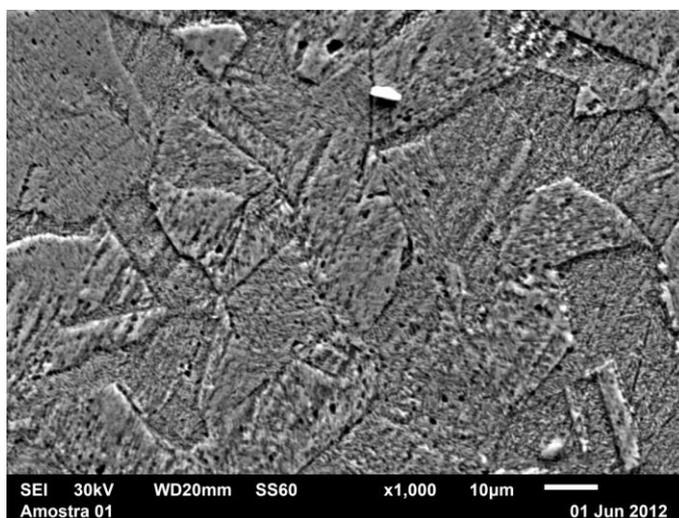
Onde:  $\alpha$  - Ângulo de inclinação da reta

## Capítulo 4 - Resultados e Discussões

### 4.1. Materiais

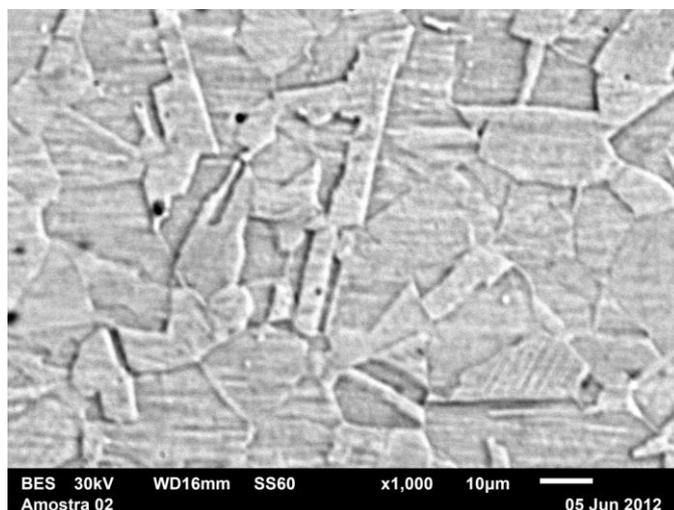
A fim de caracterizar os materiais como recebidos, realizou-se o corte das amostras e com as amostras obtidas foi realizada uma preparação metalográfica (lixamento, polimento e ataque químico - Vilela). Após o processo de preparação, estas amostras foram levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV para realizar a captura das imagens como mostram as Fig. 4.1 e 4.2.

Figura 4.1. Aço Inoxidável Austenítico AISI 304L



Fonte: Próprio autor

Figura 4.2: Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L



Fonte: Próprio autor

Pelas Fig. 4.1 e 4.2 é possível verificar os grãos austeníticos deformados com a presença de grandes irregularidades ou degraus nos contornos de grãos.

#### 4.2. Parametrização Soldagem das Placas de 304L

A realização de ensaios para parametrizar a soldagem é de suma importância para verificar a qualidade da junta soldada. Uma análise visual da macroestrutura da zona afetada termicamente foi realizada para verificar a homogeneidade do material, sua distribuição e natureza de possíveis falhas e qualidade da soldagem para as placas de 304L.

##### 4.2.1. Passe de Raiz

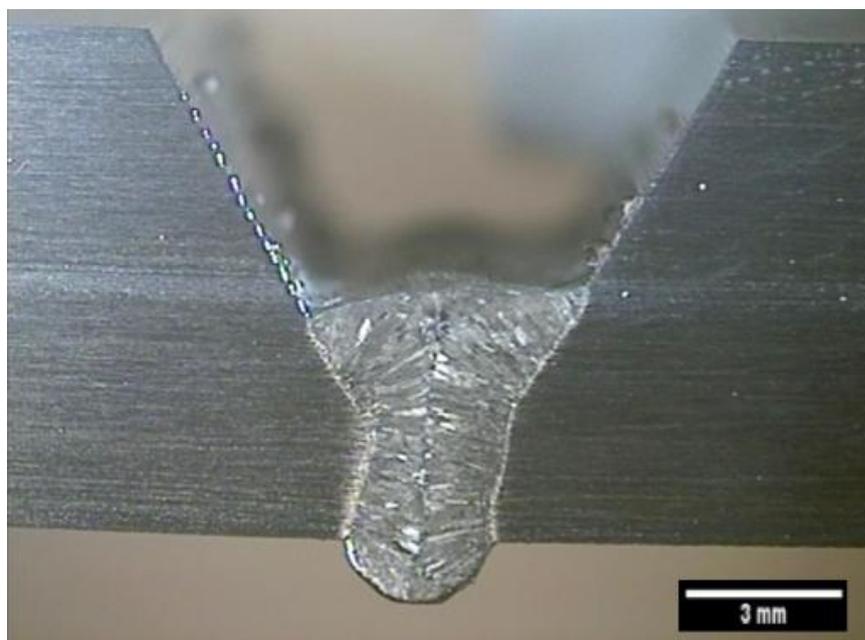
A Tab. 4.1 mostra os valores médios monitorados durante a soldagem do passe de raiz. E a Fig. 4.3 apresenta a macrografia da seção transversal com 1 passe de raiz e reforço de 1,3 mm. Pode-se observar que o passe de raiz não apresentou defeitos internos e obteve-se uma penetração total com reforço de raiz adequado.

Tabela 4.1 – Valores médios monitorados

Teste	Um (V)	Im (A)
32 (raiz)	16,6	155

*Um = Tensão média monitorada; Im = Corrente média monitorada*

Figura 4.3 – Macrografia da seção transversal do passe de raiz  
(reforço de raiz = 1,3 mm)



Fonte: Próprio Autor

#### 4.2.2. Passe de Raiz e Passe de enchimento

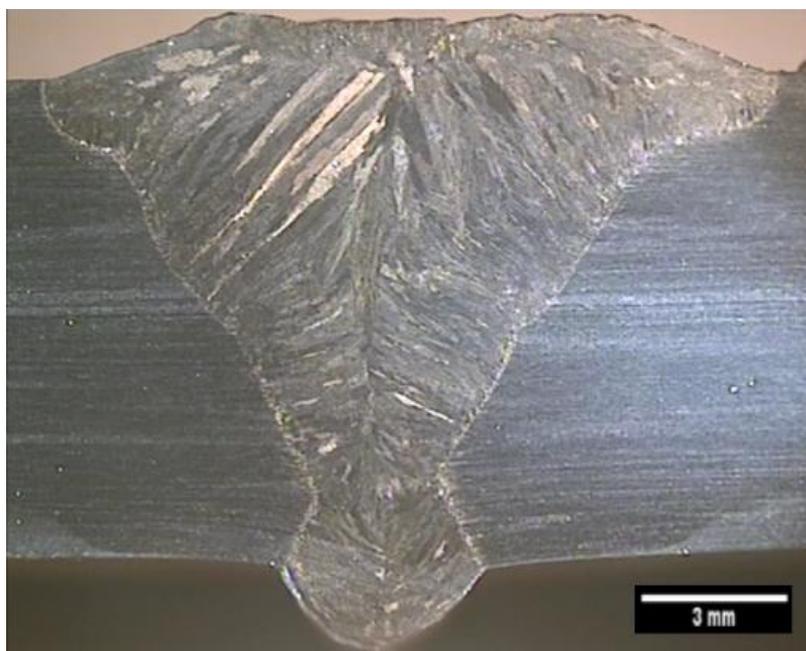
A Tab. 4.2 mostra os valores médios de tensão e corrente monitorados durante a soldagem dos passes. A Fig. 4.4 mostra a macrografia da seção transversal. Pode-se observar que o cordão realizado apresentou boa molhabilidade e reforço de raiz e face com dimensões aceitáveis (no caso do reforço da face, para o presente trabalho é aceitável acima da superfície da face, não caracterizando falta de enchimento e menor do que 3 mm).

Tabela 4.2 - Valores médios de tensão e corrente monitorados para a condição de passe de raiz + 1 passe de enchimento do aço 304L.

Teste	Um (V)	Im (A)
40 (raiz)	16,6	156
41 (enchimento)	27,5	250

*Um = Tensão média monitorada; Im = Corrente média monitorada*

Figura 4.4. Macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 40-41  
(reforço de raiz = 1,4 mm / reforço da face = 1.2 mm)



Fonte: Próprio Autor

#### 4.2.3. Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento

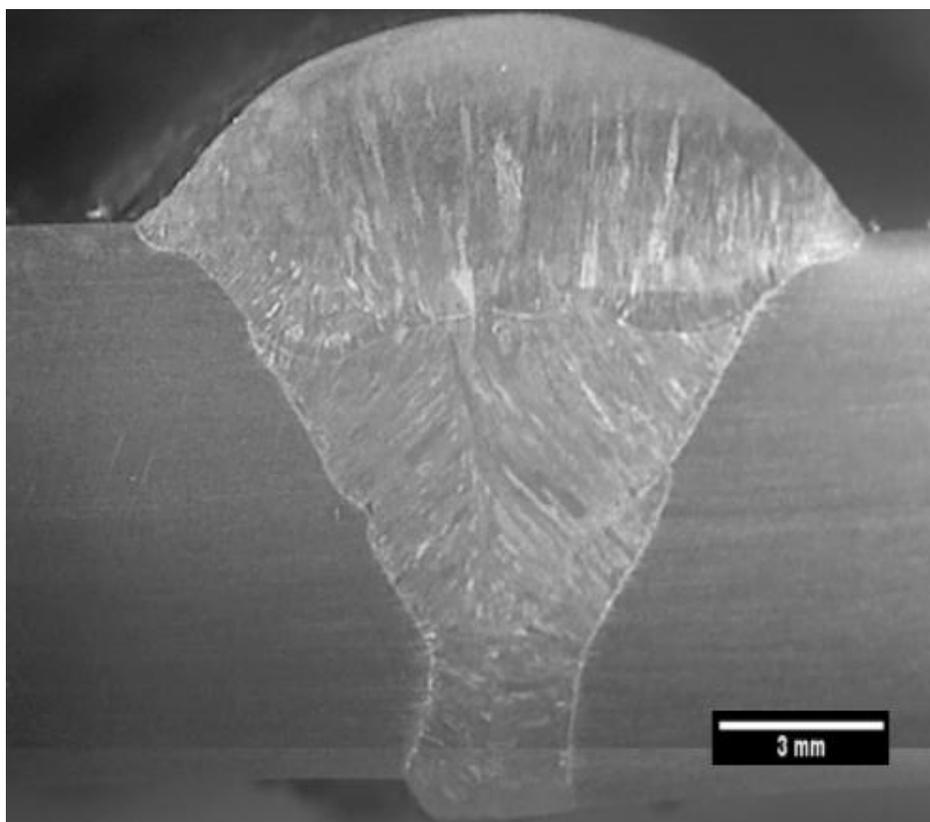
A Tab. 4.3 mostra os valores médios de tensão e corrente monitorados durante a soldagem dos passes. A Fig. 4.5 mostra a macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 75-76-77. Pode-se observar que o cordão realizado apresentou reforços de face e raiz adequados.

Tabela 4.3. Valores médios de tensão e corrente monitorados para a condição passe de raiz + 2 passes de enchimento do aço 304L

Teste	Um (V)	Im (A)
75 (raiz)	16,7	164
76 (1º passe)	23,2	226
77 (2º passe - tecimento)	23,2	222

*Um = Tensão média monitorada; Im = Corrente média monitorada*

Figura 4.5. Macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 75-76-77  
(reforço de raiz = 0,7 mm / reforço da face = 3.4 mm)



Fonte: Próprio Autor

#### 4.3. Parametrização Soldagem das Placas de 316L

Para as placas de aço inoxidável 316L foram realizados ensaios de parametrização da soldagem, pois é de suma importância verificar a qualidade da junta soldada. Uma análise visual da macroestrutura da zona afetada termicamente foi realizada para verificar a homogeneidade do material, sua distribuição e natureza de possíveis falhas e qualidade da soldagem para as placas de 316L.

##### 4.3.1. Passe de Raiz

A Tab. 4.4 mostra os valores médios monitorados durante a soldagem do passe de raiz das placas do aço 316L e a Fig. 4.6 apresenta a macrografia da seção transversal com 1 passe de raiz e reforço de 1,1 mm. Pode-se observar que o passe

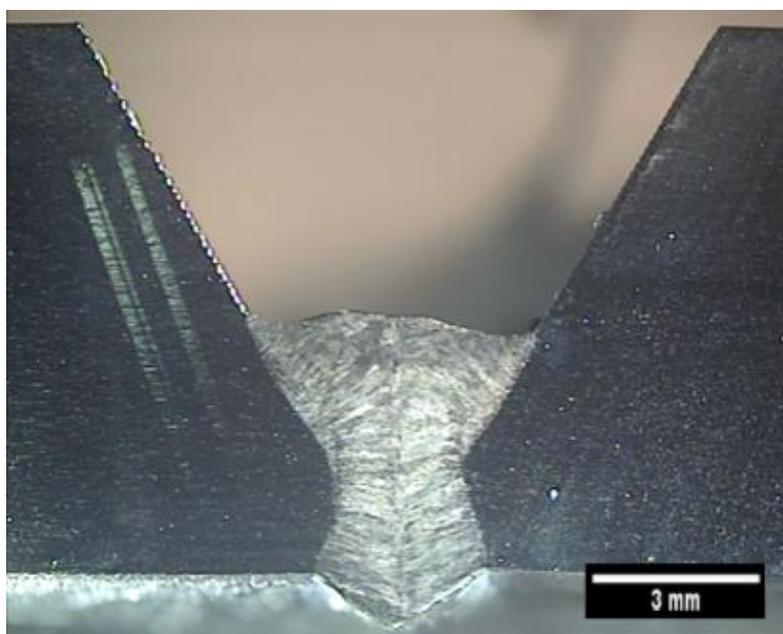
de raiz não apresentou defeitos internos e obteve-se uma penetração total com reforço de raiz adequado.

Tabela 4.4 – Valores médios monitorados

Teste	Um (V)	Im (A)
55 (raiz)	15,2	144

*Um = Tensão média monitorada; Im = Corrente média monitorada*

Figura 4.6 – Macrografia da seção transversal do passe de raiz  
(reforço de raiz = 1,1 mm)



Fonte: Próprio Autor

#### 4.3.2. Passe de Raiz + 1 Passe de enchimento

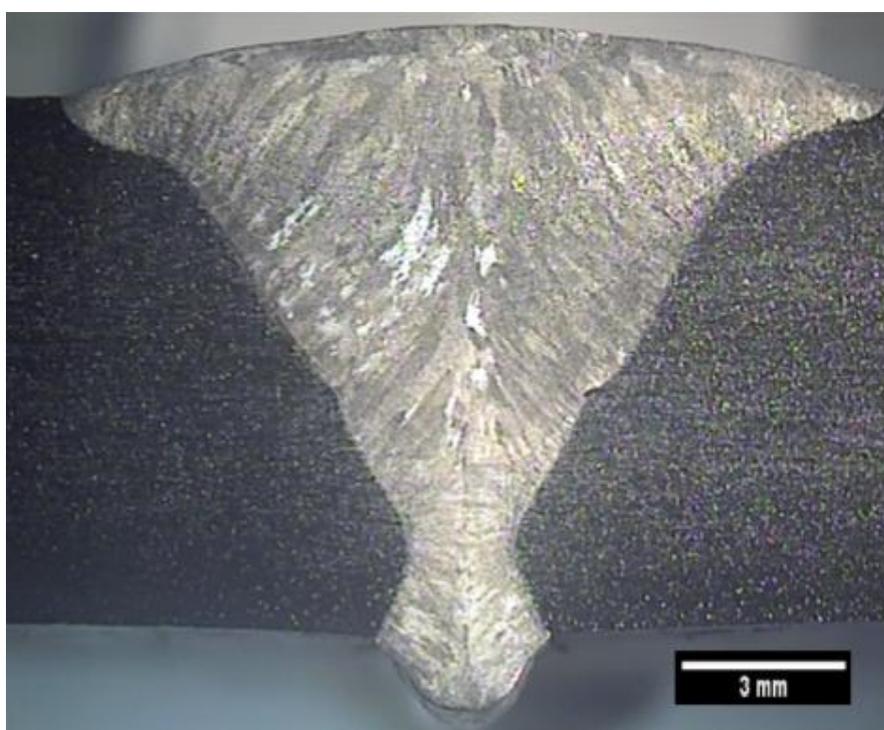
A Tab. 4.5 mostra os valores médios de tensão e corrente monitorados durante a soldagem dos passes nas placas de teste do 316L. A Fig. 4.7 mostra a macrografia da seção transversal. Pode-se observar que o cordão realizado apresentou boa molhabilidade e reforços de raiz e face com dimensões adequadas.

Tabela 4.5. Valores médios de tensão e corrente monitorados para a condição passe de raiz + 1 passe de enchimento do aço 316L

Teste	Um (V)	Im (A)
55 (raiz)	15,2	144
59 (enchimento)	23,5	233

*Um = Tensão média monitorada; Im = Corrente média monitorada*

Figura 4.7. Macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 55-59 (reforço de raiz = 1,1 mm / reforço da face = 1,1 mm)



Fonte: Próprio Autor

#### 4.3.3. Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento

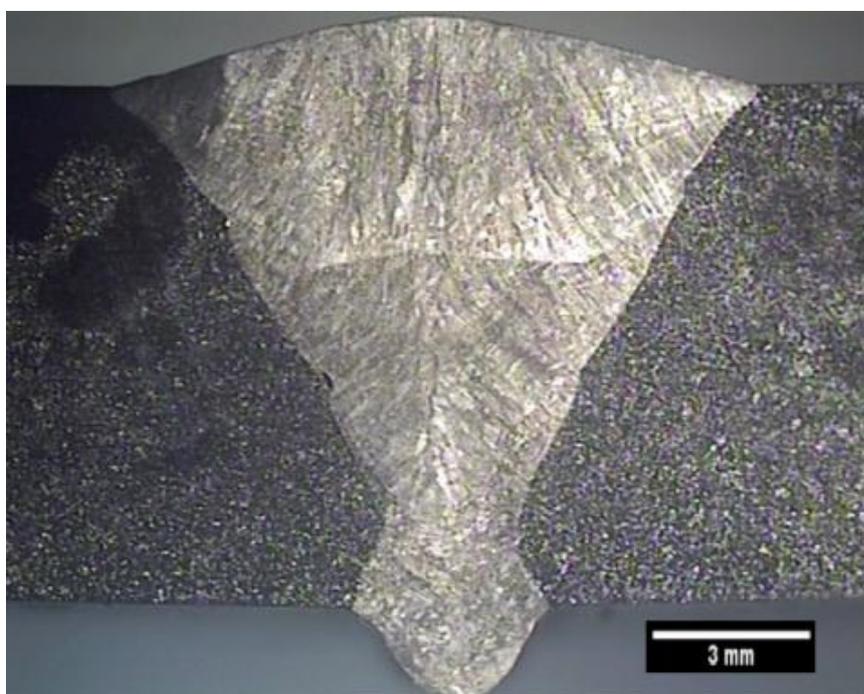
A Tab. 4.6 mostra os valores médios de tensão e corrente monitorados durante a soldagem dos passes. A Fig. 4.8 mostra a macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 69-70-71. Pode-se observar que o cordão realizado apresentou reforço de face e raiz adequados e não apresenta descontinuidades internas.

