

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

CASSIANO HILLEBRAND

ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES E EMPENAMENTOS EM PEÇAS
DE AÇO CARBONO PARA CILINDROS HIDRÁULICOS

CAXIAS DO SUL

2019

CASSIANO HILLEBRAND

**ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES E EMPENAMENTOS EM PEÇAS
DE AÇO CARBONO PARA CILINDROS HIDRÁULICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de conhecimento: Processos de Fabricação.

Orientador: MSc. Eng. Victor Hugo Velazquez Acosta

CAXIAS DO SUL

2019

CASSIANO HILLEBRAND

**ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES E EMPENAMENTOS EM PEÇAS
DE AÇO CARBONO PARA CILINDROS HIDRÁULICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial para obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico. Área de conhecimento: Processos de
Fabricação.

Aprovado em: 28/11/2019.

Banca Examinadora:

Prof. MSc. Eng. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. MSc. Eng. Jefferson Haag
Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS

Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida.

Aos meus pais Albano e Marlene pelo amor, incentivo e apoio incondicional. A minha noiva Gabriela pela compreensão nos diversos momentos de ausência e apoio em todos os fins de semana dedicado aos estudos.

Ao professor MSc. Victor Hugo Velazquez Acosta Eng. Metalúrgico, orientador deste trabalho, pelos seus conhecimentos, sua atenção e boa vontade.

A empresa Ognibene Hidrostática Ltda por fornecer a matéria prima utilizada e a disponibilidade das máquinas para realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Ensaio Mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul, no qual realizaram os ensaios metalográficos.

A todos aqueles que, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho. Meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Alterações no conceito de fabricação de tratores acarretaram mudanças nos processos de produção de cilindros e no aumento da complexidade dos processos de soldagem, gerando aumento de distorções e empenamentos. Distorções e/ou empenamentos em componentes de cilindros hidráulicos não são facilmente detectáveis até o momento da montagem. Os componentes já possuem um alto valor agregado e o retrabalho torna-se mais difícil, sendo muitas vezes mais vantajoso o sucateamento das peças. Neste estudo, foram analisados 5 métodos de soldagem alternativos ao atual, executados em 18 amostras, analisando as variações de ovalização, flexão do tubo nas direções 0° e 90° e análise da penetração dos cordões de solda, através de medições e teste destrutivos. A ovalização aumentou em todos os processos, exceto para o método que utilizou parâmetros atuais e sequência modificado com pós aquecimento, no qual apresentou resultados semelhantes ao método atual. Houve redução na distorção por flexão no tubo, na direção 0°, de 0,03 mm usando o método de redução do aporte térmico. Na direção 90° o método que utilizou o parâmetro atual com sequência modificada e pós aquecimento apresentou distorções médias menores do que 0,03 mm, obtendo, desta forma os melhores resultados nesta direção. Análises de variância utilizando o método do teste t, comprovaram que apenas para o ponto D no método de redução do aporte térmico na direção 0°, obteve-se uma diferença significativa em comparação com o método atual. Conclui-se, portanto, que nenhum dos métodos utilizados foi eficiente na redução da distorção total por soldagem das peças.

Palavras-chave: cilindros hidráulicos, soldagem, GMAW, distorções, empenamentos.

ABSTRACT

Changes in the concept of tractor manufacturing led to changes in cylinder production processes and increased complexity of welding processes, leading to increased distortion and warping. Distortions and / or bends in hydraulic cylinder components are not easily detectable until assembled. Components already have a high added value and rework becomes more difficult and parts scrapping is often more advantageous. In this study, we analyzed 5 alternative welding methods to the current one, performed on 18 samples, It was observed through measurements and destructive testing, variations on ovalization, tube flexion in directions 0° and 90° and penetration of welds. Ovalization increased in all processes, except for the method that used the current parameter with modified sequence and post heat, which showed results similar to the current method. There was a reduction in bending distortion in the 0° direction of 0.03 mm using the heat input reduction method. In the 90° direction, the method that used the current parameter with modified sequence and post heat, presented average distortions less than 0.03 mm, obtaining the best results in this direction. T-test variance analysis method showed that only for the point D in the heat input reduction method at the 0° direction, a significant difference was obtained compared to the current method. We concluded that none of the methods used were efficient in reducing the total distortion by welding of the parts