Tabela 4.6. Valores médios de tensão e corrente monitorados para a condição 2 do aço 316L

Teste	Um (V)	Im (A)
69 (raiz)	15,2	128
70 (1º passe)	22,3	219
71 (2º passe - tecimento)	22,3	219

*Um = Tensão média monitorada; Im = Corrente média monitorada*

Figura 4.8. Macrografia da seção transversal do cordão dos Testes 69-70-71 (reforço de raiz = 1,5 mm / reforço da face = 1,2 mm)

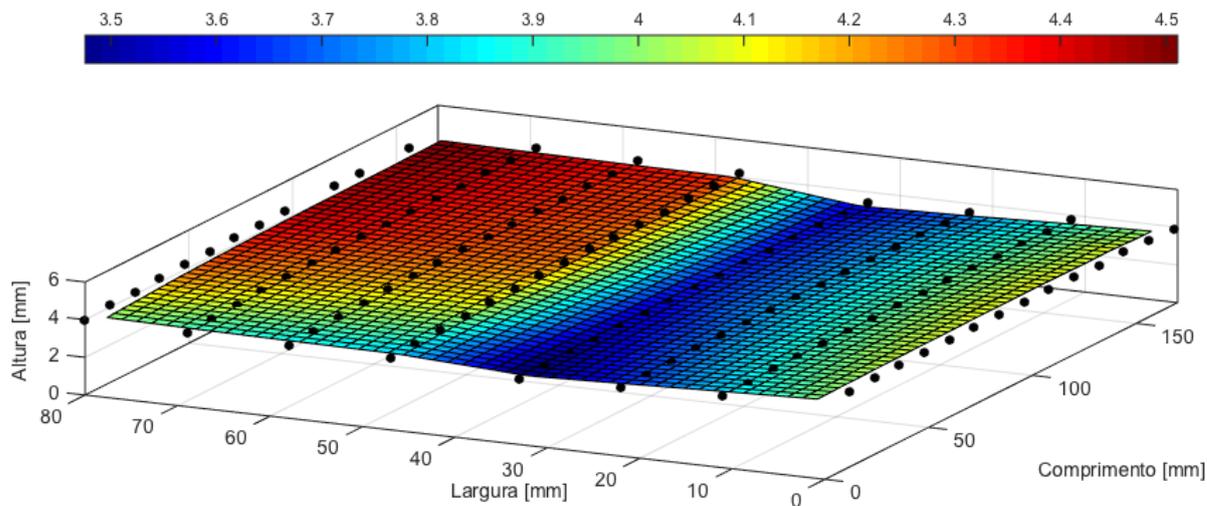


Fonte: Próprio autor

#### 4.4. Medição Inicial de Coordenadas

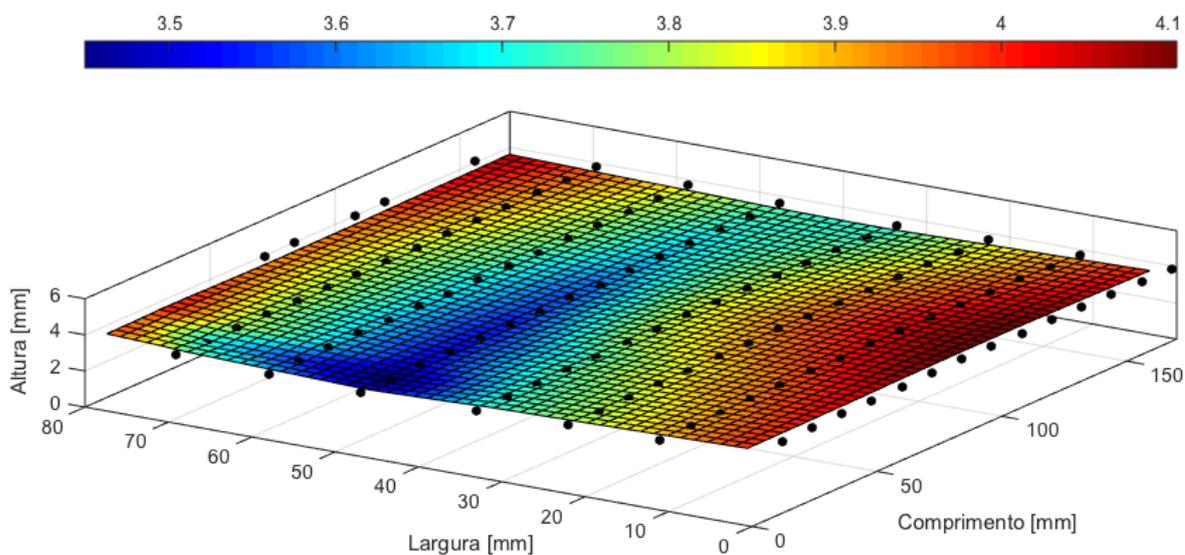
Após a preparação das placas teste para a realização da soldagem, as mesmas foram ponteadas e levadas à máquina de medir coordenadas. As Fig. 4.9 e Fig. 4.10 mostram as deformações e desalinhamentos das chapas de 304L e 316L antes do processo de soldagem. A identificação das cores representa um maior afastamento do ponto de referência. As Fig. 4.9 e Fig. 4.10 mostram ainda os níveis de distorções resultado do processo de soldagem juntamente com as distorções e desalinhamento das chapas antes do processo de soldagem.

Figura 4.9 - Medição das placas de teste antes da soldagem para o aço 304L



Fonte: Próprio autor

Figura 4.10 - Medição das placas de teste antes da soldagem para o aço 316L [mm]



Fonte: Próprio autor

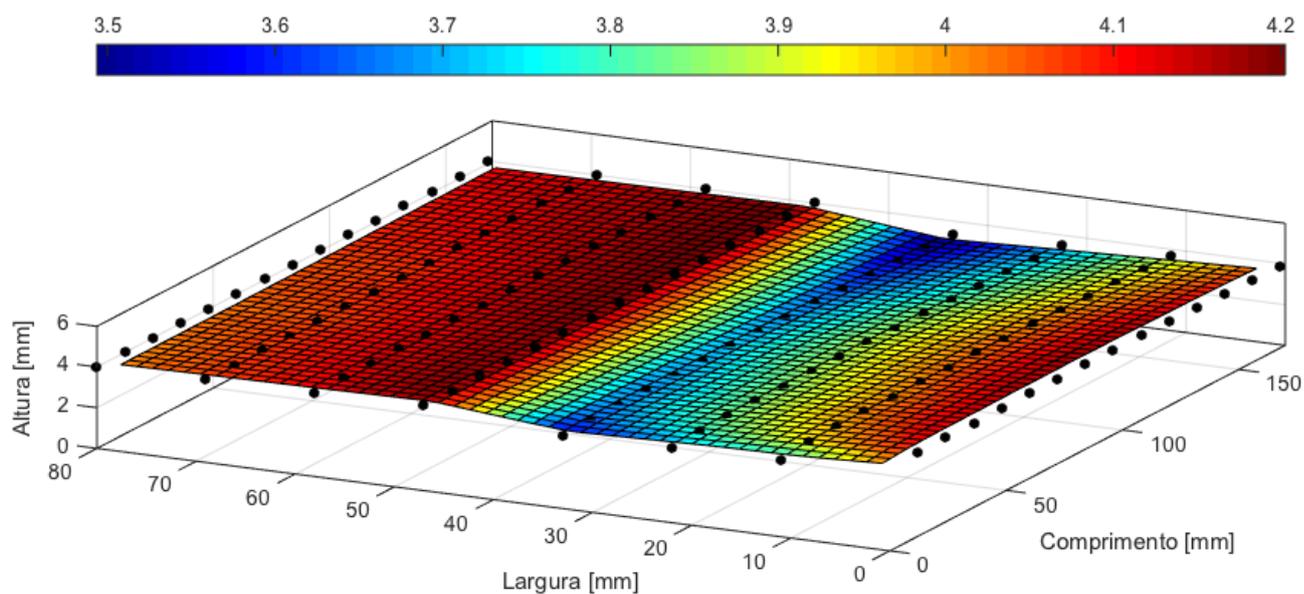
Nota-se que em ambas as chapas apresentaram uma distorção prévia. Apesar de serem valores baixos (KYRIANKONGONAS, 2010), eles podem interferir nos resultados finais, aumentando assim os erros de medições.

## 4.5. Medição Placas de 304L na Máquina de Medir Coordenadas Após a Soldagem

### 4.5.1. Medição 304L - Passe de Raiz + 1 Passe de enchimento – Sem Restrição

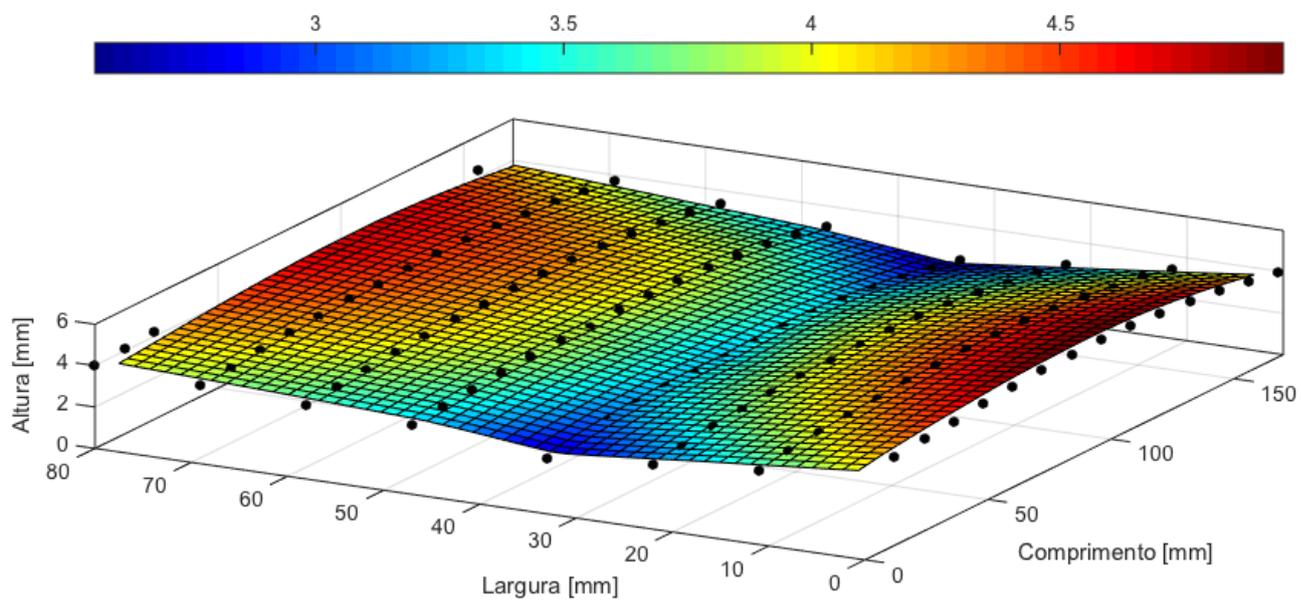
Após a realização das soldagens conforme procedimentos já mencionados, foram realizadas medições utilizando a máquina de medir coordenadas nos pontos pré estabelecidos. A Fig. 4.11 apresenta as medições das distorções antes da realização dos procedimentos de soldagem. A Fig. 4.12 apresenta as medições geradas após a soldagem na condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento. Já a Fig. 4.13 apresenta a medição real com a subtração entre a medição após a soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem.

Figura 4.11 – Medição inicial das placas de teste sem soldagem [mm]



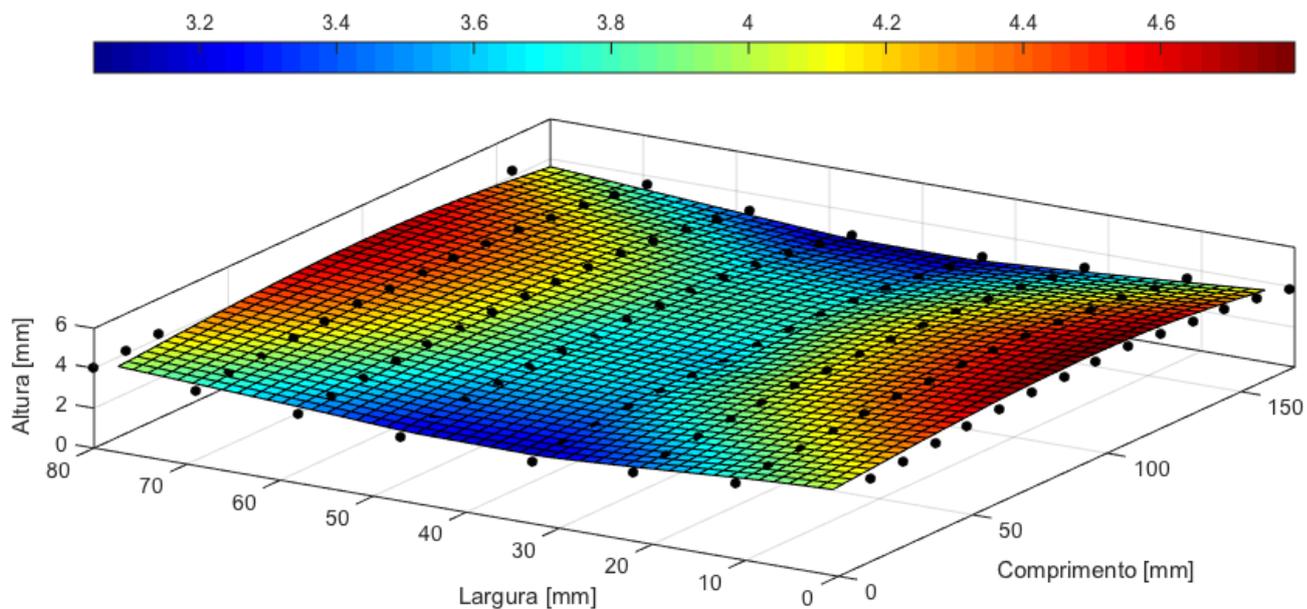
Fonte: Próprio autor

Figura 4.12 – Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 1  
passe de enchimento (sem restrição) [mm]



Fonte: Próprio autor

Figura 4.13 – Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição  
inicial da chapa sem soldagem)

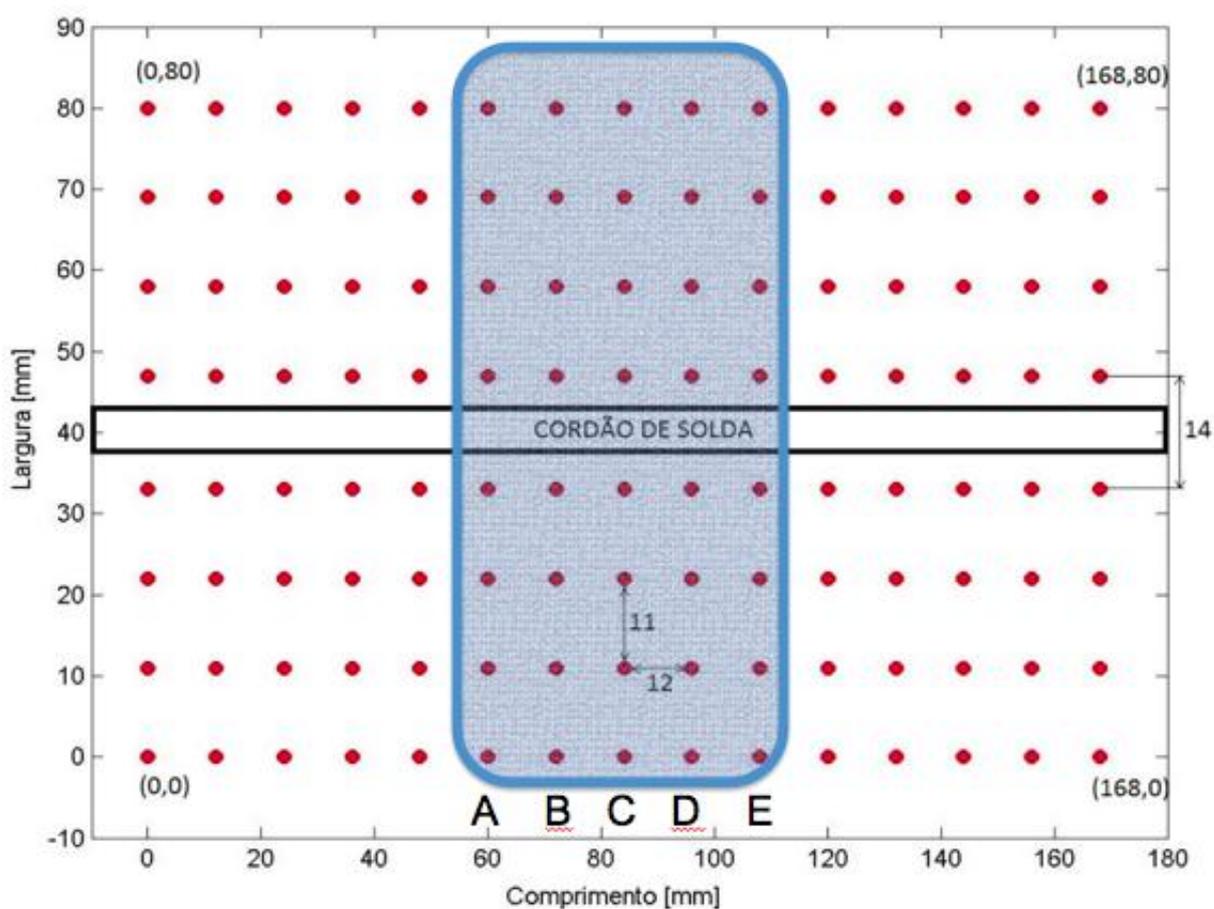


Fonte: Próprio autor

Nota-se que na Fig. 4.13 a chapa sofre flexão para o lado oposto da soldagem. Esta deformação diminui ao longo linha paralela a soldagem.

Para a realização da identificação do ângulo da distorção angular foram realizados 5 cortes da seção transversal nos pontos intermediários conforme visto na Fig. 4.14.

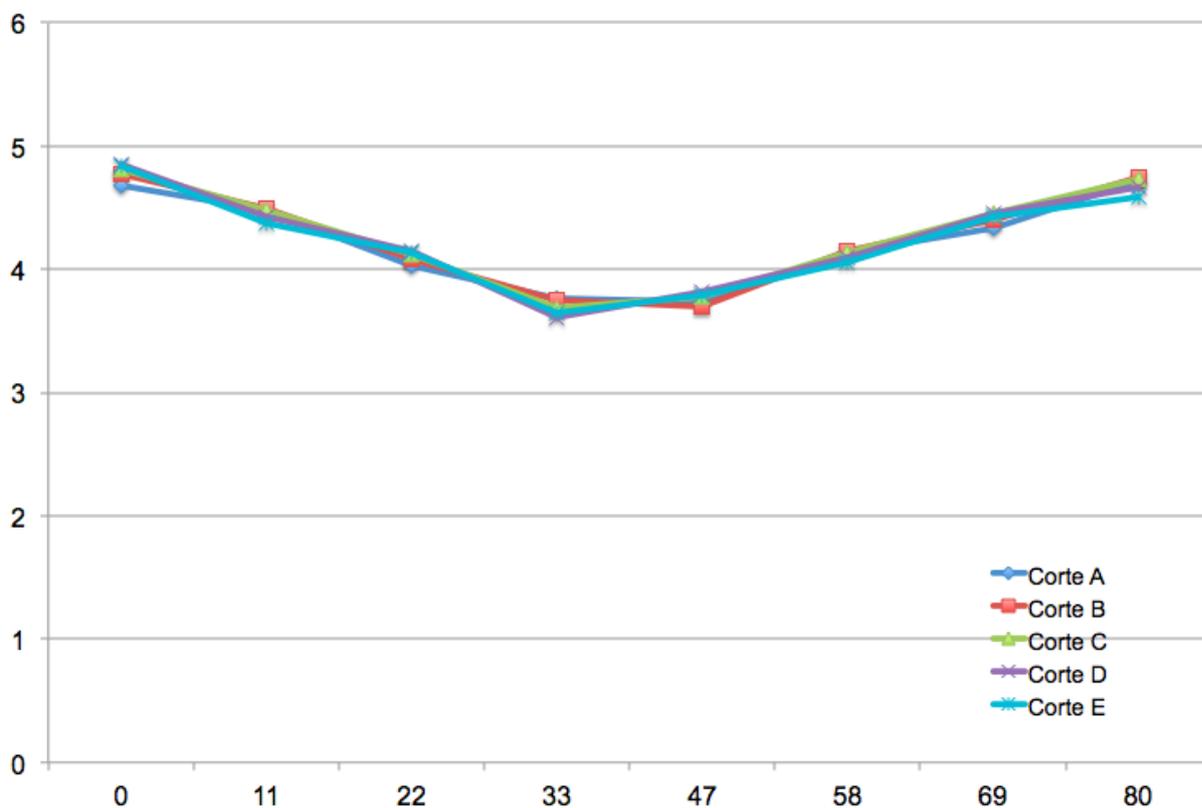
Figura 4.14 – Pontos para identificação do ângulo da distorção angular



Fonte: Próprio autor

Na Fig. 4.15 é mostrado os cortes na seção transversal da medição real para identificação do ângulo da distorção angular para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento sem restrição.

Figura 4.15 – Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento do 304L sem restrição [mm]



Fonte: Próprio autor

Os valores medidos dos cortes são mostrados na Tab. 4.7.

Tabela 4.7 – Valores medidos dos cortes transversais a peça [mm]

Corte A		Corte B		Corte C		Corte D		Corte E	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
0	4.683	0	4.772	0	4.810	0	4.848	0	4.836
11	4.480	11	4.493	11	4.474	11	4.428	11	4.370
22	4.033	22	4.077	22	4.121	22	4.150	22	4.139
33	3.761	33	3.750	33	3.689	33	3.610	33	3.646
47	3.731	47	3.693	47	3.778	47	3.821	47	3.791
58	4.135	58	4.153	58	4.131	58	4.096	58	4.049
69	4.338	69	4.401	69	4.450	69	4.456	69	4.425
80	4.725	80	4.740	80	4.725	80	4.667	80	4.592

Com os valores da Fig. 4.15 obteve-se o ângulo de  $1,76^\circ \pm 0,25$  para a distorção angular. Utilizando a Eq. 3. Este valor é a média das 10 retas obtidas pelos 5 cortes transversais mostrados na Tab. 4.8.