Keywords: hydraulic cylinders, welding, GMAW, distortions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção nacional de tratores	12
Figura 2 - Processo de soldagem GMAW	16
Figura 3 - Esquema de equipamento básico para a soldagem GMAW	16
Figura 4 - Transferência por curto-circuito	18
Figura 5 - Transferência globular	18
Figura 6 - Transferência Spray	19
Figura 7 - Transferência Arco Pulsado	21
Figura 8 - Processo pulsação térmica	22
Figura 9 - Efeito do gás de proteção no formato do cordão	24
Figura 10 - Ciclo térmico de soldagem	26
Figura 11 - Curva de repartição térmica	27
Figura 12 - Analogia barra aquecida	28
Figura 13 - Tensões internas em função da temperatura	29
Figura 14 - Tensões residuais na soldagem	29
Figura 15 - Tipos básicos de deformações	31
Figura 16 - Redução da distorção angular	32
Figura 17 - Métodos de redução de distorções	33
Figura 18 - Influência da sequência de soldagem	34
Figura 19 - Diagrama esquemático traçador de perfil	35
Figura 20 - Goniômetro	36
Figura 21 - Máquina de medição por coordenadas	36
Figura 22 - Diagrama esquemático de sistema de varredura a laser	37
Figura 23 - Corpo de prova	38
Figura 24 - Movimento da tocha durante soldagem	40
Figura 25 - Componentes da máquina RWC1200	40
Figura 26 - Ciclo de soldagem atual	43
Figura 27 - Novo ciclo de soldagem	43
Figura 28 - Aquecimento localizado	44
Figura 29 - Controle do aquecimento localizado realizado por câmera térmica	45
Figura 30 - Desenho da peça	46
Figura 31 - Medição da deformação interna	46
Figura 32 - Medição da flexão	47

Figura 33 - Fluxograma de operações	48
Figura 34 - Pontos e direções medidas	49
Figura 35 - Média da ovalização antes da soldagem	49
Figura 36 - Média da ovalização dos métodos testados	50
Figura 37 - Distorção por flexão na direção 0°	51
Figura 38 - Distorção por flexão para método atual e redução do aporte térmico	52
Figura 39 - Distorção por flexão para método atual e com pós aquecimento	53
Figura 40 - Distorção por flexão para método atual e com sequência modificada	53
Figura 41 - Distorção por flexão para método atual e com redução do aporte térmico	54
Figura 42 - Distorção por flexão na direção 90°	55
Figura 43 - Localização dos cortes para análise metalográfica	56
Figura 44 - Macrografia amostra 2 – método atual	56
Figura 45 - Macrografia amostra 6 – Redução do aporte térmico	57
Figura 46 - Macrografia amostra 10 – Redução do aporte térmico e sequência modificada ...	57
Figura 47 - Macrografia amostra 12 – Parâmetro atual e sequência modificada	58
Figura 48 - Macrografia amostra 16 – Processo atual com pós aquecimento	58
Figura 49 - Macrografia amostra 19 – Processo atual e sequência modificada com pós aquecimento	59
Figura 50 - Imagem termográfica sem aquecimento localizado.....	60
Figura 51 - Imagem termográfica após aquecimento localizado.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Corrente de transição para arame de aço carbono de	20
Tabela 2 - Gases e misturas usados na soldagem GMAW	24
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos componentes.....	39
Tabela 4 - Composição química dos componentes	39
Tabela 5 - Metodologia e quantidade de amostras	41
Tabela 6 - Parâmetros de processo	42
Tabela 7 - Resumo das metodologias.....	48
Tabela 8 - Resultados análise metalográfica.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
FBTS	Fundação Brasileira de Tecnologia de Soldagem
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>

SUMÁRIO

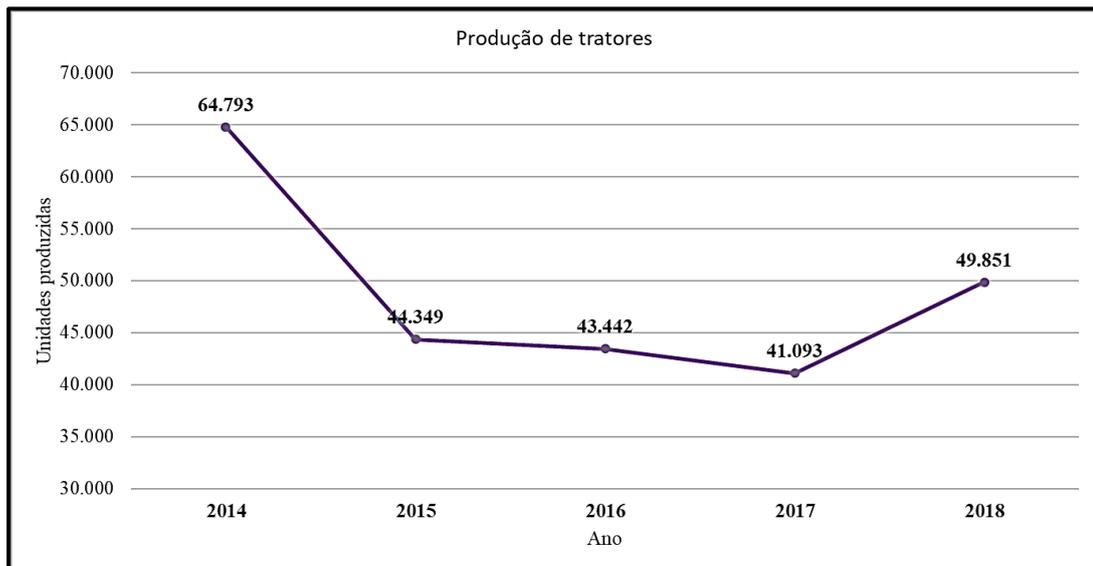
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	13
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.3.1	OBJETIVO GERAL	14
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO ELÉTRICO GMAW.....	15
2.1.1	Transferência do metal	17
2.1.1.1	Curto circuito	17
2.1.1.2	Globular	18
2.1.1.3	Spray	19
2.1.1.4	Arco pulsado	20
2.1.1.5	Outros processos de soldagem	21
2.1.2	Gases de Proteção	23
2.2	FATORES TÉRMICOS DA SOLDAGEM	24
2.2.1	Energia de soldagem	25
2.2.2	Ciclo térmico de soldagem	25
2.2.3	Zona termicamente afetada	26
2.3	TENSÕES RESIDUAIS E DEFORMAÇÕES.....	27
2.3.1	Tipos de distorções na soldagem	30
2.3.2	Prevenção e controle da deformação	31
2.3.3	Métodos de medição da deformação	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.3	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	41
3.3.1	Metodologia de análise atual	42
3.3.2	Metodologia com redução do aporte térmico	43
3.3.3	Metodologia com alteração da sequência de soldagem e redução do aporte térmico	43
3.3.4	Metodologia com alteração da sequência de soldagem	44

3.3.5	Metodologia com alteração da sequência de soldagem e aquecimento localizado.....	44
3.3.6	Metodologia com aquecimento localizado	45
3.4	ANÁLISE DIMENSIONAL.....	45
3.5	ENSAIOS METALOGRAFICOS E DEFEITOS VISUAIS	47
3.6	SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES	48
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	49
4.1	OVALIZAÇÃO	49
4.2	DISTORÇÃO POR FLEXÃO	51
4.3	ANÁLISE MACROGRÁFICA	56
4.4	ANÁLISE TERMOGRÁFICA.....	60
5	CONCLUSÕES	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICE A - DIÂMETRO INTERNO ANTES DA SOLDAGEM.....	66
	APÊNDICE B - DIÂMETRO INTERNO APÓS A SOLDAGEM.....	67
	APÊNDICE C - RETILINEIDADE DO TUBO ANTES DA SOLDAGEM ...	68
	APÊNDICE D - RETILINEIDADE DO TUBO APÓS A SOLDAGEM.....	69
	APÊNDICE E - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 2 – MÉTODO ATUAL ..	70
	APÊNDICE F - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 6 – PARÂMETROS MODIFICADOS	71
	APÊNDICE G - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 10.....	72
	APÊNDICE H - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 12.....	73
	APÊNDICE I - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 16	74
	APÊNDICE J - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 19 - PROCESSO ATUAL	75
	APÊNDICE K – ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE PROCESSO ATUAL E MÉTODO COM REDUÇÃO DO APORTE TÉRMICO	76

1 INTRODUÇÃO

O desempenho do mercado agrícola nacional e a estabilidade atual da economia levaram a retomada no crescimento da produção de equipamentos agrícolas, principalmente de tratores. A Figura 1 apresenta a variação na produção nacional de tratores nos últimos 5 anos.

Figura 1 - Produção nacional de tratores



Fonte: adaptado de ANFAVEA (2018)

Aliado ao aumento de produção, a concepção do projeto dos tratores neste mesmo período sofreu alterações. Optou-se por utilizar cilindros de direção com fabricação mais complexa, principalmente no que tange a soldagem, e conseqüentemente mais caros, comparado com os modelos em uso até o momento, mas que possibilitam sua utilização em eixos simples; isto é; com menor quantidade de componentes e com montagem facilitada, possibilitando a redução do custo total de fabricação do eixo.

A alteração do desenho dos cilindros, conseqüência da nova concepção na fabricação de tratores, acarretou a alteração dos processos de produção e no aumento da complexidade dos processos de soldagem. Até aquele momento, grande parte das soldagens envolvendo componentes de cilindros hidráulicos se davam através de soldagens circunferenciais, gerando distorções que não causavam influência na funcionalidade dos produtos ou mesmo que podiam ser facilmente eliminadas nos processos de produção posteriores. A partir desta nova concepção, as soldagens de suportes laterais em partes específicas das peças se tornou

predominante, causando um aumento das distorções e empenamentos, não sempre totalmente corrigidos nos processos de usinagem subsequentes.

1.1 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A empresa Ognibene Hidrostática Ltda é uma multinacional italiana que atua no segmento hidráulico, há mais de 60 anos, apresentando soluções customizadas para seus clientes no fornecimento de cilindros hidráulicos e unidades hidrostáticas para sistema de direção de veículos fora de estrada. Possui unidades produtivas na Itália, Brasil, Índia, China, um centro logístico nos Estados Unidos, um escritório de vendas no Japão e conta atualmente com mais de 1250 funcionários diretos.