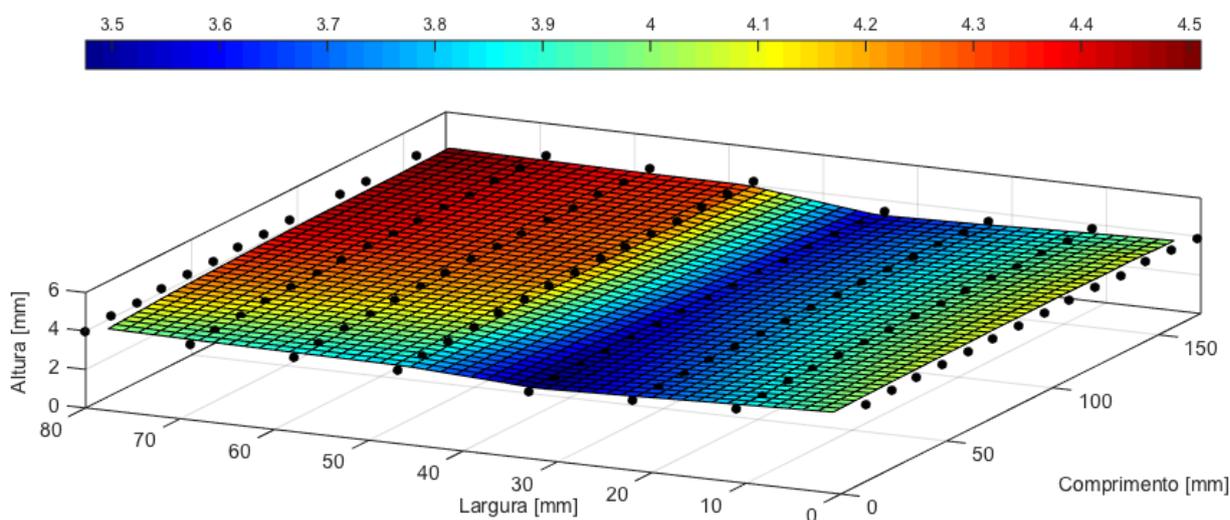
Tabela 4.8 – Ângulos obtidos do corte transversal

	Ângulos	
Corte A	1,60°	1,72°
Corte B	1,78°	1,82°
Corte C	1,95°	1,64°
Corte D	2,15°	1,47°
Corte E	2,07°	1,39°
<b>Média</b>	<b>1,76°</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,25°</b>	

#### 4.5.2. Medição 304L - Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento – Sem Restrição

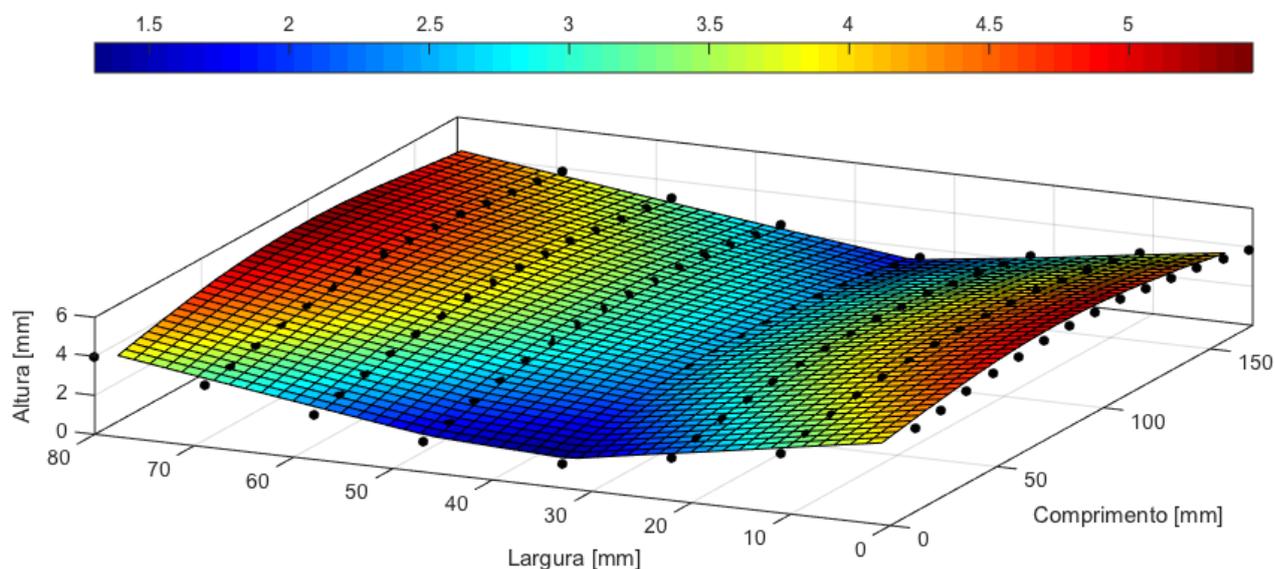
A Fig. 4.16 apresenta as medições das distorções antes da realização dos procedimentos de soldagem. A Fig. 4.17 apresenta as medições geradas após a soldagem na condição de 1 passe de raiz + 2 passe de enchimento. Já a Fig. 4.18 apresenta a medição real com a subtração entre a medição após a soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem.

Figura 4.16 – Medição inicial das placas de teste sem soldagem [mm]



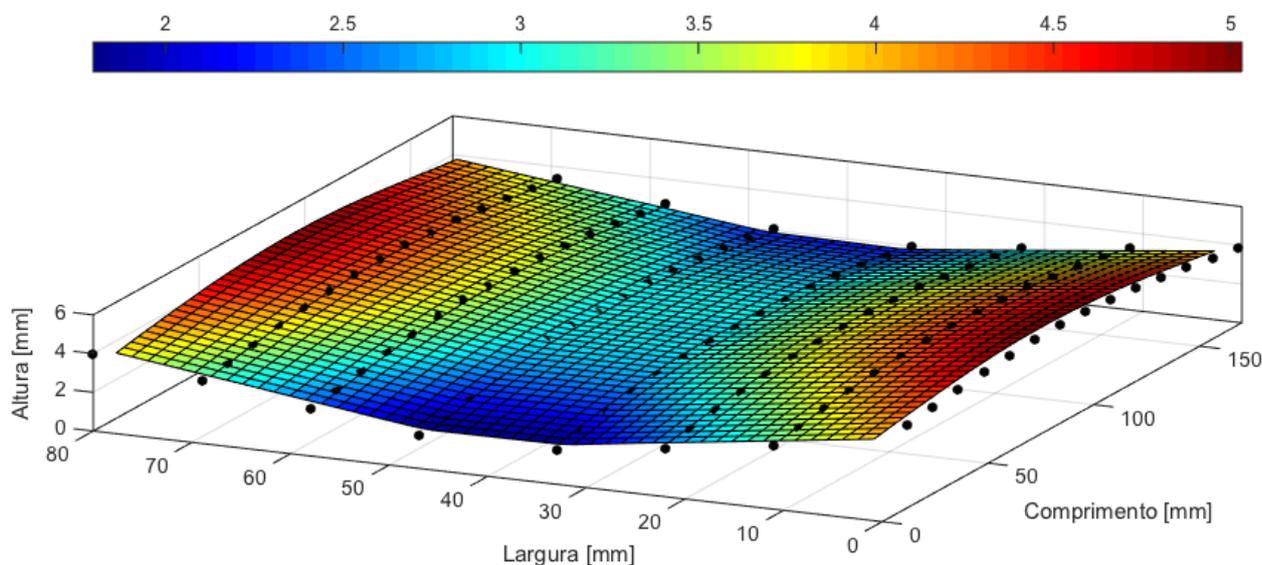
Fonte: Próprio autor

Figura 4.17 – Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 2  
passe de enchimento (sem restrição) [mm]



Fonte: Próprio autor

Figura 4.18 – Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição  
inicial da chapa sem soldagem) [mm]



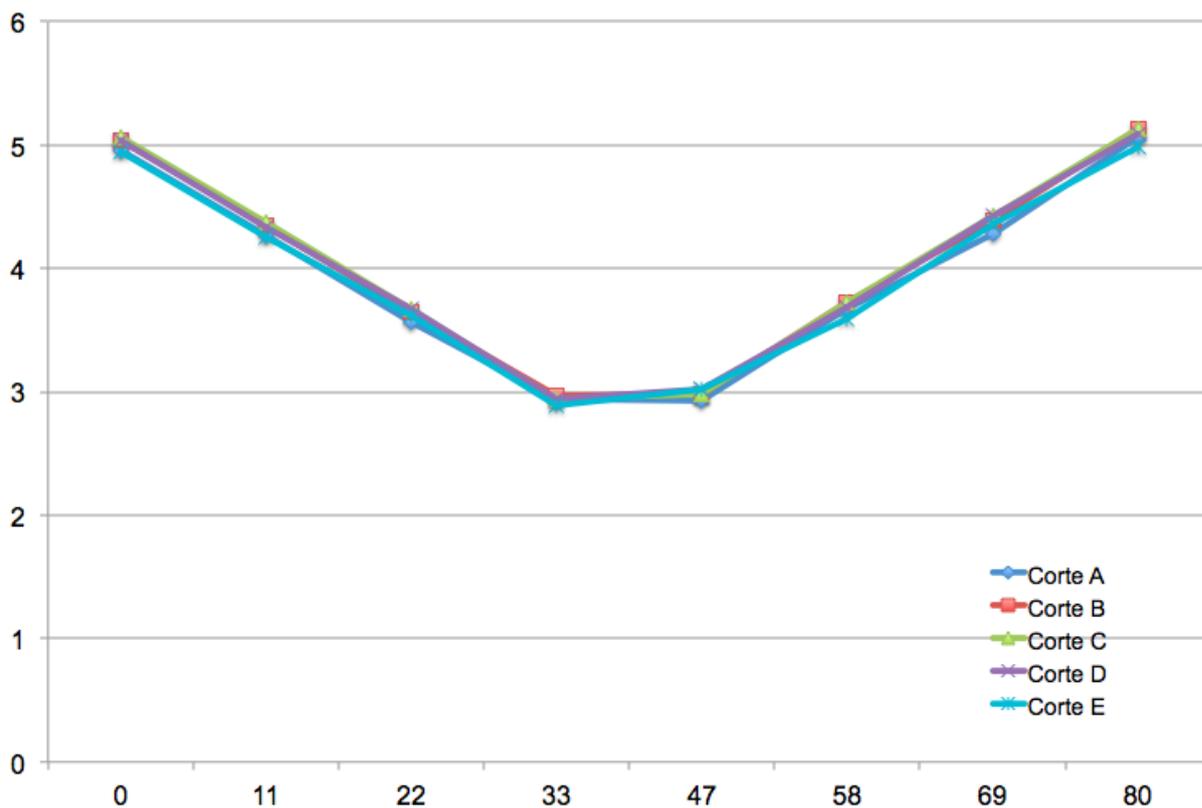
Fonte: Próprio autor

Nota-se que na Fig. 4.18 a chapa sofre flexão em todo o sentido da soldagem. Esta deformação diminui ao longo linha paralela a soldagem.

Na Fig. 4.19 são mostrados os cortes na seção transversal da medição real

para identificação do ângulo da distorção angular para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento sem restrição.

Figura 4.19 – Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento do 304L sem restrição [mm]



Fonte: Próprio autor

Os valores medidos dos cortes são mostrados na Tab. 4.9.

Tabela 4.9 – Valores medidos dos cortes transversais a peça [mm]

Corte A		Corte B		Corte C		Corte D		Corte E	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
0	4.958	0	5.043	0	5.064	0	5.033	0	4.944
11	4.271	11	4.344	11	4.367	11	4.340	11	4.252
22	3.571	22	3.647	22	3.671	22	3.665	22	3.614
33	2.942	33	2.970	33	2.941	33	2.943	33	2.889
47	2.923	47	2.982	47	2.982	47	3.015	47	3.023
58	3.675	58	3.727	58	3.718	58	3.685	58	3.588
69	4.285	69	4.388	69	4.421	69	4.422	69	4.364
80	5.066	80	5.123	80	5.134	80	5.084	80	4.987

Com os valores da Fig. 4.19 obteve-se o ângulo de  $3,61^\circ \pm 0,10^\circ$  para a distorção angular. Utilizando a Eq. 3. Este valor é a média das 10 retas obtidas pelos 5 cortes transversais mostrados na Tab. 4.10.

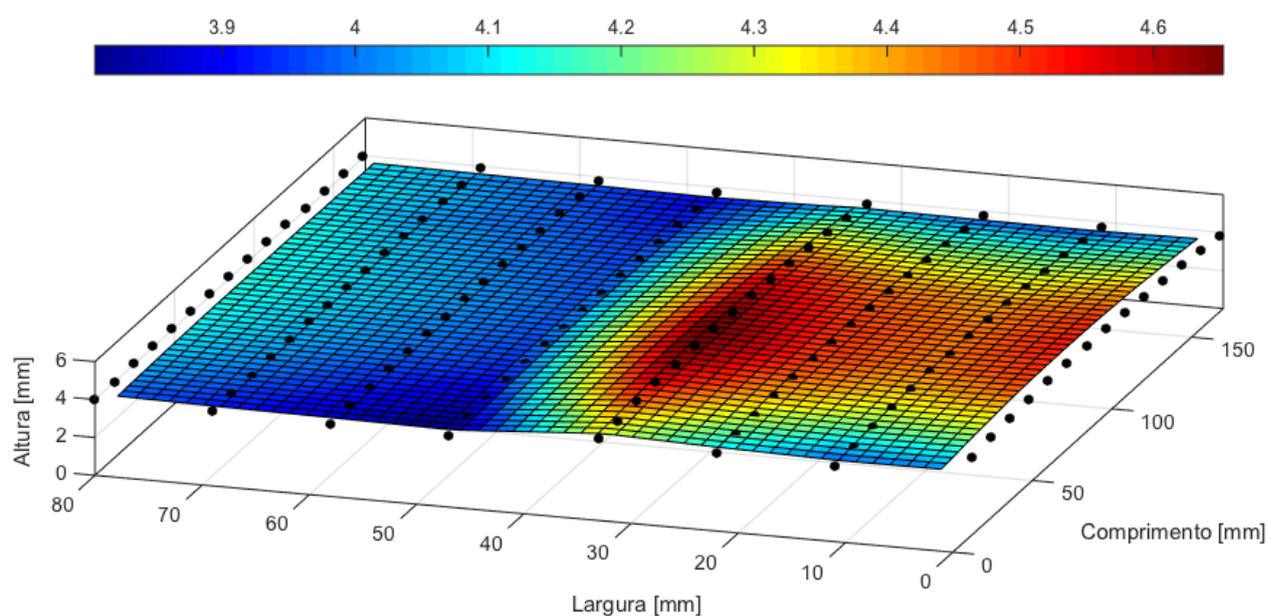
Tabela 4.10 – Ângulos obtidos do corte transversal

	Ângulos	
Corte A	3,50°	3,71°
Corte B	3,60°	3,71°
Corte C	3,68°	3,73°
Corte D	3,63°	3,58°
Corte E	3,57°	3,40°
<b>Média</b>	<b>3,61°</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,10°</b>	

#### 4.5.3. Medição 304L - Passe de Raiz + 1 Passe de enchimento – Com Restrição

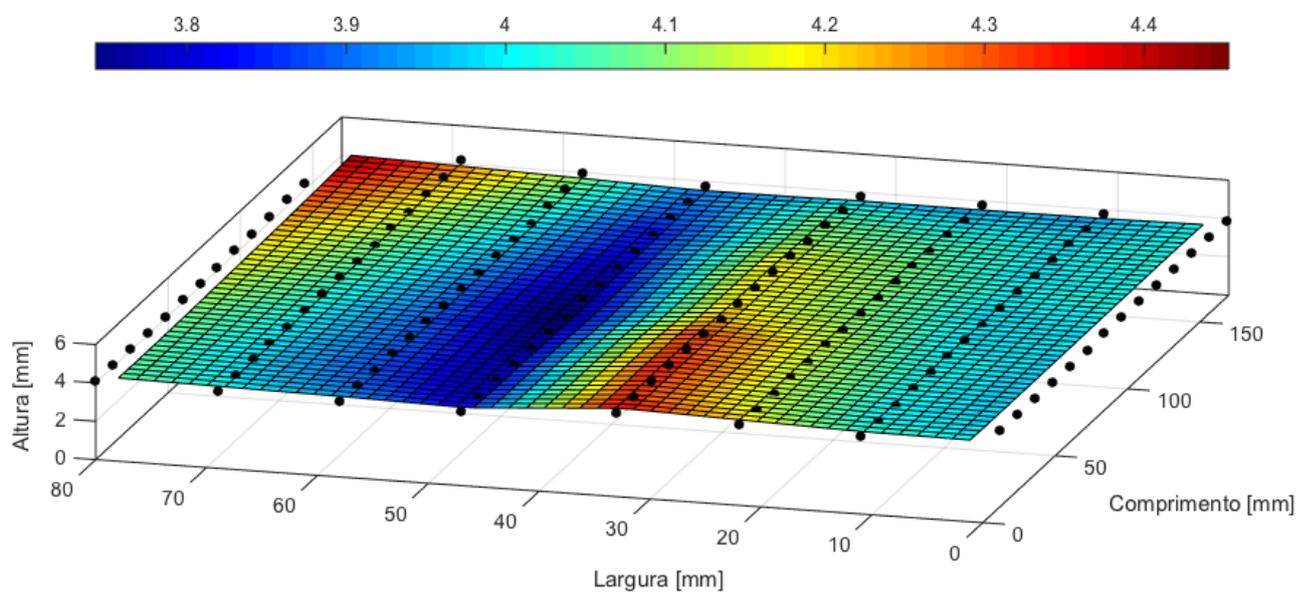
As Fig.s 4.20 apresentam as medições das distorções antes da realização dos procedimentos de soldagem. A Fig. 4.21 apresenta as medições geradas após a soldagem na condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento. Já a Fig. 4.22 apresenta a medição real com a subtração entre a medição após a soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem.

Figura 4.20 – Medição inicial das placas de teste sem soldagem [mm]



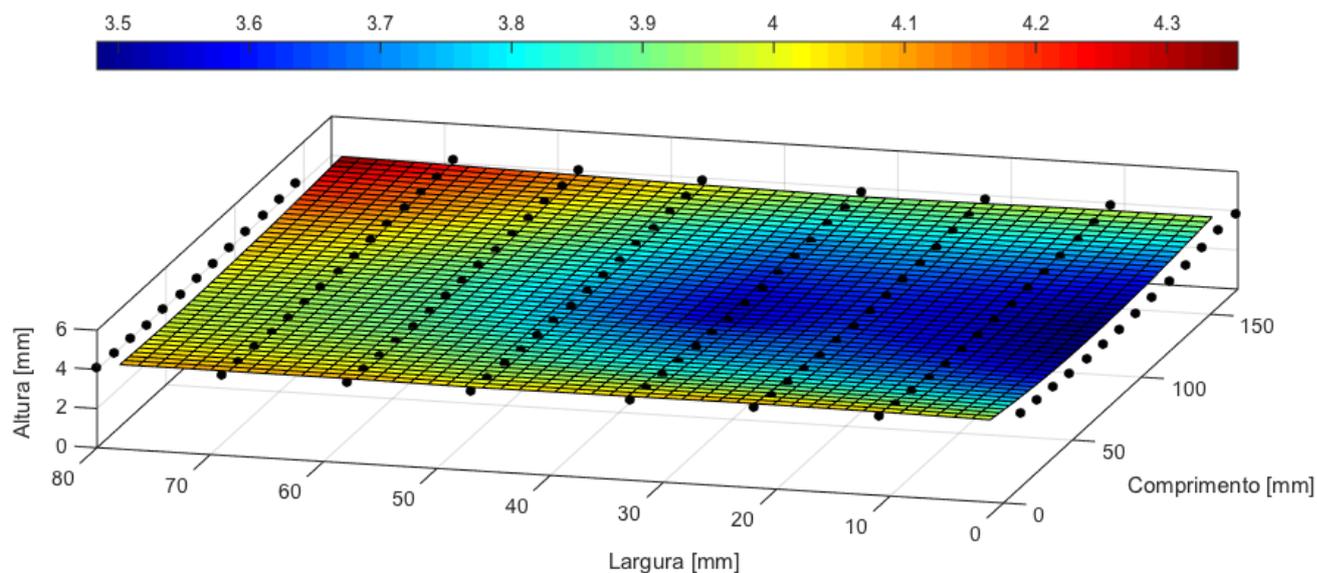
Fonte: Próprio autor

Figura 4.21 – Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 1  
passe de enchimento (com restrição) [mm]



Fonte: Próprio autor

Figura 4.22 – Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição  
inicial da chapa sem soldagem) [mm]

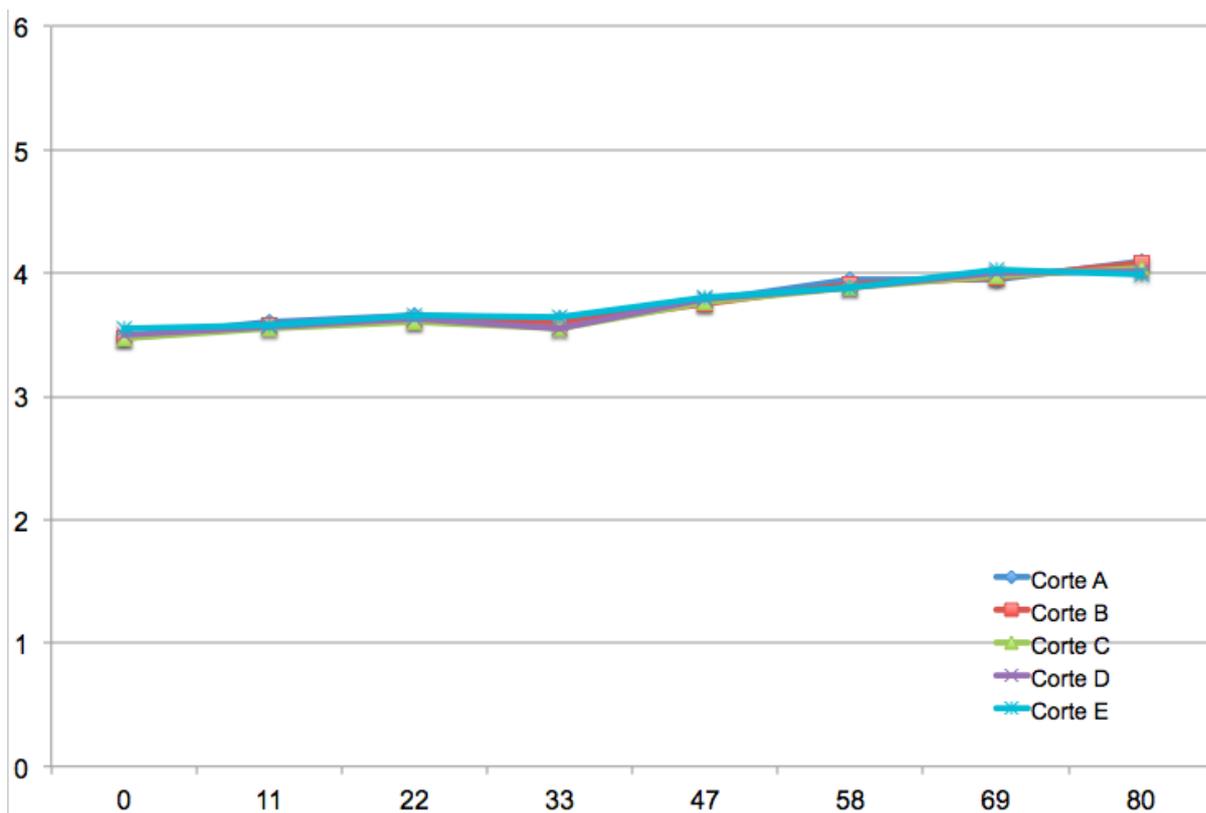


Fonte: Próprio autor

Nota-se que na Fig. 4.22 a chapa sofre flexão na parte central da soldagem. Esta deformação não foi igual para os dois lados, isto pode ter ocorrido devido a uma restrição não tão eficiente.

Na Fig. 4.23 é mostrado os cortes na seção transversal da medição real para identificação do ângulo da distorção angular para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento com restrição.

Figura 4.23 – Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento do 304L com restrição [mm]



Fonte: Próprio autor

Os valores medidos dos cortes são mostrados na Tab. 4.11.

Tabela 4.11 – Valores medidos dos cortes transversais a peça [mm]

Corte A		Corte B		Corte C		Corte D		Corte E	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
0	3.487	0	3.474	0	3.472	0	3.500	0	3.545
11	3.608	11	3.575	11	3.555	11	3.562	11	3.576
22	3.658	22	3.623	22	3.609	22	3.625	22	3.658
33	3.634	33	3.591	33	3.554	33	3.555	33	3.647
47	3.773	47	3.746	47	3.761	47	3.794	47	3.810
58	3.946	58	3.912	58	3.887	58	3.885	58	3.886
69	3.948	69	3.956	69	3.976	69	3.997	69	4.028
80	4.101	80	4.078	80	4.040	80	4.016	80	3.988

Com os valores da Fig. 4.23 obteve-se o ângulo de  $0,32^\circ \pm 0,18^\circ$  para a distorção angular. Utilizando a Eq. 3. Este valor é a média das 10 retas obtidas pelos 5 cortes transversais mostrados na Tab. 4.12.

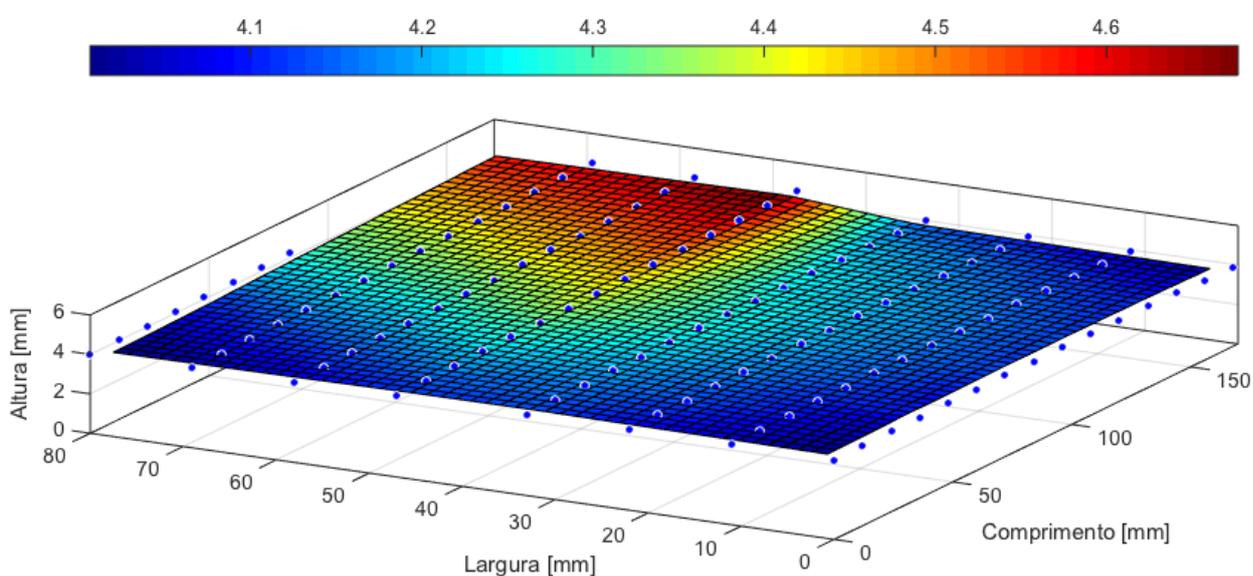
Tabela 4.12 – Ângulos obtidos do corte transversal

	Ângulos	
Corte A	0,26°	0,57°
Corte B	0,20°	0,57°
Corte C	0,14°	0,48°
Corte D	0,10°	0,38°
Corte E	0,18°	0,31°
<b>Média</b>	<b>0,32°</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,18°</b>	

#### 4.5.4. Medição 304L - Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento – Com Restrição

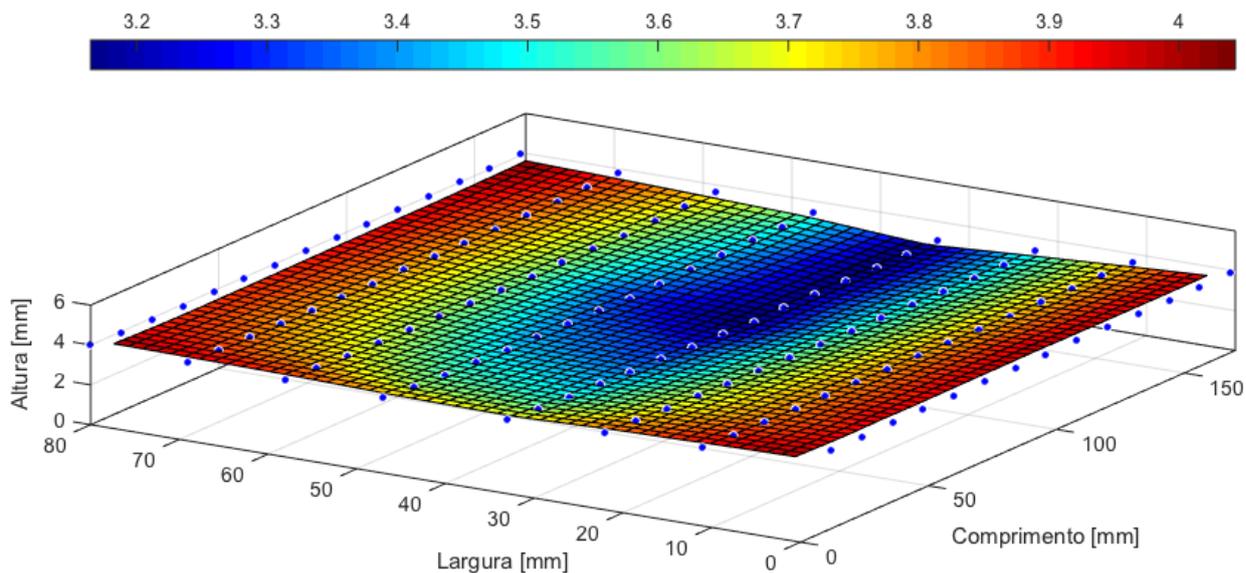
As Fig.s 4.24 apresentam as medições das distorções antes da realização dos procedimentos de soldagem. A Fig. 4.25 apresenta as medições geradas após a soldagem na condição de 1 passe de raiz + 2 passe de enchimento. Já a Fig. 4.26 apresenta a medição real com a subtração entre a medição após a soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem.

Figura 4.24 – Medição inicial das placas de teste sem soldagem [mm]



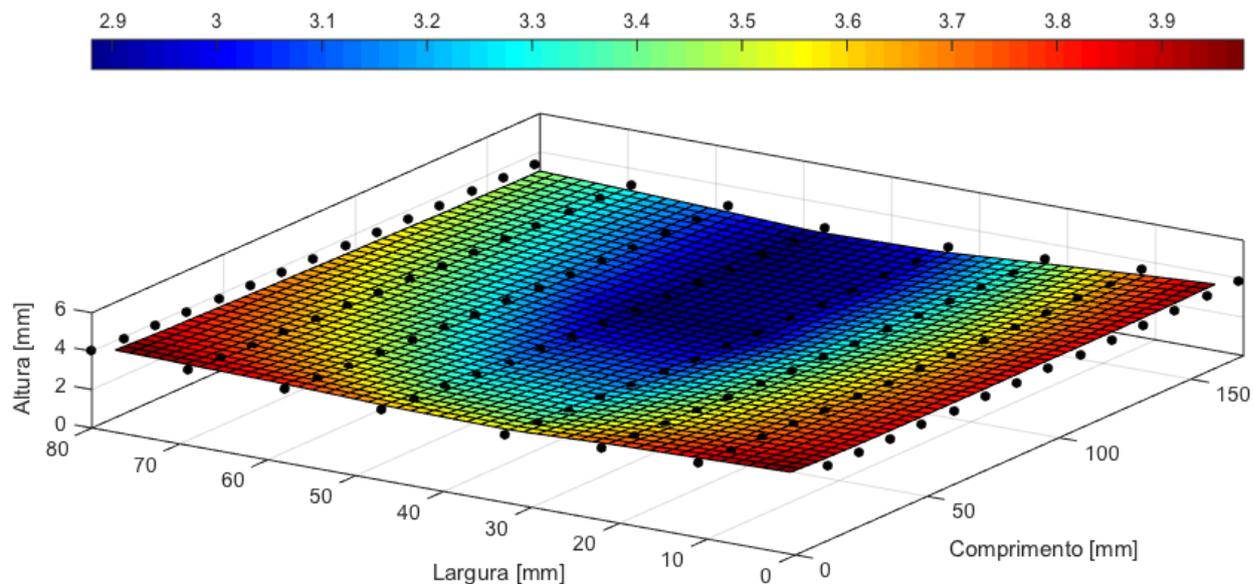
Fonte: Próprio autor

Figura 4.25 – Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 2 passes de enchimento (com restrição) [mm]



Fonte: Próprio autor

Figura 4.26 – Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) [mm]

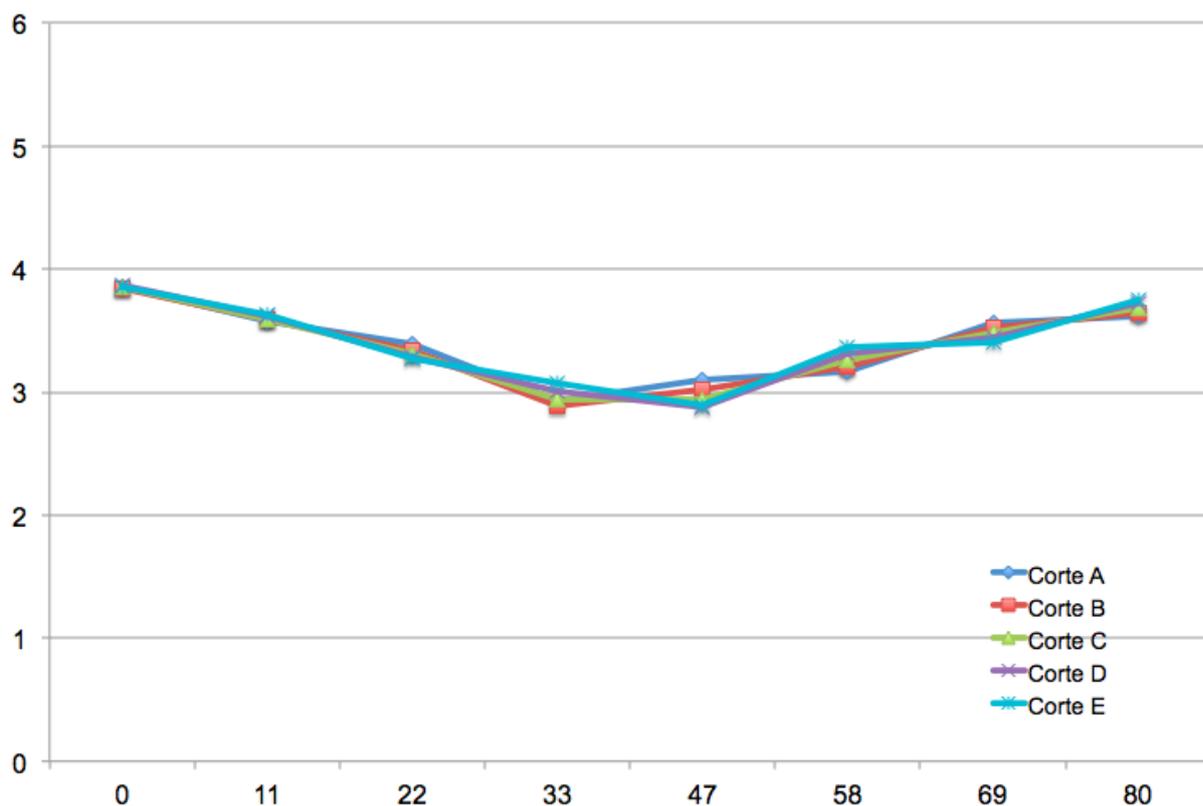


Fonte: Próprio autor

Nota-se que na Fig. 4.26 a chapa sofre flexão na parte central da soldagem. Esta deformação diminui ao longo da linha de soldagem.

Na Fig. 4.27 é mostrado os cortes na seção transversal da medição real para identificação do ângulo da distorção angular para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento com restrição.

Figura 4.27 – Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento do 304L com restrição [mm]



Fonte: Próprio autor

Os valores medidos dos cortes são mostrados na Tab. 4.13.

Tabela 4.13 – Valores medidos dos cortes transversais a peça [mm]

Corte A		Corte B		Corte C		Corte D		Corte E	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
0	3.851	0	3.849	0	3.857	0	3.870	0	3.859
11	3.580	11	3.590	11	3.597	11	3.612	11	3.629
22	3.389	22	3.344	22	3.311	22	3.288	22	3.279
33	2.928	33	2.883	33	2.936	33	3.013	33	3.078
47	3.102	47	3.025	47	2.947	47	2.878	47	2.894
58	3.172	58	3.209	58	3.262	58	3.312	58	3.368
69	3.569	69	3.524	69	3.482	69	3.442	69	3.411
80	3.621	80	3.642	80	3.681	80	3.718	80	3.751

Com os valores da Fig. 4.27 obteve-se o ângulo de  $0,32^\circ \pm 0,18^\circ$  para a distorção angular. Utilizando a Eq. 3. Este valor é a média das 10 retas obtidas pelos 5 cortes transversais mostrados na Tab. 4.14.

Tabela 4.14 – Ângulos obtidos do corte transversal

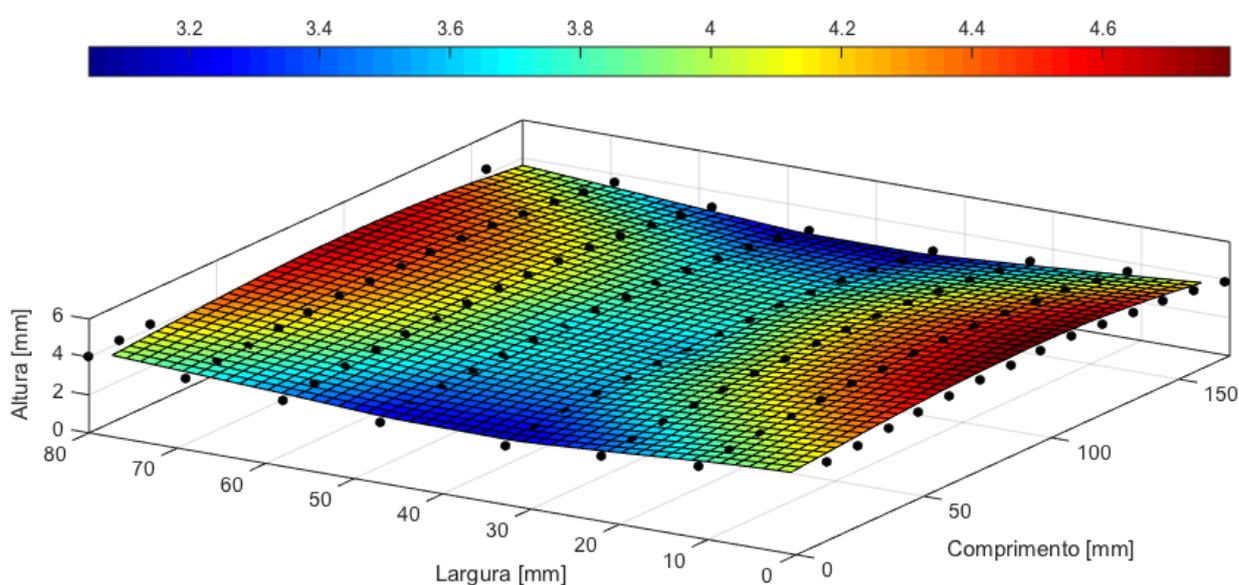
	Ângulos	
Corte A	1,60°	0,90°
Corte B	1,68°	1,07°
Corte C	1,60°	1,27°
Corte D	1,49°	1,46°
Corte E	1,36°	1,49°
<b>Média</b>	<b>1,39°</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,25°</b>	

#### 4.5.5. Comparação das Deformações com Passe de Raiz + 1 Passe de enchimento e Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento, Com e Sem Restrições

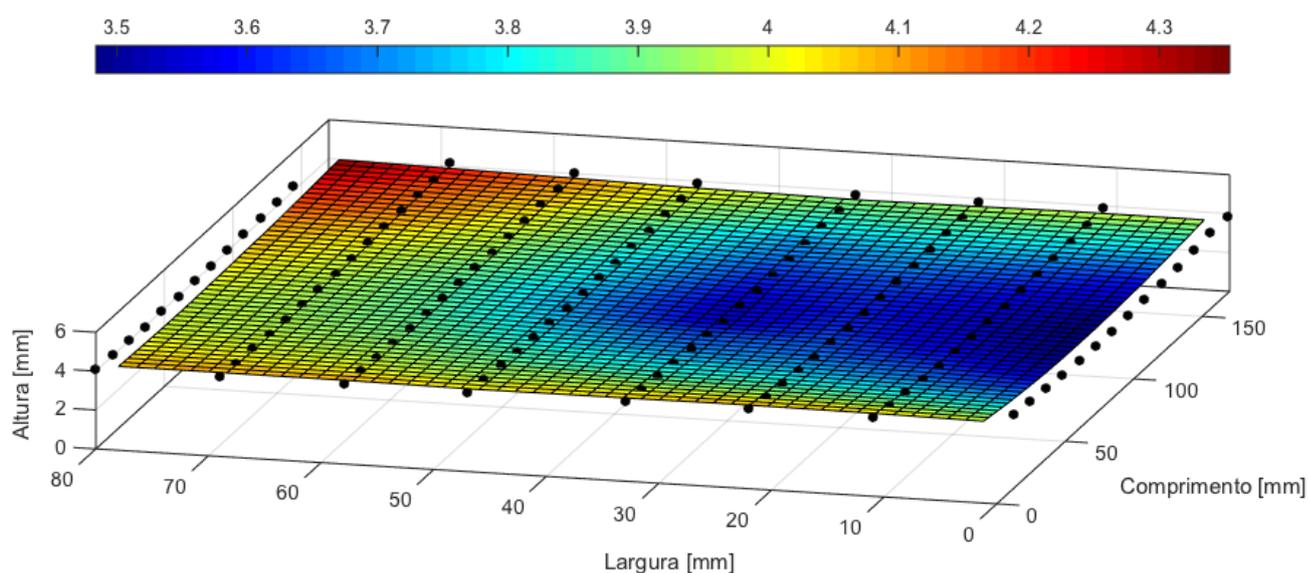
A Fig. 4.28 coloca lado a lado as Fig.s 4.14, 4.18, 4.22 e 4.26 onde se pode verificar as medições realizadas com as 4 condições de soldagem para o aço inoxidável 304L.