O presente trabalho será desenvolvido na área de engenharia de processos da empresa Ognibene, na unidade de Caxias do Sul. Contará com o auxílio dos setores de engenharia de produto (situada na matriz Itália) e qualidade.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A soldagem é um dos principais processos utilizados na fabricação de componentes para cilindros hidráulicos, tornando possível a fabricação de produtos de forma mais rápida e consequentemente mais econômica.

As deformações e empenamentos causados pela soldagem a arco elétrico podem afetar a utilização e/ou o desempenho de componentes soldados. Faz-se de fundamental importância, portanto, o entendimento das suas causas e as medidas para sua prevenção.

As distorções e/ou empenamentos em componentes de cilindros hidráulicos não são facilmente detectáveis até o momento da montagem dos cilindros, os componentes já possuem um alto valor agregado e o retrabalho torna-se mais difícil, sendo muitas vezes mais vantajoso o sucateamento das peças.

Dessa forma, o presente trabalho pretende estudar as distorções e suas causas e propor métodos de controle, visando minimizar seus efeitos e a possibilidade de interferirem na qualidade do produto, reduzindo a quantidade de peças não conformes e, consequentemente, o custo de fabricação dos componentes soldados e do cilindro hidráulico como um todo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar o processo de soldagem e quantificar as deformações de componentes de cilindros hidráulicos através de medições dimensionais e ensaios metalográficos visando o seu entendimento, o controle e a redução dos seus efeitos.

1.3.2 Objetivos específicos

Em complementação ao objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) revisar bibliografia sobre o processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*);
- b) estudar as características dos materiais envolvidos e os mecanismos (fatores de influência) de deformações e empenamentos;
- c) propor metodologia de análise para prevenção e/ou atenuação das deformações provenientes da soldagem;
- d) executar experimentalmente as metodologias de soldagem mais relevantes para atenuação das deformações;
- e) comparar os resultados obtidos com o processo / parâmetros atuais através de análises dimensionais e metalográficas e implementá-los no processo de soldagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica envolvendo o processo soldagem à arco elétrico, especialmente no que se refere ao processo de soldagem GMAW, e as deformações e empenamentos gerados por este processo. Descreve os tipos de deformação, as principais causas e os mecanismo de prevenção e controle das deformações.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO ELÉTRICO GMAW

O processo de soldagem GMAW é amplamente utilizado na indústria, devido a sua versatilidade, possibilitando a soldagem em diversas posições e possui altas taxa de deposição, dependendo dos parâmetros, gás de proteção e arame usado. O processo é de fácil operação, sendo facilmente automatizado ou robotizado, o que possibilita elevadas velocidades de soldagem e uniformidade na penetração; é protegido por gases que reduzem drasticamente a formação de escória e a presença de porosidades.

A união de peças metálicas através do processo GMAW se dá através da formação do arco elétrico gerado entre o arame, consumível, e a peça a ser soldada. A poça de fusão formada é protegida da atmosfera por um gás, que pode ser inerte, então chamado MIG (*Metal Inert Gas*), ou então ativo, chamado MAG (*Metal Active Gas*). (MACHADO, 1996)

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2005) o arco elétrico gera o calor necessário para fusão do metal base e do arame, transferindo-os para a poça de fusão. Como pode ser visto na Figura 2, a transferência do arame à poça de fusão se dá através de gotas, cujo formato, quantidade e dimensão podem variar de acordo com o tipo de transferência. A atmosfera protetora gerada pelo gás impede a contaminação da poça de fusão.

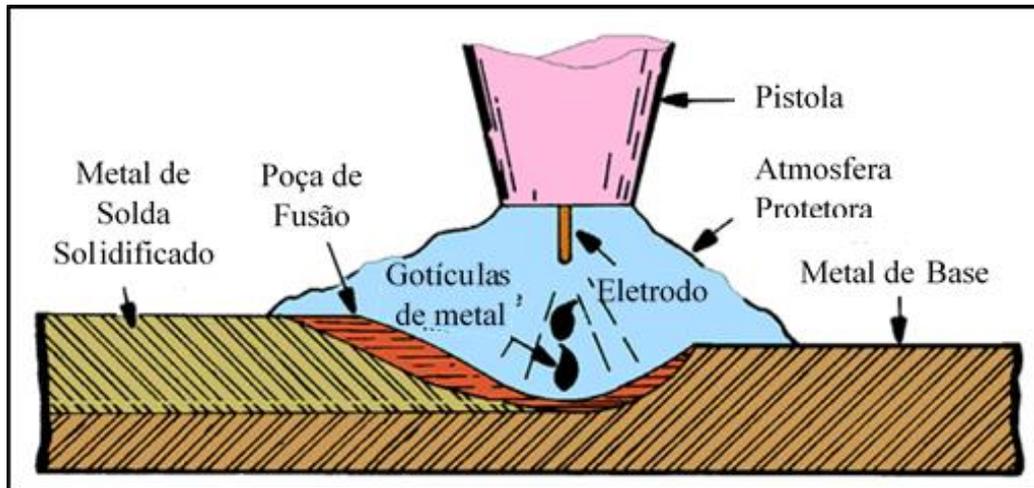
A Figura 3 mostra um esquema do equipamento básico utilizado no processo de soldagem GMAW, que é composto pelos seguintes elementos:

- a) fonte de energia de corrente contínua;
- b) alimentador de arame;
- c) tocha de soldagem;
- d) fonte de gás protetor;
- e) cabos e mangueiras;

As fontes de energia do tipo corrente constante permitem variações na velocidade de alimentação do arame, sem que haja variação significativa da corrente. As fontes do tipo tensão constante, onde a alimentação do arame é constante, permitem grandes variações de corrente,

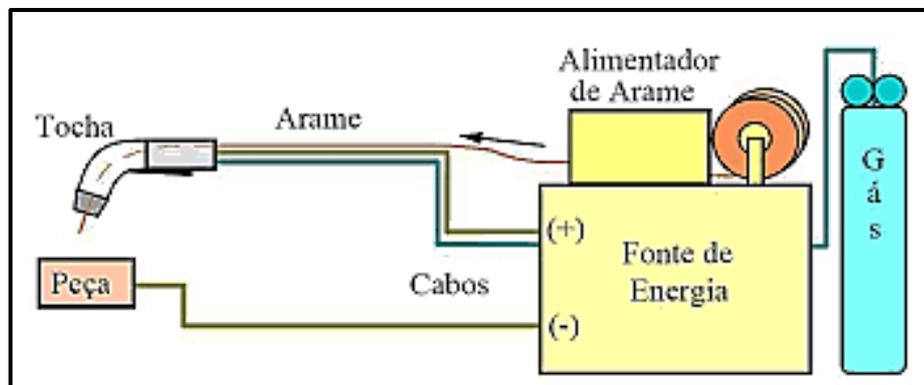
fornecendo tensão com pequena variação. A fonte de energia de tensão constante é a mais utilizada, por ser mais simples, barata e apresentar bons resultados. (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2005)

Figura 2 - Processo de soldagem GMAW



Fonte: FBTS (2016)

Figura 3 – Esquema de equipamento básico para a soldagem GMAW



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

A tensão do arco determina o comprimento do arco voltaico; para uma fonte de tensão constante, quando ocorre uma variação momentânea na tensão do arco, ou da velocidade de alimentação do arame, a fonte regula a corrente, para mais ou para menos, dependendo do comprimento do arco, mantendo assim a taxa de fusão do arame constante. (Fontes, 2005)

O alimentador de arame é acionado por um motor de corrente contínua e é composto por um ou mais pares de roletes, que tracionam o arame a uma velocidade contínua e ajustável, "A velocidade junto com a tensão selecionada da fonte, determinam o valor da corrente de soldagem". (WAINER, BRANDI, & MELLO, 1992, p. 102)

A tocha de soldagem é composta por um punho ou suporte, um bico de contato, responsável por transmitir a corrente de soldagem para o arame, um bocal para direcionamento do gás de proteção à poça e fusão e seus arredores e um gatilho de acionamento; em sistemas automáticos este último é inexistente. “O tubo de contato é um tubo à base de cobre, cujo diâmetro interno é ligeiramente superior ao diâmetro do arame eletrodo, e serve de contato deslizante”. (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2005, p. 247).

As tochas podem ser refrigeradas à água ou secas, neste último caso o próprio gás de proteção serve como agente resfriador; podem ter extremidades retas ou curvas. A ligação entre o sistema de alimentação e a tocha se dá através de um componente chamado conduíte, que deve ser especificado de acordo com o diâmetro do arame utilizado, para obter uma alimentação uniforme e assim garantir a estabilidade do arco.

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2005, p. 247) “A fonte de gás consiste normalmente de um cilindro de gás ou mistura de gases a serem usados na proteção do cordão de solda e reguladores de pressão e/ou vazão”.

2.1.1 Transferência do metal

De acordo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), o modo como acontece a transferência do metal fundido na ponta do arame à poça de fusão afeta a estabilidade do arco, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, o nível de respingos e a posição de soldagem.

Existem quatro formas básicas de transferência do metal de adição à peça.