Figura 4.28 – Comparativo da medição real com e sem restrição do aço 304L [mm]

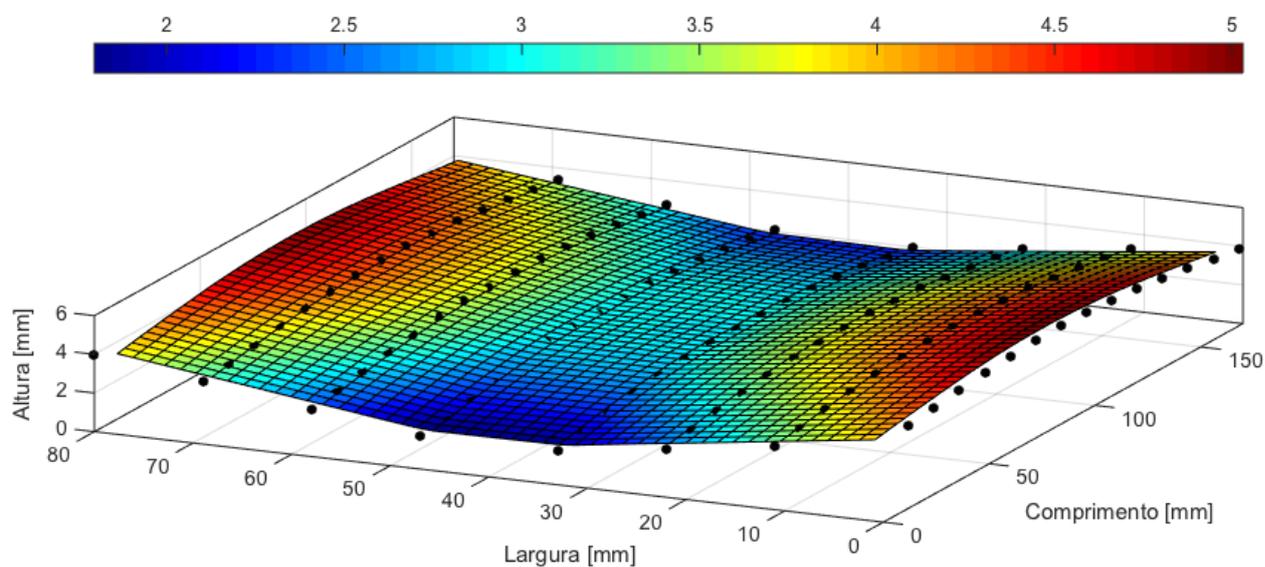
a) Passe Raiz + 1 passe de enchimento - Sem restrição



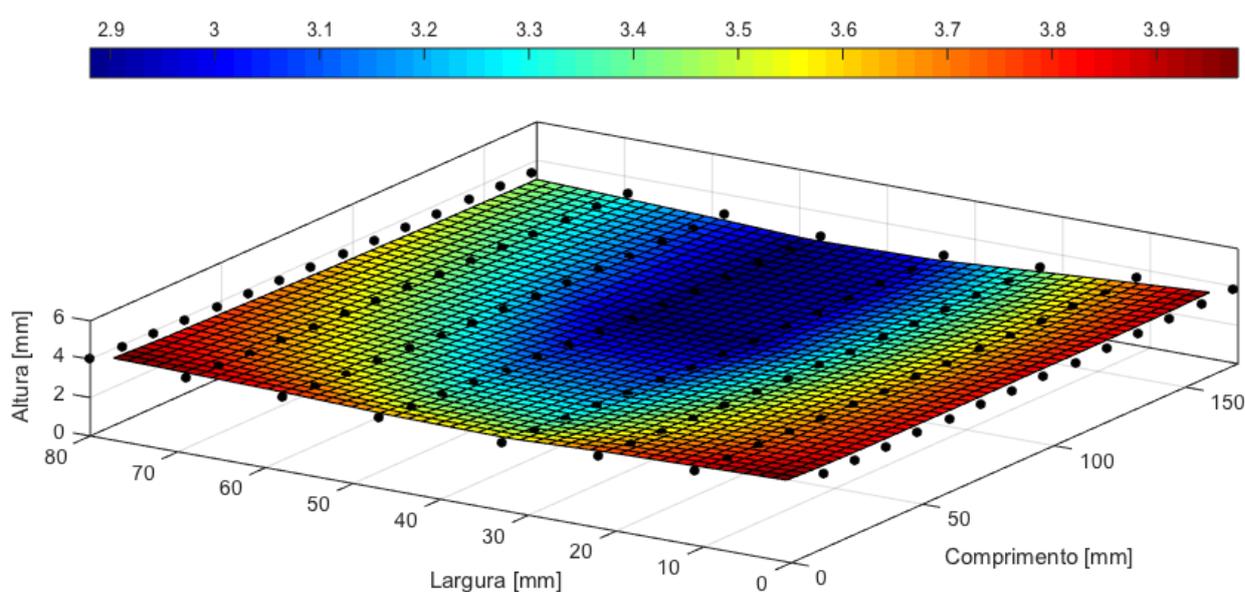
b) Passe Raiz + 1 passe de enchimento - Com restrição



c) Passe Raiz + 2 passes de enchimento - Sem restrição



d) Passe Raiz + 2 passes de enchimento - Com restrição



A Fig. 4.28 apresenta um comparativo dos resultados obtidos manipulando os dados da máquina de medir coordenadas. É possível verificar que para a condição sem restrição foram obtidos maiores deformações conforme a escala das figuras. Dentre as condições de soldagem o parâmetro onde realizou-se passe de raiz + 2 passes de enchimento apresentaram as maiores distorções angulares.

Fazendo-se uma comparação do nível de distorções entre chapas com e sem restrições, pode-se observar que as restrições diminuíram muito o nível das

distorções tanto angular quanto longitudinal (flexão ou arqueamento) para a mesma energia de soldagem.

A Tab. 4.15 apresenta os valores dos ângulos de distorções para o aço inoxidável 304L nas condições abordadas no presente estudo.

Tabela 4.15 – Comparação do ângulo de deformação para o aço inoxidável 304L para as condições abordadas

	Sem Restrição	Com Restrição
Passe de raiz + 1 passe de enchimento	1,76°	0,32°
Passe de raiz + 2 passes de enchimento	3,61°	1,39°

Fonte: Próprio autor

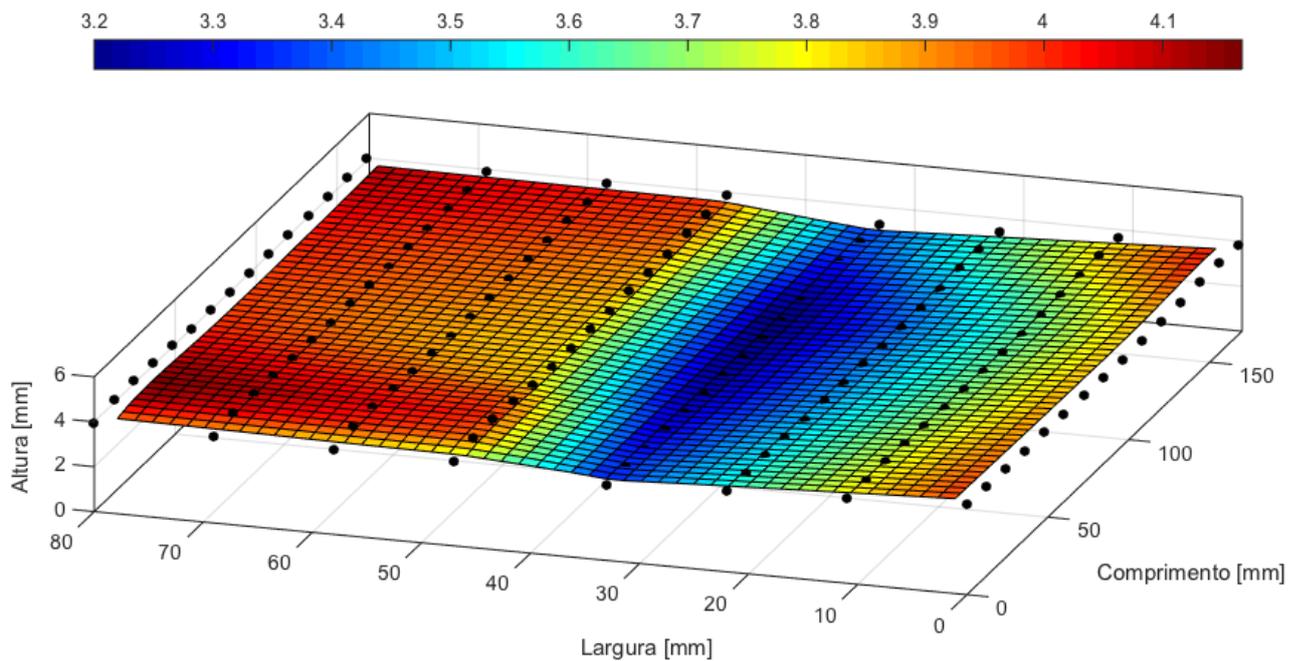
Observando os valores de distorção obtidos para o aço inoxidável 304L é possível verificar que os níveis de distorções foram maiores para os processos de soldagem onde não houve restrição. A condição de passe de raiz + 1 passe de enchimento apresentaram as menores distorções comparando-se com a condição de passe de raiz + 2 passes de enchimento.

#### 4.6. Medição Placas de 316L na Máquina de Medir Coordenadas Após a Soldagem

##### 4.6.1. Medição 316L - Passe de Raiz + 1 Passe de enchimento – Sem Restrição

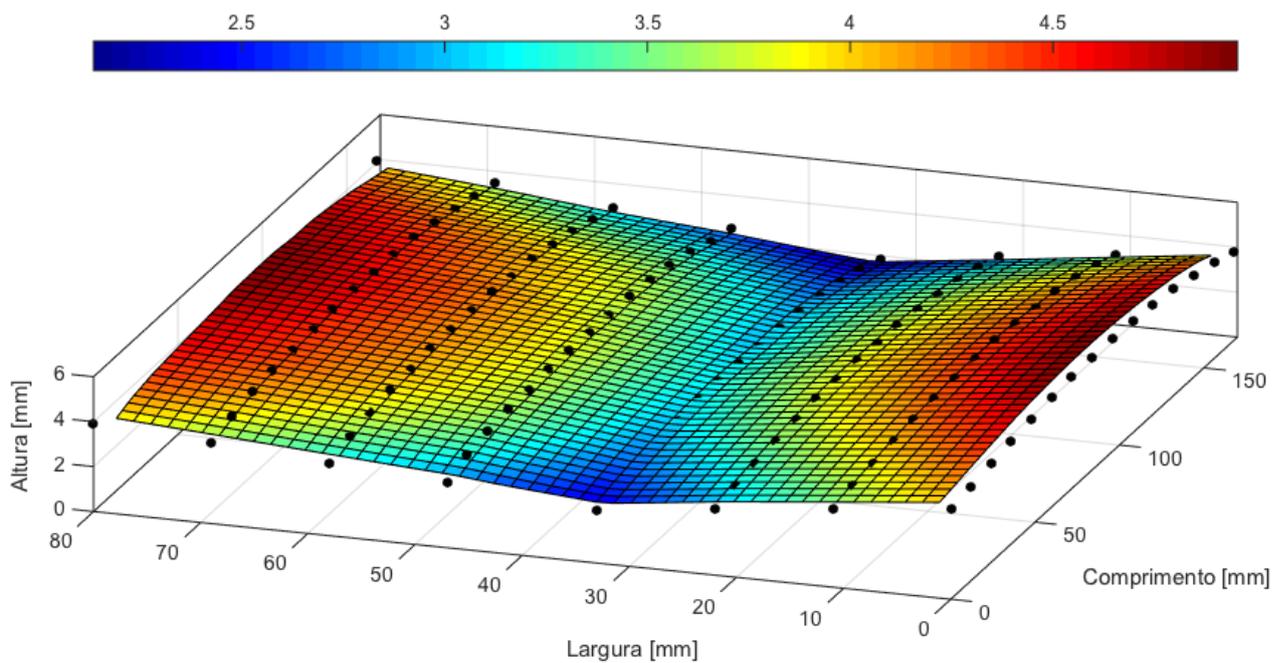
Após a realização das soldagens conforme procedimentos já mencionados, foram realizadas medições utilizando a máquina de medir coordenadas nos pontos pré-estabelecidos. A Fig. 4.29 apresenta as medições das distorções antes da realização dos procedimentos de soldagem. A Fig. 4.30 apresenta as medições geradas após a soldagem na condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento. Já a Fig. 4.31 apresenta a medição real com a subtração entre a medição após a soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem.

Figura 4.29 – Medição inicial das placas de teste sem soldagem [mm]



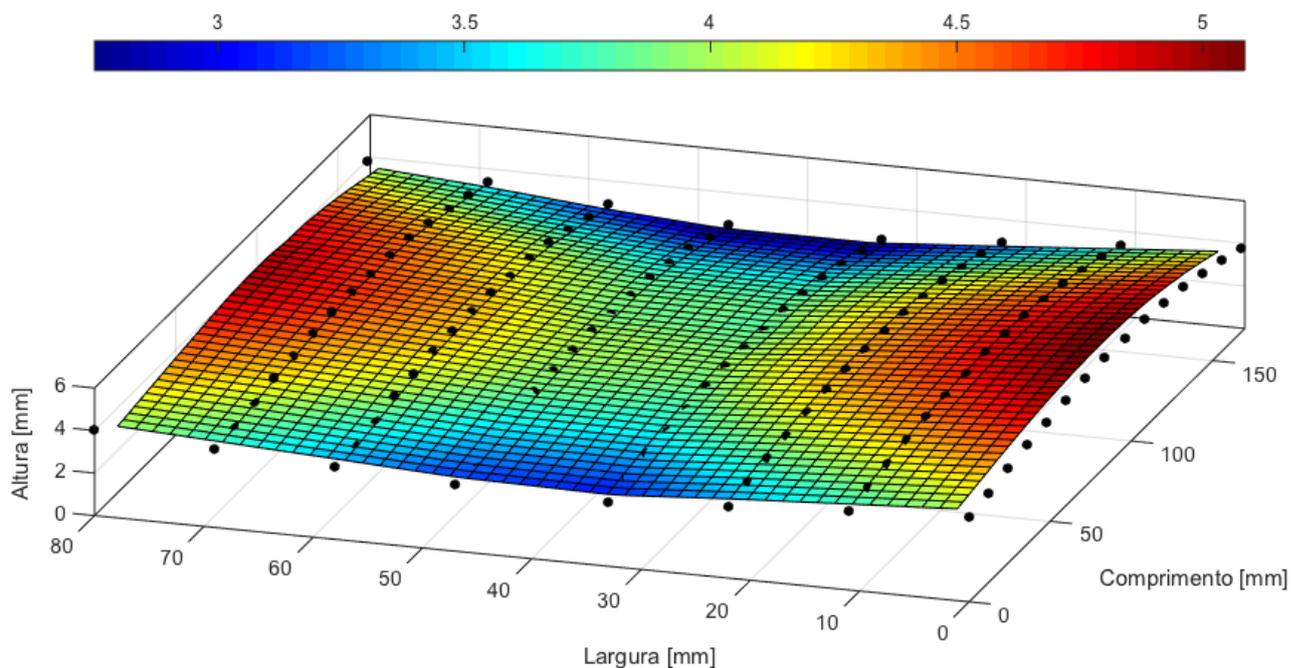
Fonte: Próprio autor

Figura 4.30 – Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 1 passe de enchimento (sem restrição) [mm]



Fonte: Próprio autor

Figura 4.31 – Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) [mm]

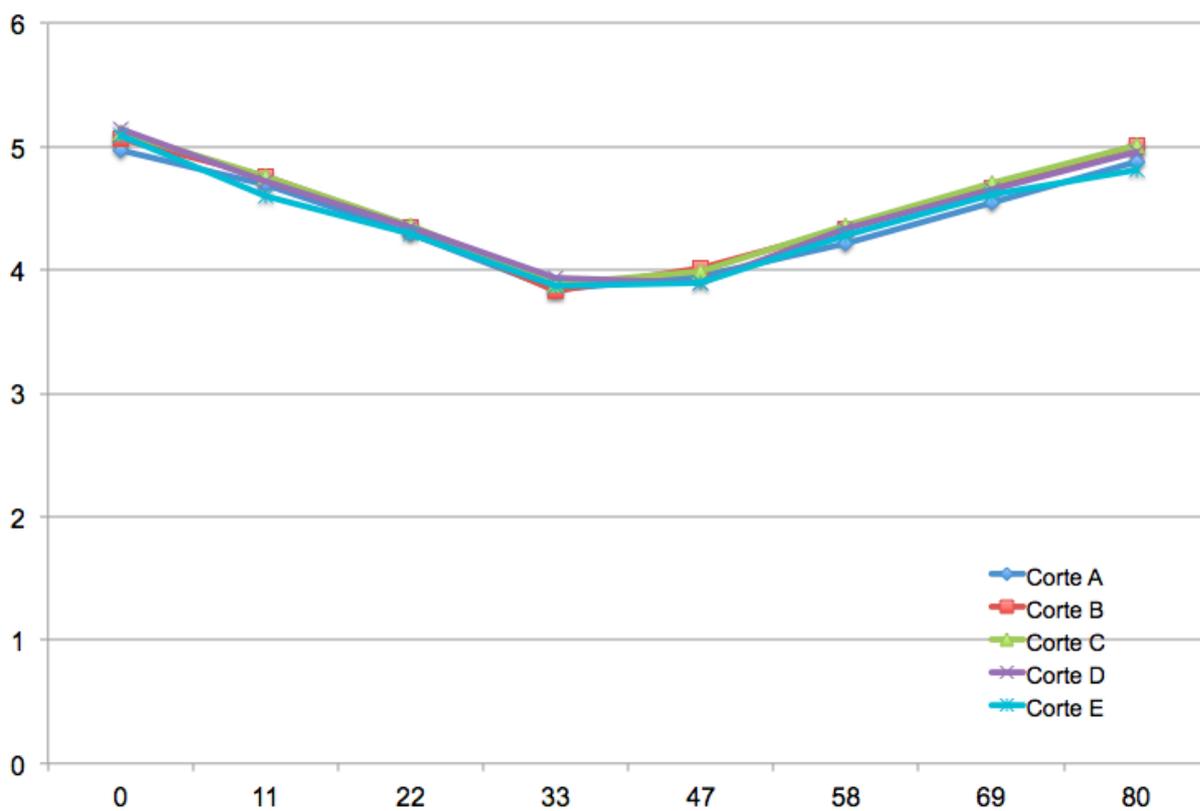


Fonte: Próprio autor

Nota-se que na Fig. 4.31 a chapa sofre flexão para o lado oposto da soldagem. Esta deformação diminui ao longo linha paralela a soldagem.

Na Fig. 4.32 é mostrado os cortes na seção transversal da medição real para identificação do ângulo da distorção angular para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento sem restrição.

Figura 4.32 – Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento do 316L sem restrição [mm]



Fonte: Próprio autor

Os valores medidos dos cortes são mostrados na Tab. 4.16.

Tabela 4.16 – Valores medidos dos cortes transversais a peça [mm]

Corte A		Corte B		Corte C		Corte D		Corte E	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
0	4.968	0	5.067	0	5.121	0	5.143	0	5.092
11	4.693	11	4.754	11	4.764	11	4.716	11	4.601
22	4.288	22	4.347	22	4.364	22	4.347	22	4.290
33	3.839	33	3.823	33	3.887	33	3.939	33	3.872
47	3.955	47	4.013	47	3.987	47	3.893	47	3.891
58	4.215	58	4.337	58	4.363	58	4.330	58	4.287
69	4.550	69	4.672	69	4.702	69	4.655	69	4.614
80	4.874	80	5.016	80	5.012	80	4.960	80	4.817

Com os valores da Fig. 4.27 obteve-se o ângulo de  $1,90^\circ \pm 0,22^\circ$  para a distorção angular. Utilizando a Eq. 3. Este valor é a média das 10 retas obtidas pelos 5 cortes transversais mostrados na Tab. 4.17.

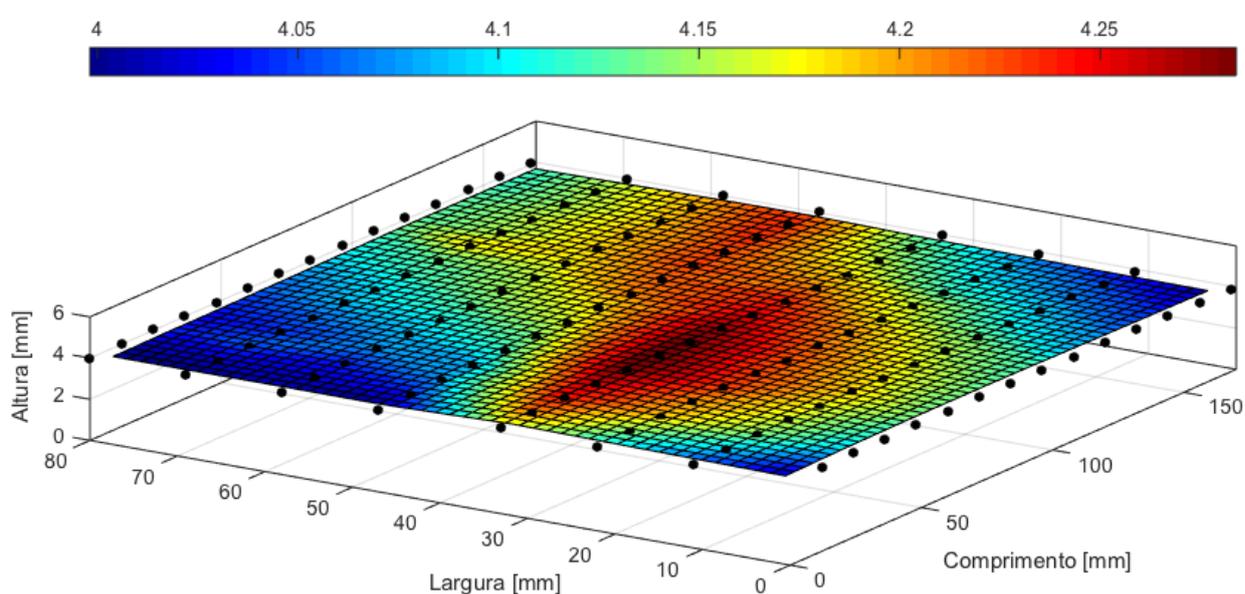
Tabela 4.17 – Ângulos obtidos do corte transversal

	Ângulos	
Corte A	1,96°	1,59°
Corte B	2,16°	1,74°
Corte C	2,14°	1,78°
Corte D	2,09°	1,85°
Corte E	2,12°	1,61°
<b>Média</b>	<b>1,90°</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,22°</b>	

#### 4.6.2. Medição 316L - Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento – Sem Restrição

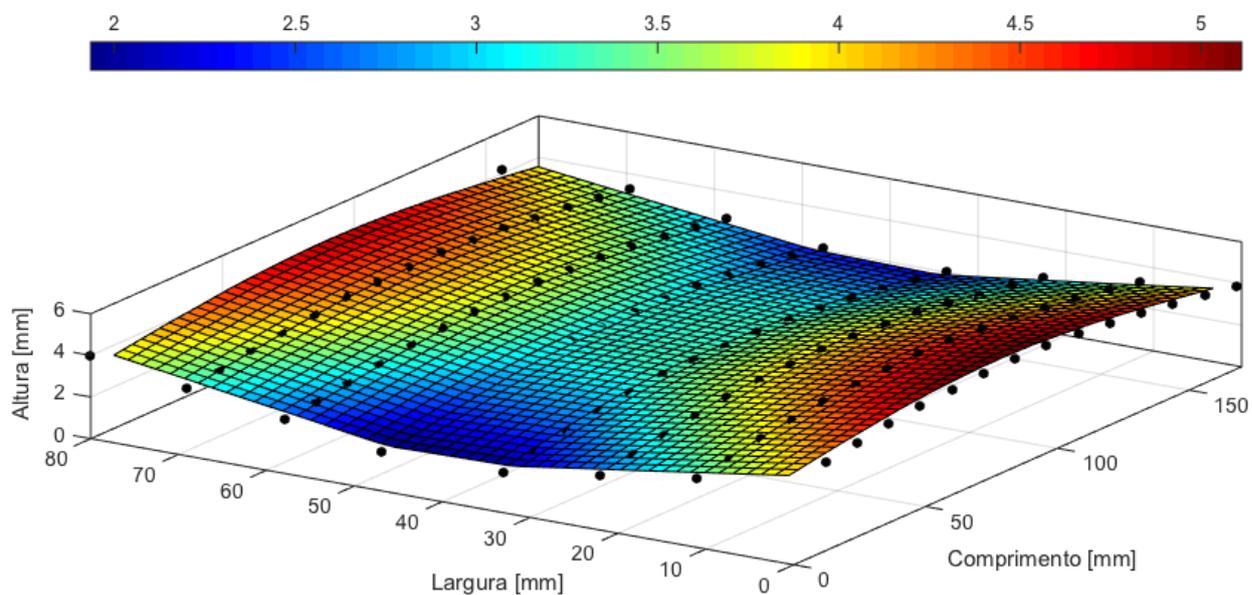
A Fig. 4.33 apresenta as medições das distorções antes da realização dos procedimentos de soldagem. A Fig. 4.34 apresenta as medições geradas após a soldagem na condição de 1 passe de raiz + 2 passe de enchimento. Já a Fig. 4.35 apresenta a medição real com a subtração entre a medição após a soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem.

Figura 4.33 – Medição inicial das placas de teste sem soldagem [mm]



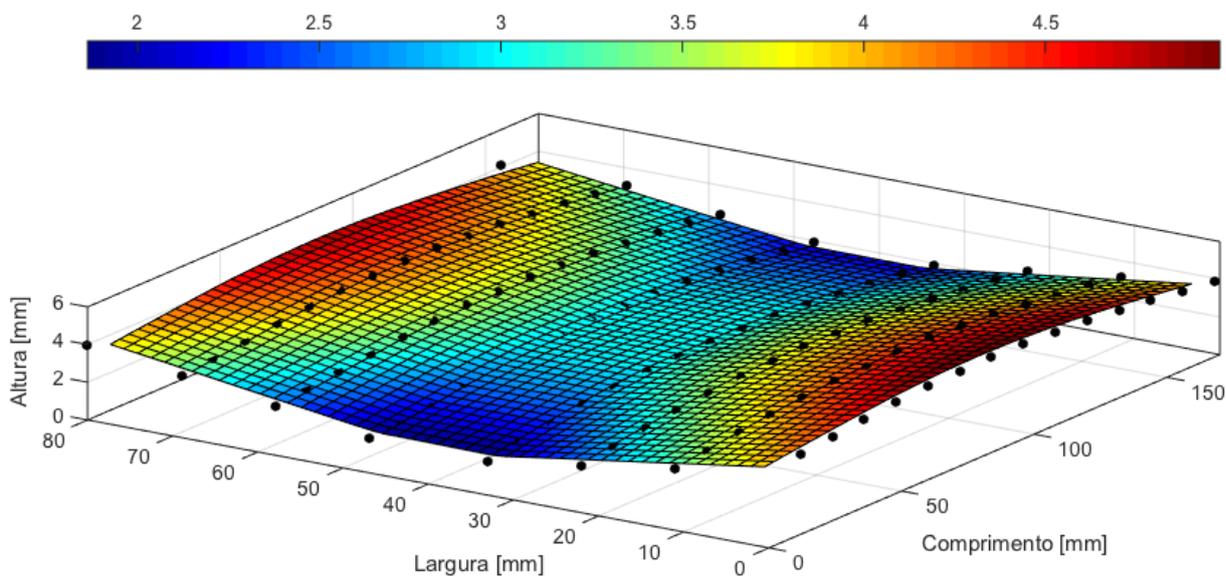
Fonte: Próprio autor

Figura 4.34 – Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 2 passes de enchimento (sem restrição) [mm]



Fonte: Próprio autor

Figura 4.35 – Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem) [mm]

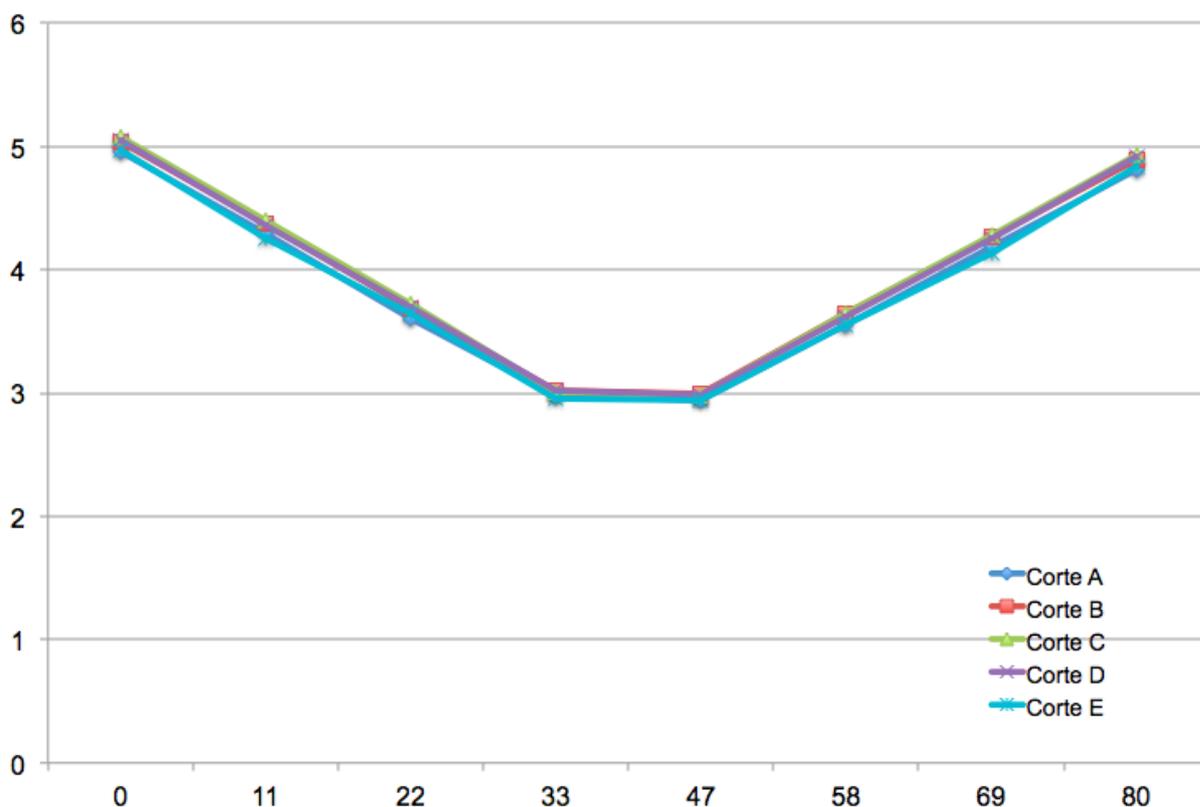


Fonte: Próprio autor

Nota-se que na Fig. 4.35 a chapa sofre flexão em todo o sentido da soldagem. Esta deformação diminui ao longo linha paralela a soldagem.

Na Fig. 4.36 é mostrado os cortes na seção transversal da medição real para identificação do ângulo da distorção angular para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento sem restrição.

Figura 4.36 – Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento do 316L sem restrição [mm]



Fonte: Próprio autor

Os valores medidos dos cortes são mostrados na Tab. 4.18.

Tabela 4.18 – Valores medidos dos cortes transversais a peça [mm]

Corte A		Corte B		Corte C		Corte D		Corte E	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
0	4.952	0	5.041	0	5.078	0	5.054	0	4.967
11	4.296	11	4.378	11	4.397	11	4.355	11	4.256
22	3.599	22	3.688	22	3.722	22	3.704	22	3.646
33	2.979	33	3.024	33	3.001	33	3.019	33	2.954
47	2.941	47	2.995	47	2.980	47	2.986	47	2.940
58	3.556	58	3.641	58	3.645	58	3.622	58	3.557
69	4.185	69	4.270	69	4.287	69	4.257	69	4.141
80	4.806	80	4.898	80	4.935	80	4.914	80	4.840

Com os valores da Fig. 4.36 obteve-se o ângulo de  $3,41^\circ \pm 0,12^\circ$  para a distorção angular. Utilizando a Eq. 3. Este valor é a média das 10 retas obtidas pelos 5 cortes transversais mostrados na Tab. 4.19.

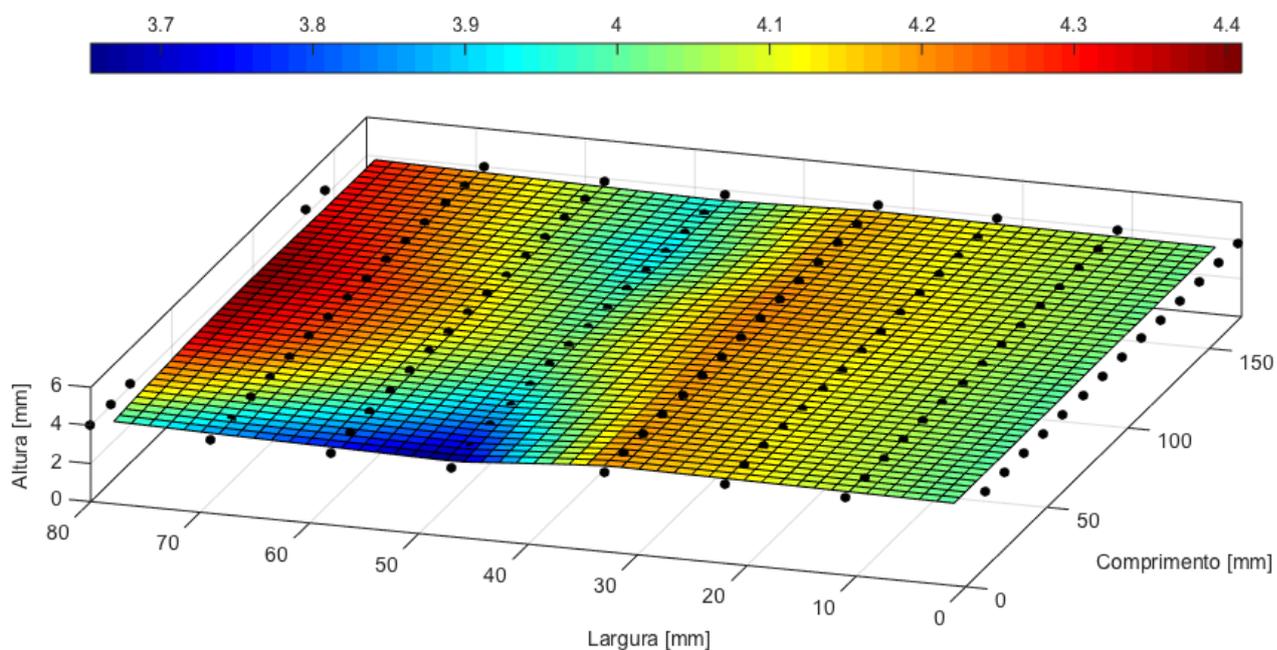
Tabela 4.19 – Ângulos obtidos do corte transversal

	Ângulos	
Corte A	3,42°	3,23°
Corte B	3,50°	3,30°
Corte C	3,60°	3,39°
Corte D	3,53°	3,34°
Corte E	3,49°	3,29°
<b>Média</b>	<b>3,41°</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,12°</b>	

#### 4.6.3. Medição 316L - Passe De Raiz + 1 Passe de enchimento – Com Restrição

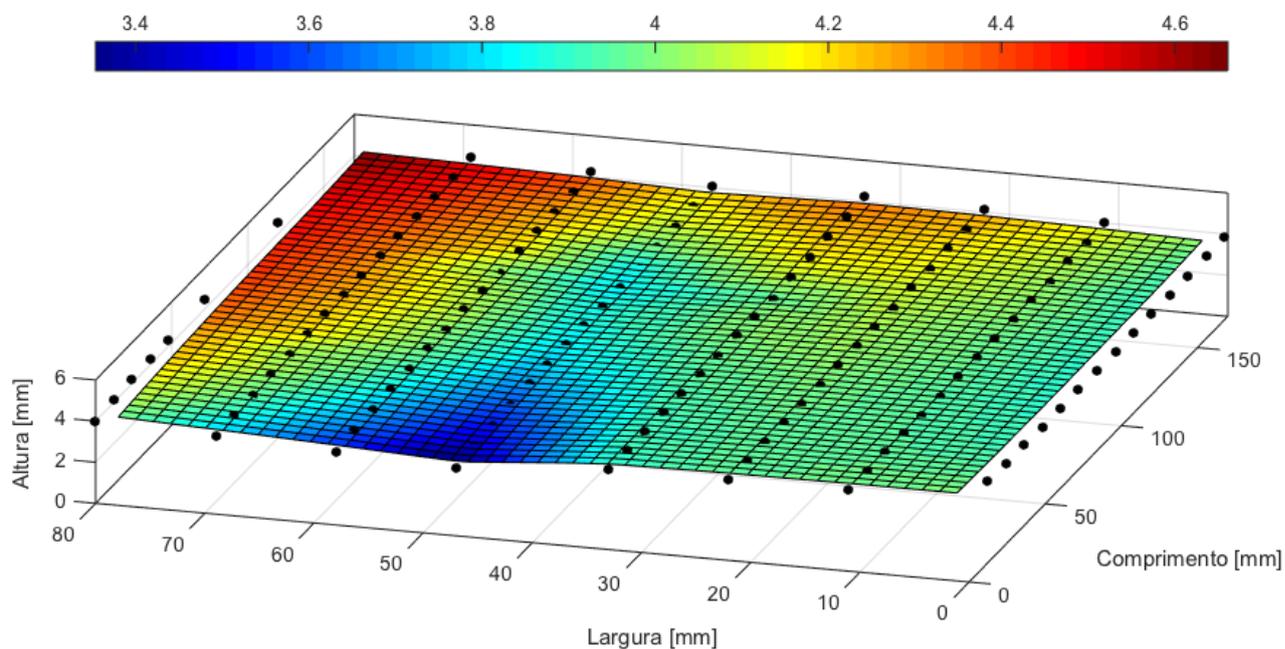
A Fig. 4.37 apresenta as medições das distorções antes da realização dos procedimentos de soldagem. A Fig. 4.38 apresenta as medições geradas após a soldagem na condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento. Já a Fig. 4.39 apresenta a medição real com a subtração entre a medição após a soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem.