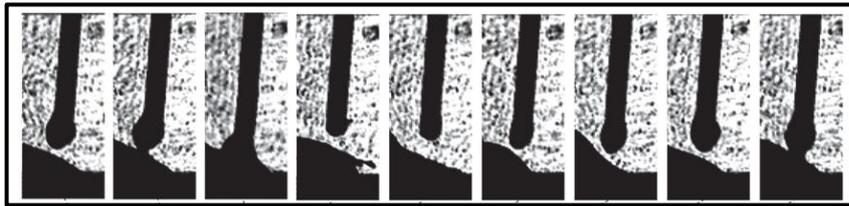
- a) curto-circuito;
- b) globular;
- c) spray
- d) arco pulsado

2.1.1.1 Curto circuito

A transferência por curto-circuito é geralmente usada na soldagem de peças finas e soldagens fora da posição plana onde é necessária pouca energia de soldagem; isto é; baixa quantidade de energia dispendida por unidade de comprimento soldado. Utiliza menores faixas de corrente e menor diâmetro de arame (0,8 a 1,2 mm). Pode ser usado qualquer tipo de gás de proteção e a taxa de deposição é baixa, conforme indicam Wainer, Brandi e Mello (1992).

Como pode ser visto na Figura 4, uma gota de metal se forma na ponta do arame e vai aumentando de diâmetro até tocar a poça de fusão, formando um curto-circuito. A gota é puxada para a poça de fusão pela tensão superficial. Como ocorre uma forte separação da gota durante a transferência, pode haver intensa formação de respingos, conforme explicam Marques, Modenesi e Bracarense (2005). O metal é transferido somente durante o contato da gota com a poça de fusão, esse contato varia de 20 a 200 vezes por segundo.

Figura 4 - Transferência por curto-circuito

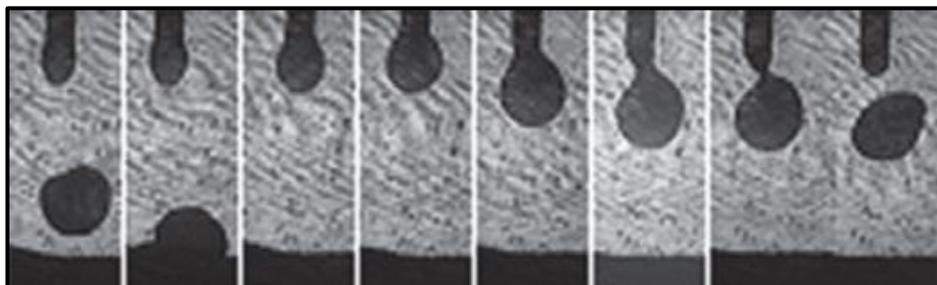


Fonte: Adaptado de Scotti e Ponomarev (2014)

2.1.1.2 Globular

A transferência globular ocorre em valores de tensão e corrente intermediários, comparando com outros modos de transferência, segundo Wainer, Brandi e Mello (1992). A transferência se dá na forma de gotas, geralmente de diâmetro maior que o arame. As forças envolvidas são a tensão superficial e principalmente a aceleração da gravidade, o que limita a aplicação para a posição plana. Como desvantagens, Wainer, Brandi e Mello (1992), citam a possível falta de penetração, a falta de fusão e excesso de reforço do cordão de solda.

Figura 5 - Transferência globular



Fonte: Adaptado de Scotti e Ponomarev (2014)

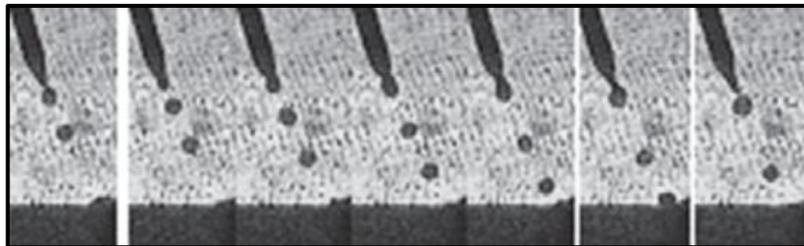
Como pode ser visto na Figura 5, a gota se forma na ponta do arame, atingindo um diâmetro maior que o do arame, por ação da gravidade a gota se desprende do arame e é transferida para a poça de fusão. Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2005) o aumento

da corrente tende a reduzir o diâmetro das gotas, mas, normalmente, serão maiores que o diâmetro do arame.

2.1.1.3 Spray

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2005) aumentando-se a corrente de soldagem acima de determinada faixa de valores, chamada corrente de transição, há a formação de pequenas gotas, menores que o diâmetro do arame, que são aceleradas para a poça de fusão através de forças eletromagnéticas, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Transferência Spray



Fonte: Adaptado de Scotti e Ponomarev (2014)

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992) o modo de transferência por spray é adequado para soldagem de chapas grossas, devido a quantidade elevada de calor necessária. Marques, Modenesi e Bracarense (2005) explicam que a soldagem fora da posição plana pode ser dificultada pelo tamanho da poça de fusão criada pelas altas correntes.

Conforme Scotti e Ponomarev os gases mais indicados para a transferência Spray são misturas de argônio (Ar) com teores de no máximo 5% de oxigênio (O₂) ou 20% de dióxido de carbono (CO₂). A corrente de transição varia conforme o diâmetro do arame, o material do arame e o gás de proteção utilizado. A Tabela 1 mostra alguns valores de corrente de transição para arame de aço carbono com variados gases de proteção e diâmetros de arame.