Figura 4.37 – Medição inicial das placas de teste sem soldagem [mm]



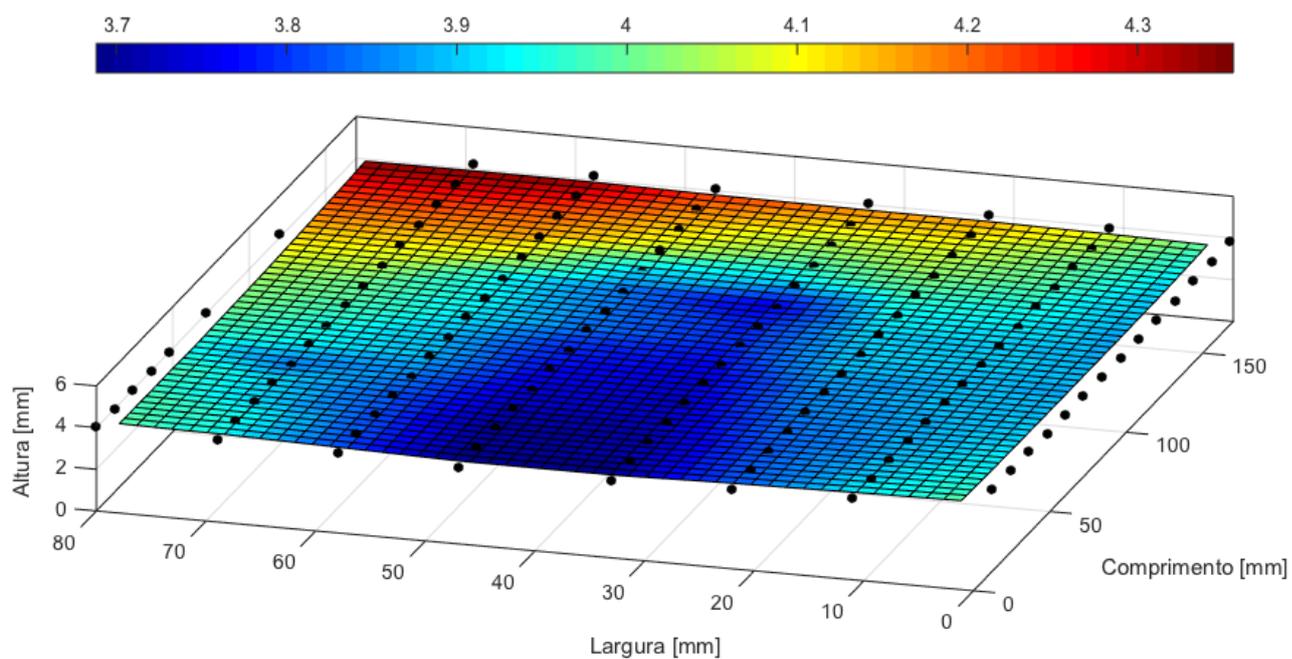
Fonte: Próprio autor

Figura 4.38 – Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 1  
passe de enchimento (com restrição) [mm]



Fonte: Próprio autor

Figura 4.39 – Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição  
inicial da chapa sem soldagem) [mm]

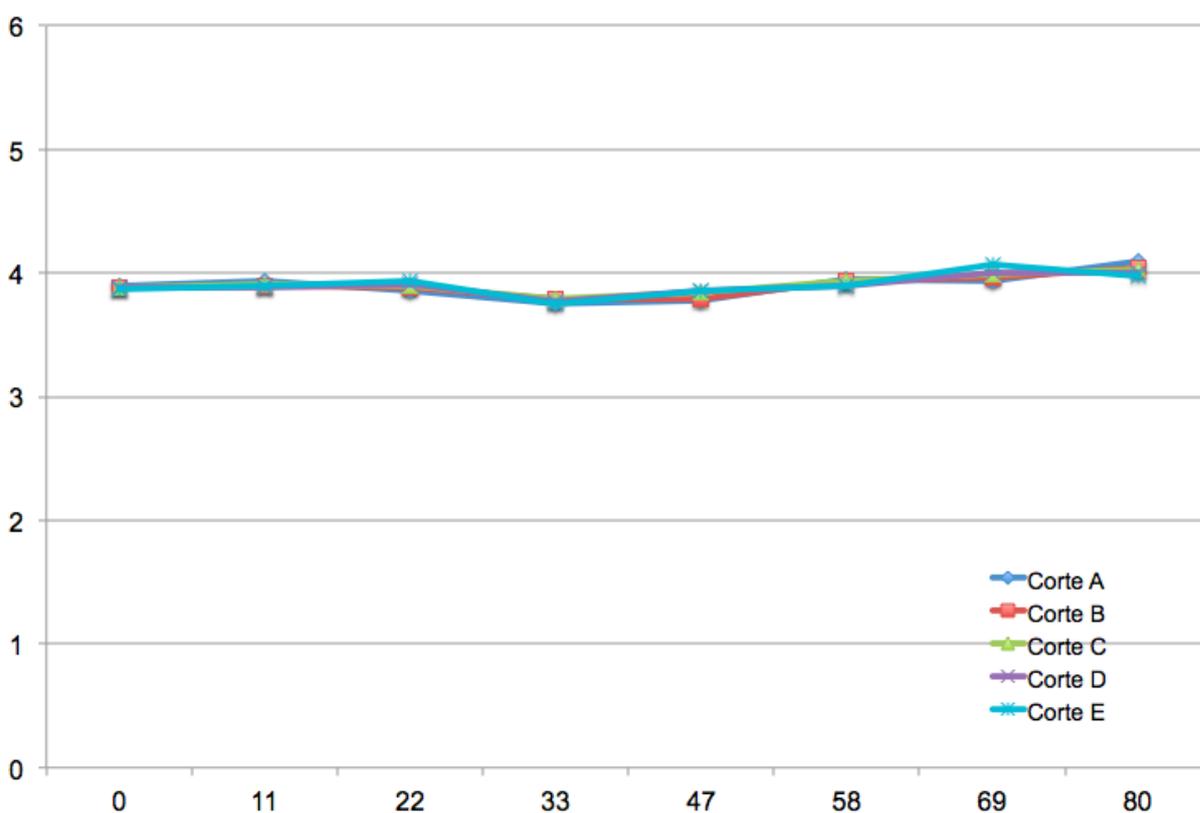


Fonte: Próprio autor

Nota-se que na Fig. 4.39 a chapa sofre flexão na parte central da soldagem. Estas deformações não foram iguais para os dois lados, isto pode ter ocorrido devido a uma tensão residual da placa.

Na Fig. 4.40 é mostrado os cortes na seção transversal da medição real para identificação do ângulo da distorção angular para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento com restrição.

Figura 4.40 – Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 1 passe de enchimento do 316L com restrição [mm]



Fonte: Próprio autor

Os valores medidos dos cortes são mostrados na Tab. 4.20.

Tabela 4.20 – Valores medidos dos cortes transversais a peça [mm]

Corte A		Corte B		Corte C		Corte D		Corte E	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
0	3.893	0	3.882	0	3.888	0	3.879	0	3.874
11	3.930	11	3.903	11	3.905	11	3.888	11	3.890
22	3.860	22	3.889	22	3.897	22	3.911	22	3.935
33	3.753	33	3.786	33	3.793	33	3.770	33	3.749
47	3.773	47	3.794	47	3.846	47	3.852	47	3.853
58	3.943	58	3.936	58	3.931	58	3.897	58	3.896
69	3.934	69	3.956	69	3.986	69	4.009	69	4.065
80	4.091	80	4.047	80	4.023	80	4.004	80	3.980

Com os valores da Fig. 4.40 obteve-se o ângulo de  $0,28^\circ \pm 0,13^\circ$  para a distorção angular. Utilizando a Eq. 3. Este valor é a média das 10 retas obtidas pelos 5 cortes transversais mostrados na Tab. 4.21.

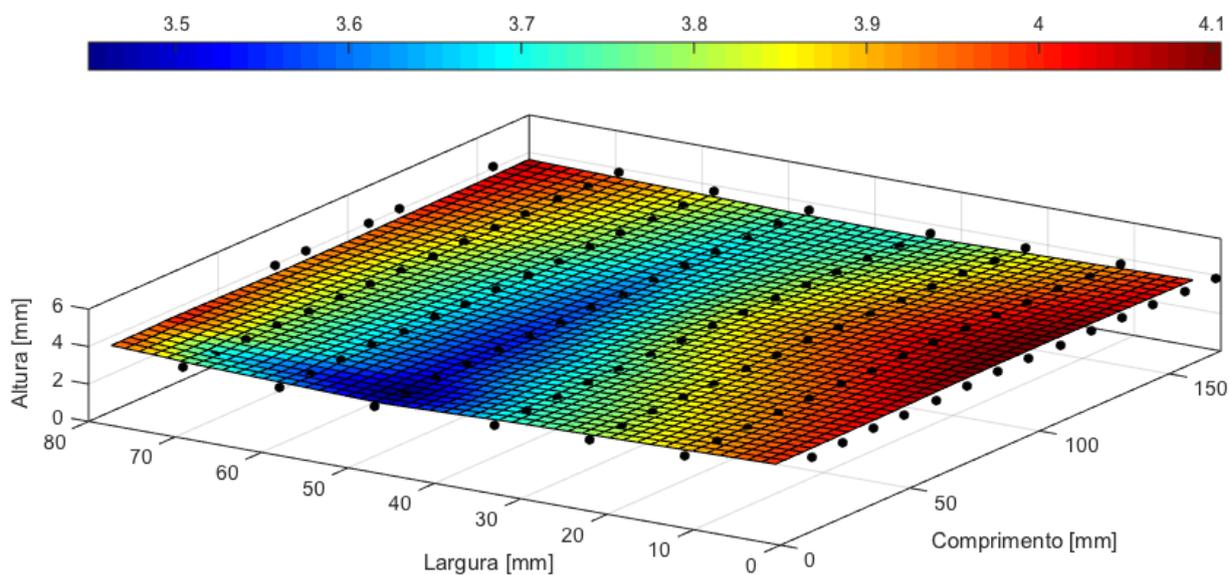
Tabela 4.21 – Ângulos obtidos do corte transversal

	Ângulos	
Corte A	0,24°	0,55°
Corte B	0,17°	0,44°
Corte C	0,17°	0,31°
Corte D	0,19°	0,26°
Corte E	0,22°	0,22°
<b>Média</b>	<b>0,28°</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,13°</b>	

#### 4.6.4. Medição 316L - Passe de Raiz + 2 Passes de enchimento – Com Restrição

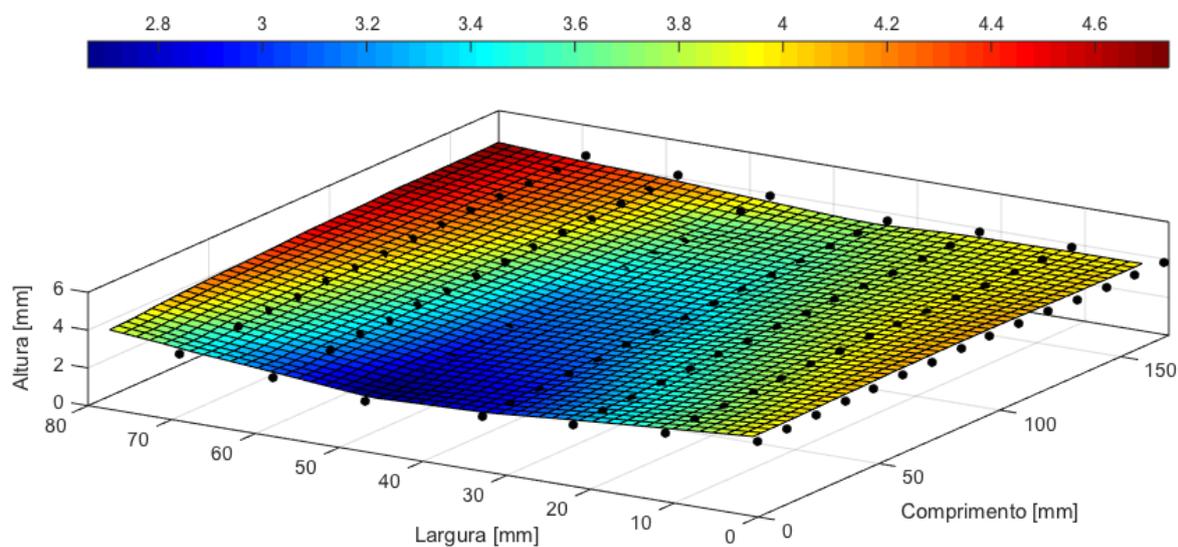
A Fig 4.41 apresenta as medições das distorções antes da realização dos procedimentos de soldagem. A Fig. 4.42 apresenta as medições geradas após a soldagem na condição de 1 passe de raiz + 2 passe de enchimento. Já a Fig. 4.43 apresenta a medição real com a subtração entre a medição após a soldagem e a medição inicial da chapa sem soldagem.

Figura 4.41 – Medição inicial das placas de teste sem soldagem [mm]



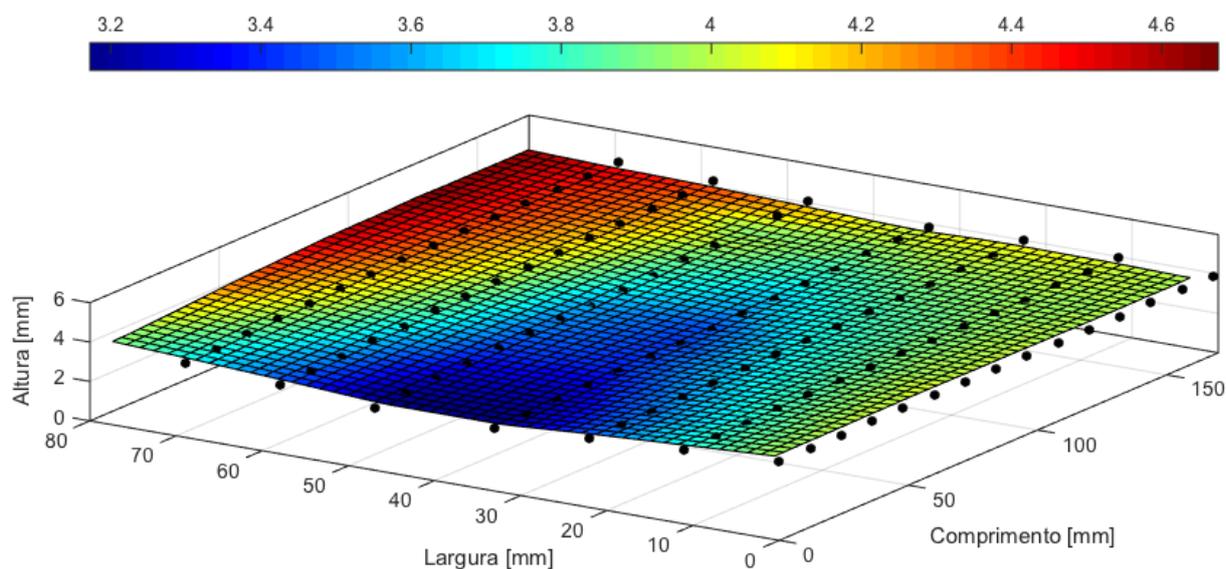
Fonte: Próprio autor

Figura 4.42 – Medição gerada após a soldagem na condição - Passe de raiz + 2  
passe de enchimento (com restrição) [mm]



Fonte: Próprio autor

Figura 4.43 – Medição real (subtração entre a medição após soldagem e a medição  
inicial da chapa sem soldagem) [mm]



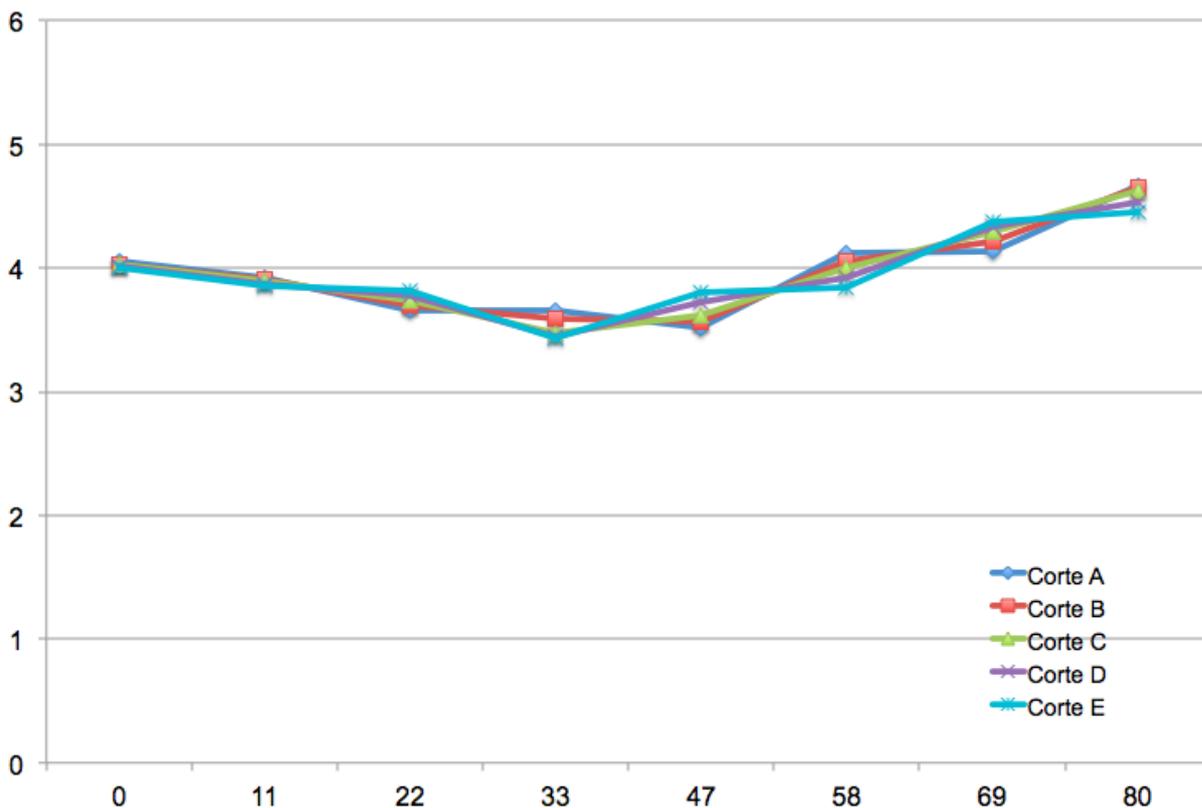
Fonte: Próprio autor

Nota-se que na Fig. 4.43 a chapa sofre flexão na parte central da soldagem. Esta deformação diminui ao longo da linha de soldagem.

Na Fig. 4.44 é mostrado os cortes na seção transversal da medição real para

identificação do ângulo da distorção angular para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento com restrição.

Figura 4.44 – Corte transversal da medição real para a condição de 1 passe de raiz + 2 passes de enchimento do 316L com restrição [mm]



Fonte: Próprio autor

Os valores medidos dos cortes são mostrados na Tab. 4.22.

Tabela 4.22 – Valores medidos dos cortes transversais a peça [mm]

Corte A		Corte B		Corte C		Corte D		Corte E	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
0	4.052	0	4.034	0	4.023	0	4.018	0	3.999
11	3.923	11	3.909	11	3.896	11	3.876	11	3.861
22	3.657	22	3.698	22	3.732	22	3.776	22	3.817
33	3.661	33	3.587	33	3.476	33	3.443	33	3.434
47	3.518	47	3.568	47	3.616	47	3.729	47	3.809
58	4.128	58	4.060	58	4.000	58	3.925	58	3.848
69	4.138	69	4.217	69	4.294	69	4.335	69	4.380
80	4.666	80	4.654	80	4.620	80	4.533	80	4.452

Com os valores da Fig. 4.44 obteve-se o ângulo de  $1,25^\circ \pm 0,47^\circ$  para a distorção angular. Utilizando a Eq. 3. Este valor é a média das 10 retas obtidas pelos 5 cortes transversais mostrados na Tab. 4.23.