Segundo Machado (1996) a transferência por spray é caracterizada por altas taxas de deposição e maior penetração, comparando aos outros modos de transferência, devido as altas tensões e correntes características deste modo de transferência; explica ainda que há alteração na aparência e no ruído do arco. Conforme Scotti e Ponomarev (2014) as características principais da soldagem spray são a alta taxa de deposição, a elevada penetração, a boa aparência do cordão e a ausência de respingos.

Tabela 1 - Corrente de transição para arame de aço carbono de diversos diâmetros e variados gases de proteção

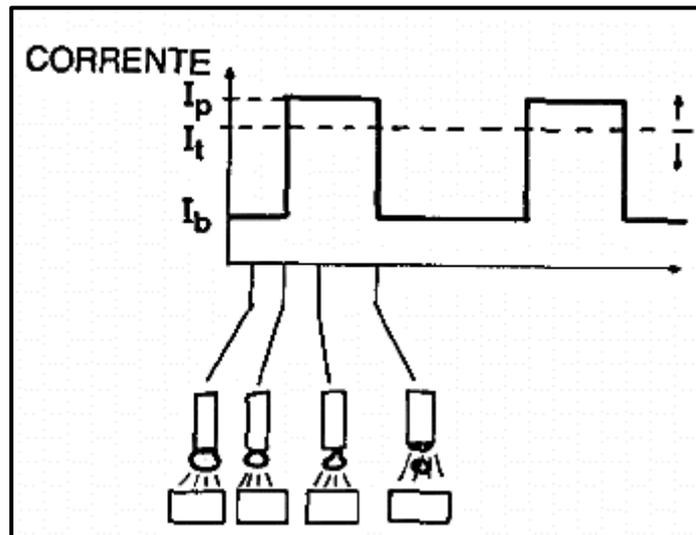
Material do arame-eletrodo	Atmosfera protetora	Diâmetro de arame-eletrodo [mm]	Corrente de transição [A]
Aço-carbono	98% Ar + 2%O ₂	0,6	130 - 135
		0,8	150 - 160
		0,9	160 - 170
		1,0	180 - 190
		1,1	210 - 230
		1,2	220 - 240
		1,6	260 - 280
	95% Ar + 5%CO ₂	0,8	135 - 145
		1,0	180 - 190
		1,2	230 - 250
		1,6	270 - 285
	92% Ar + 8%CO ₂	0,8	145 - 155
		1,0	190 - 200
		1,2	240 - 260
		1,6	280 - 295
	85% Ar + 15%CO ₂	0,8	150 - 160
		1,0	195 - 205
		1,2	250 - 270
		1,6	285 - 300
	80% Ar + 20%CO ₂	0,8	155 - 165
1,0		200 - 210	
1,2		265 - 280	
1,6		320 - 345	

Fonte: Adaptado de Scotti e Ponomarev (2014)

2.1.1.4 Arco pulsado

Para superar as limitações da transferência por spray; isto é; soldagem de chapas finas e soldagem fora da posição plana, foram criadas fontes eletrônicas de energia, que podem gerar uma transferência controlada, denominada pulsada. Conforme explicam Wainer, Brandi e Mello (1992), as fontes de arco pulsado produzem dois níveis de corrente, uma corrente baixa, denominada corrente de base (I_b), responsável pela sustentação do arco e formação da gota na ponta do arame; e uma corrente elevada, acima da corrente de transição (I_t), denominada corrente de pico (I_p), responsável pela transferência de uma gota por vez para a poça de fusão, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Transferência Arco Pulsado



Fonte: Adaptado de Wainer, Brandi e Mello (1992)

As vantagens deste tipo de transferência são a possibilidade de soldar em qualquer posição e com altas taxa de deposição, corrente média é menor do que aquela utilizada na transferência spray, elevada velocidade de soldagem, boa estabilidade do arco e ausência de respingos.