Tabela 4.23 – Ângulos obtidos do corte transversal

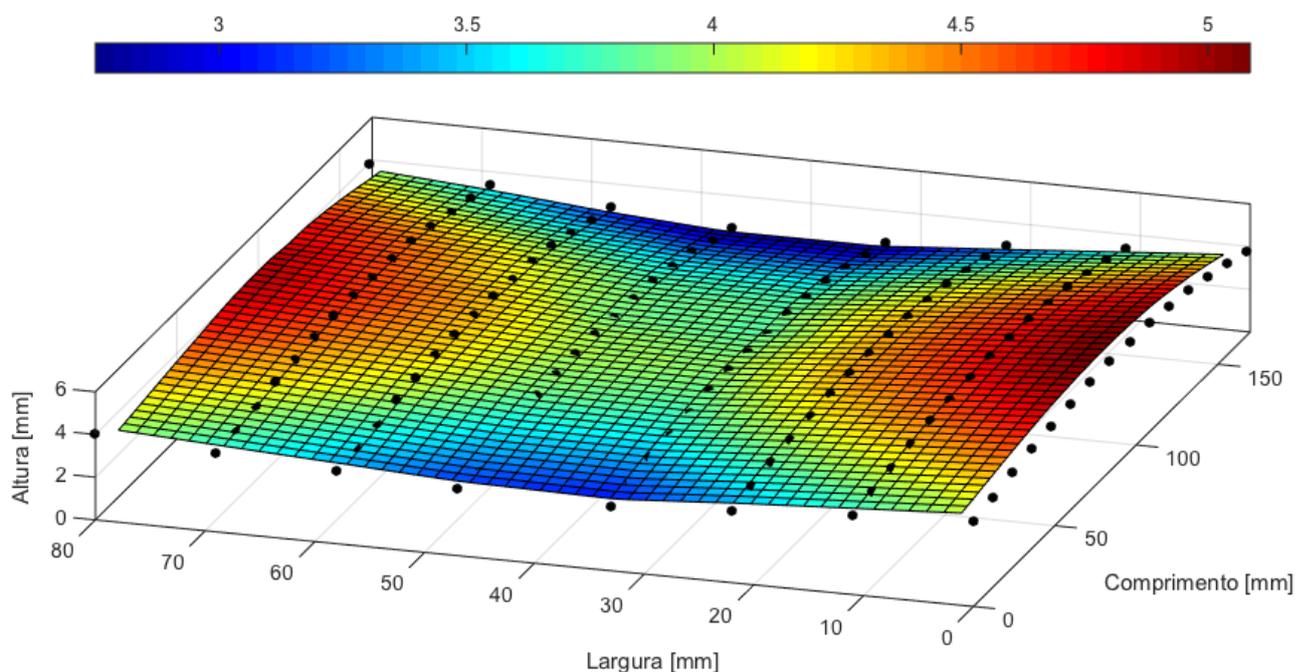
	Ângulos	
Corte A	0,68°	1,99°
Corte B	0,78°	1,88°
Corte C	0,95°	1,74°
Corte D	1,00°	1,40°
Corte E	0,98°	1,12°
<b>Média</b>	<b>1,25°</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,47°</b>	

#### 4.6.5. Comparação das Deformações com Passe de Raiz + 1 Passe de Enchimento e Passe de Raiz + 2 Passes de Enchimento, com e sem Restrições

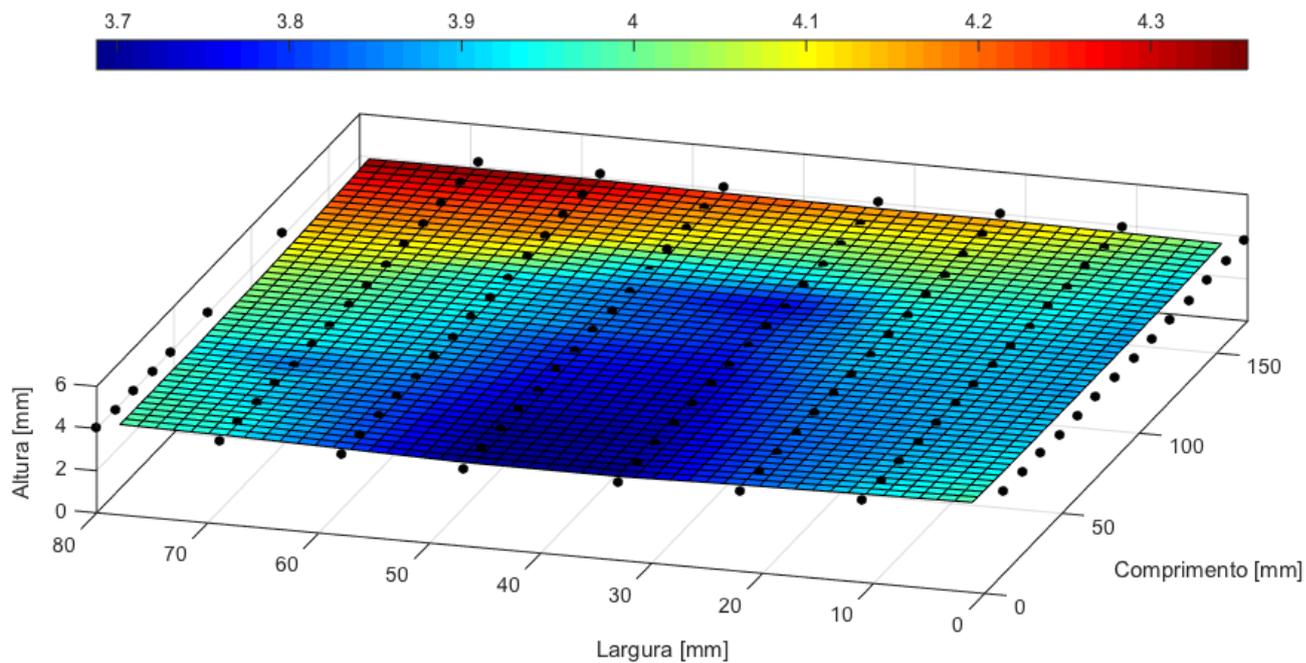
A Fig. 4.45 coloca lado a lado as Fig.s 4.31, 4.35, 4.39 e 4.43 onde se pode verificar as medições realizadas com as 4 condições de soldagem para o aço inoxidável 316L.

Figura 4.45 – Medição real com e sem restrição do aço 316L [mm]

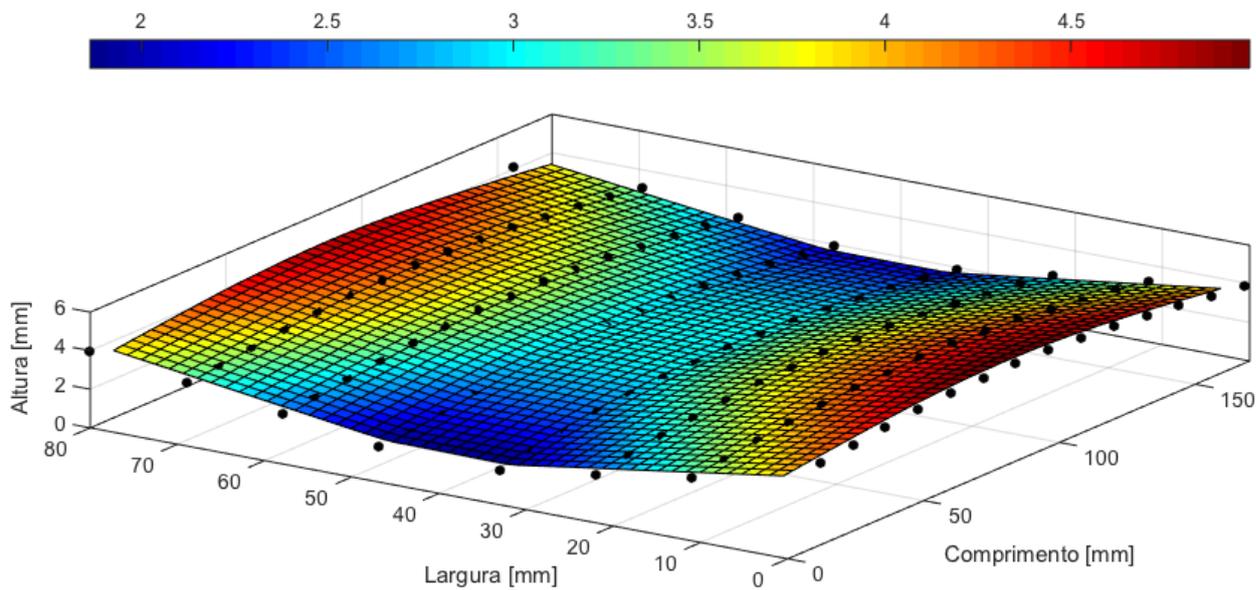
a) Passe Raiz + 1 passe de enchimento – Sem restrição



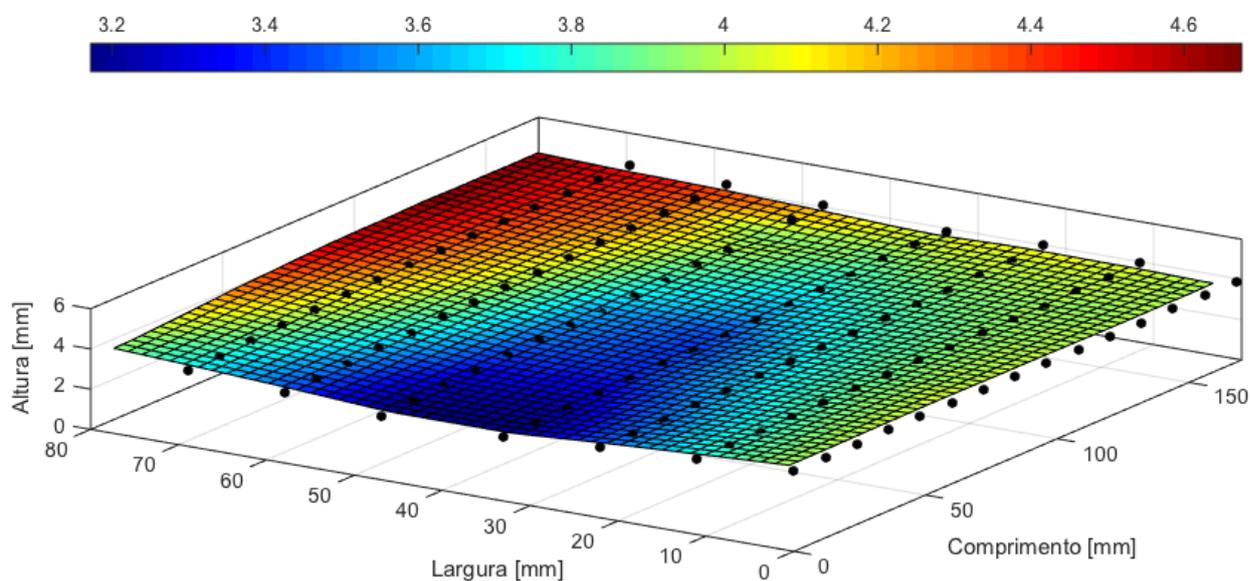
## b) Passe Raiz + 1 passe de enchimento – Com restrição



## c) Passe Raiz + 2 passes de enchimento – Sem restrição



d) Passe Raiz + 2 passes de enchimento – Com restrição



A Fig. 4.45 apresenta um comparativo dos resultados obtidos manipulando os dados da máquina de medir coordenadas. É possível verificar que para a condição sem restrição foram obtidos maiores deformações conforme a escala das figuras. Dentre as condições de soldagem o parâmetro onde se realizou passe de raiz + 2 passes de enchimento apresentam as maiores distorções angulares.

Fazendo-se uma comparação do nível de distorções entre chapas com e sem restrições, pode-se observar que as restrições diminuíram muito o nível das distorções tanto angular quanto longitudinal (flexão ou arqueamento) para a mesma energia de soldagem.

A Tab. 4.24 apresenta os valores para o ângulo de distorção para o aço inoxidável 316L para as condições abordadas no presente estudo.

Tabela 4.24 – Comparação do ângulo de deformação para o aço inoxidável 316L para as condições abordadas

	Sem Restrição	Com Restrição
Passe de raiz + 1 passe de enchimento	1,90°	0,28°
Passe de raiz + 2 passes de enchimento	3,41°	1,25°

Fonte: Próprio autor

Observando os valores de distorção obtidos para o aço inoxidável 316L é possível verificar que os níveis de distorções foram maiores para os processos de soldagem onde não houve restrição. A condição de passe de raiz + 1 passe de enchimento apresentaram as menores distorções comparando-se com a condição de passe de raiz + 2 passes de enchimento.

#### 4.7 Comparação Geral

Comparando-se os níveis de distorções ocorridas pelo processo de soldagem entre chapas de 304L e 316L, verificou-se que os resultados ficaram bastante próximos. A média das distorções angulares para as chapas de 316L sem restrições passe de raiz + 1 passe foi de 1.90° e para as chapas com restrições a média foi de 0.28°, praticamente idênticos aos resultados das chapas de 304L com 1.78° e 0.32° respectivamente. Para o aço 316L na condição passe de raiz + 2 passes sem restrição a média foi 3,41° e com restrição foi 1,25°. Já para o aço 304L 3,61° e 1,39°, respectivamente. Estes resultados estão dentro do esperado, uma vez que as diferenças de propriedades termomecânicas do 304L para o 316L são muito pequenas, não alterando significativamente o comportamento estrutural das chapas.

## Capítulo 5 - Conclusões

Para as condições e parâmetros utilizados no presente trabalho, pode-se concluir que:

Como os processos de soldagem a arco realizam uma imposição de calor intensa e localizada na estrutura, o resultado final não poderia ser diferente do surgimento de distorções e tensões residuais. Contudo, este trabalho mostrou que para níveis de restrições maiores, menores seriam as amplitudes destas distorções.

Outra condição que mostrou uma diminuição das distorções foi a quantidade de passes de soldagem para o preenchimento da junta. As condições de três passes de soldagem mostraram um aumento significativo em comparação às condições de dois passes de soldagem. Este resultado foi condicionado a mesma quantidade de energia de soldagem para ambos os casos, com o objetivo de tirar a influência do calor imposto na distorção.

E por último, comparando-se as distorções entre os aços inoxidáveis 304L e 316L, não foi possível chegar num resultado conclusivo, devido à dificuldade de se parametrizar os processos de soldagem com a mesma energia de soldagem para ambos os aços. Entretanto, mesmo com uma diferença pequena na energia de soldagem destes aços, as distorções foram bastante próximas.

## Capítulo 6 - Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para futuros trabalhos a serem realizados são apresentados os seguintes pontos:

- Investigar o efeito da distorção angular variando o tipo de chanfro;
  
- Investigar o efeito da distorção longitudinal variando o número de passes e graus de restrição.
  
- Avaliar a influência da distorção angular em juntas em T variando o número de passes e graus de restrição.
  
- Verificar se o suporte de soldagem confeccionado é rígido o suficiente para os ensaios de distorção angular abordados neste trabalho

## Capítulo 7 - REFERÊNCIAS

Acesita; Soldagem dos Aços Inoxidáveis. 2005.

Aksteel, 304/304L Stainless steel bulletin. West Chester-OH, 2007.

Aksteel, 316/316L Stainless steel bulletin. West Chester-OH, 2007.

Amante, D.A.M.; Imperfeições de Fabricação na Construção Naval e Offshore. UFRJ – Rio de Janeiro – RJ – Fevereiro 2006.

ASM Metal Handbook Vol. 6 – Welding, Brazing and Soldering. Residual Stress and Distortion. 1990.

AWS A5.18-05 Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. American Welding Society, 2005.

ASM SPECIALTY HANDBOOK. Metallurgy and Properties of Wrought Stainless Steels. In: ASM Specialty Handbook: Stainless Steels. Material Park, ASM International, 1984. P. 13-65.

Bhadeshia H.K.D.H., Wollin P. Microstructural Change in High Temperature Heat-Affected Zones of Welded, University of Cambridge & TWI, February, 2002.

British Stainless Steel Association. Disponível em: [http://www.bssa.org.uk/about\\_stainless\\_steel.php?id=31](http://www.bssa.org.uk/about_stainless_steel.php?id=31). Acesso em: 23 Out 2014.

ESAB, Processos de Soldagem MIG/MAG. 2005.

ESAB, Diagrama de Schaeffler. Disponível em: <<http://costcalculator.esab.com/Schaeffler/Analysis.aspx>> Acesso em: 30 de Janeiro 2015.

FBTS (Fundação Brasileira da Tecnologia da Soldagem), Departamento de Inspeção de soldagem. 10<sup>a</sup> Ed. 2003.

Ferramenta. Alimentadores semi-automáticos. Disponível em: <<http://soldadura.pt/shop/index.php/alimentadores-fio-semi-automaticos/power-feed-10m.html>>. Acesso em: 22 de outubro 2014

Ferraresi, V. A.; Resende, A. A. O Processo de Soldagem Plasma-MIG. 17 Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

Hypetherm. Cutting Brochure Disponível em: <[http://hypertherm.westgatehitech.com.au/media/files/1650BS\\_4c3eab8f8b491.jpg](http://hypertherm.westgatehitech.com.au/media/files/1650BS_4c3eab8f8b491.jpg)> Acesso em: 25 de novembro 2014.

Kyriankongonas, A.P. 3D Numerical modeling of austenitic stainless steel 316L multi-pass butt welding and comparison with experimental results. National Technical University of Athenas, 2010

Kou, S. Welding Metallurgy – 2 edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

Lincoln Electric. Advanced Process Welders Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K2203-1/e5161.pdf>>. Acesso em: 23 de Outubro 2014.

Lincoln Electric GMAW Welding Guide. The Lincoln Electric Company, 2010.

Lincoln Electric. The welding experts. Welding Distortion. 2013. Disponível em:

<<http://www.lincolnelectric.com/en-gb/support/welding-how-to/Pages/welddistortiondetail.aspx>>. Acesso em: 22 de outubro de 2013.

Lincoln Electric. Welding Brochure. Disponível em: <<http://assets.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K2203-1/300x300.jpg>>. Acesso em: 22 de outubro 2014.

Matweb. 316L Stainless Steel Datasheet. Disponível em: <[http://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=530144e2752b47709a58ca8fe0849969](http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=530144e2752b47709a58ca8fe0849969)>. Acesso em: 25 de novembro 2014.

Modenesi, P.J., Introdução à metalurgia da soldagem. Editora Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

Modenesi, P. J., Marques, P.V. Introdução aos processos de soldagem. Editora Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

Modenesi, P.J.; Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo, SENAI-SP, 2001. 100 p.; il. (Coleção Tecnologia da Soldagem Vol. 1).

Montgomery, D. C.; Runger, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros – 4 edição. LTC, 2009.

Motoman. HP20 Brochure (Disponível em: <http://www.robots.com/motoman/hp20> - Data de acesso: 22 out 2014).

Neris, M.M., Apostila Soldagem dos Metais. Unisanta - Universidade Santa Cecília, Santos-SP 2012.

Novais, P.R.S. Avaliação das principais discontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções. Construmetal – Congresso Latino Americano da Construção Metálica. São Paulo: Setembro 2010.

Rocha, A.; Renovação da Indústria Naval. Revista Energia Business, Ribeirão Preto - SP - Abril 2014. p. 18-19.

Scotti, A.; Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho / Américo Scotti; Vladimir Ponomarev. – São Paulo: Artiber Editora, 2008.

Shen, C. Low distortion welding for shipbuilding industry. University of Wollongong – Austrália, 2013.

Stahl, Offshore Solutions Catalog. Wandenburg, Germany, 2006

Souza, E.C.N, et al. Revisão bibliográfica sobre a influencia da soldagem na geração de tensões residuais e distorções em estruturas soldadas na indústria naval. FAACZ. 2011

Zanetic, S.T. et al. Determinação do grau de sensitização de aços inoxidáveis austeníticos pelo método DL-EPR. São Paulo: 1994

Zeemann, A. Energia de soldagem. Infosolda – RJ. 2003

Washko, S.D., Wrought Stainless Steels. In: ASM Metals Handbook, 1990, v.1, p.2004-2005.

WIKA, S.F. Pitting and Crevice Corrosion of Stainless Steel Under Offshore Conditions. NTNU - Norwegian University of Science and Technology. Trondheim: Jul, 2012.

# Apêndices

## Apêndice I

### Composição Química do Arame-Eletrodo



Datasheet updated 2012-08-17 14:51:14 (supersedes all previous editions)

## Sandvik 19.9.L (Welding wire)

Sandvik 19.9.L is used for TIG, plasma arc welding and submerged arc welding. It is suitable for joining stainless steels of the 18Cr/8Ni/ELC, and 18Cr/8Ni/Nb types for service temperatures up to 350°C (660°F). Sandvik 19.9.L is approved by TÜV-Rheinland for use at cryogenic temperatures down to 4°K (-269°C).

#### STANDARDS

- AWS ER308L
- EN number 19 9 L

#### Product standards

- EN ISO 14343
- ASME/AWS SFA5.9

#### FILLER METAL

#### CHEMICAL COMPOSITION (AIM), WT%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	Cu	N
<0.025	0.4	1.8	<0.025	<0.015	20	10	<0.5	<0.20	<0.2	<0.06



Datasheet updated 2013-11-27 10:27:59 (supersedes all previous editions)

## Sandvik 19.12.3.LSi

(Welding wire)

Sandvik 19.12.3.LSi is suitable for joining stainless Cr-Ni-Mo and Cr-Ni steels, stabilized or non-stabilized, e.g. ASTM 316, 316L and 316Ti as well as 304, 304L, 321 and 347, for service temperatures up to 400°C (750°F), stainless Cr-steels with max 19% Cr. It is used for MIG/MAG-, TIG- and plasma-arc welding.

### STANDARDS

- AWS ER316LSi
- EN number 19 12 3 L Si

### Product standards

- EN ISO 14343
- ASME/AWS SFA5.9

### FILLER METAL

#### CHEMICAL COMPOSITION (AIM), WT%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
<0.025	0.9	1.8	<0.025	<0.015	18.5	12	2.6	<0.060

## Composição Química do Metal de Base

AISI Type 304L Stainless Steel

06/11/13 12:42

Component Elements	Metric	English	Comments
<b>Properties</b>			
Carbon, C	<= 0.030 %	<= 0.030 %	
Chromium, Cr	18 - 20 %	18 - 20 %	
Manganese, Mn	<= 2.0 %	<= 2.0 %	
Nickel, Ni	8.0 - 12 %	8.0 - 12 %	
Phosphorous, P	<= 0.045 %	<= 0.045 %	
Silicon, Si	<= 1.0 %	<= 1.0 %	
Sulfur, S	<= 0.030 %	<= 0.030 %	

[http://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=e2147b8f727343b0b0d51efe02a6127e](http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e2147b8f727343b0b0d51efe02a6127e)

AISI Type 316L Stainless Steel

04/18/2014

<b>Component Elements Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>
Carbon, C	<= 0.030 %	<= 0.030 %
Chromium, Cr	16 - 18 %	16 - 18 %
Iron, Fe	61.9 - 72 %	61.9 - 72 %
Manganese, Mn	<= 2.0 %	<= 2.0 %
Molybdenum, Mo	2.0 - 3.0 %	2.0 - 3.0 %
Nickel, Ni	10 - 14 %	10 - 14 %
Phosphorous, P	<= 0.045 %	<= 0.045 %
Silicon, Si	<= 1.0 %	<= 1.0 %
Sulfur, S	<= 0.030 %	<= 0.030 %

Fonte: Matweb (2014)