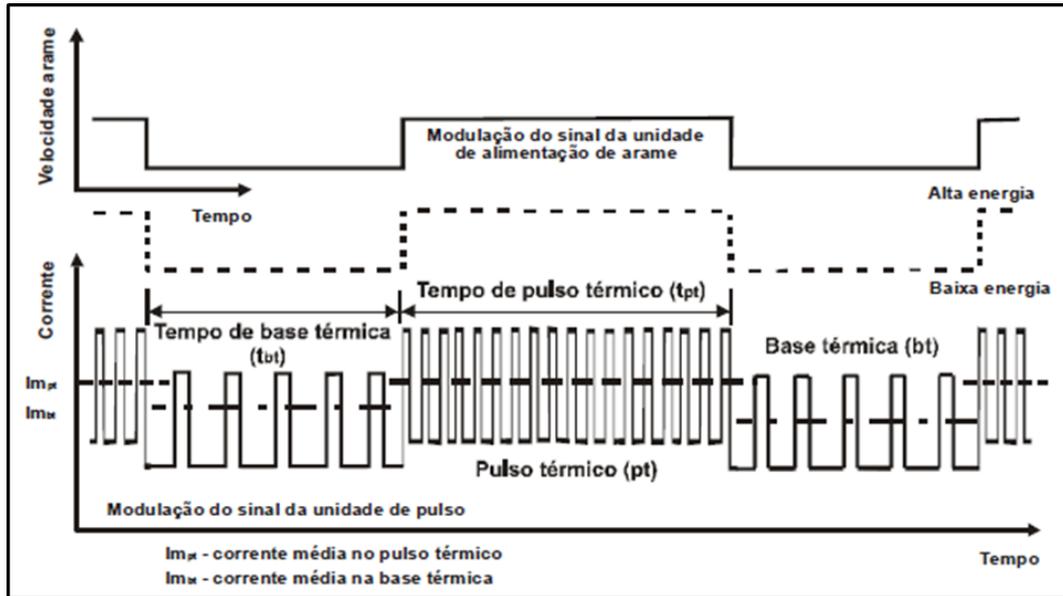
Segundo Chávez (2014) em comparação com método de transferência por spray, para correntes acima da corrente de transição, o método pulsado gera uma redução na corrente média e energia de soldagem; indica ainda que a frequência de quedas das gotas apresenta maior estabilidade no processo pulsado.

2.1.1.5 Outros processos de soldagem

Os modos de transferência já apresentados são de uso amplo na indústria e os estudos sobre seu uso são bastante amplos. Existe, entretanto, outros processos de soldagem, principalmente baseados no modo de arco pulsado, que procuram solucionar os problemas ou deficiências apresentadas pelos modos básicos de transferência.

Um deste processos é a pulsação térmica, também conhecido como duplo pulso. Segundo Barra (2003), seu funcionamento consiste na variação dos sinais de corrente média e velocidade de alimentação do arame em duas fases distintas. A primeira fase se distingue pelos altos valores de corrente média e velocidade de alimentação do arame, e é chamada de pulso térmico. A segunda fase, denominada base térmica, que é caracterizada por valores de corrente média e velocidades de alimentação do arame baixas, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Processo pulsação térmica



Fonte: Adaptado de Barra (2013)

Conforme resume Santos (2001), os principais efeitos da pulsação térmica são a boa penetração com baixo aporte térmico, o estreitamento da zona termicamente afetada (ZTA) devido à alta concentração do aquecimento, um melhor controle da temperatura e maior uniformidade na penetração da solda.

O processo de pulsação térmica é muito sensível a variações, Ziberov (2013) ressalta a importância do sincronismo entre os parâmetros de pulsação e o deslocamento da tocha para manter uma qualidade adequada do cordão de solda.

Outro processo inovador é o processo de soldagem frio, conhecido pela sua sigla em língua inglesa como CMT (Cold Metal Transfer). Este processo é baseado na transferência por curto circuito, mas com baixo aporte térmico. O ciclo do processo é dividido em três fases. A primeira fase é de corrente de pico, onde uma tensão de arco constante junto a um alto pulso de corrente, causa a abertura do arco e aquece o eletrodo para formar uma gota. A segunda é a fase de corrente de fundo, onde a corrente é reduzida para evitar a transferência globular da gota formada na ponta do arame, essa fase continua até que o arame atinja a poça de fusão e ocorra o curto-circuito. A terceira fase é a de curto circuito, nela a tensão do arco é levada a zero e ao mesmo tempo, o arame retorna. Esta fase auxilia no desprendimento da gota e sua transferência para a poça de fusão. As principais vantagens são a redução da deformação, arco voltaico estável, ausência de respingos e a possibilidade de união de chapas finas.

Segundo Selvi, Rajasekar e Rajasekar (2018) as principais características deste processo são o baixo aporte térmico devido à baixa corrente necessária para o curto circuito e

a ocorrência de curto-circuito de uma maneira estável e controlada, citam ainda que o retorno do arame é de fundamental importância para a prevenção de respingos e auxilia na melhora do aspecto visual do cordão.

2.1.2 Gases de Proteção

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005) os gases de proteção têm como principal finalidade a proteção do metal de solda fundido do contato com atmosfera, evitando a formação de óxidos e nitretos, responsáveis por defeitos como escória retida, porosidade e fragilização.

Os gases de proteção podem ser inertes ou ativos ou mesmo uma mistura, e têm efeito nos modos de transferência do metal, nas propriedades mecânicas da junta soldada, na geometria e aparência do cordão e na estabilidade do arco.

Conforme Fontes (2005) os principais gases de proteção são argônio (Ar), hélio (He), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂). Marques, Modenesi e Bracarense (2005) citam que misturas de gases inertes e ativos permitem melhores condições de soldagem A Tabela 2 mostra a aplicação dos gases e misturas mais usados na soldagem.

Conforme afirmam Wainer, Brandi e Mello (1992), a adição de gases ativos, como o CO₂ e/ou oxigênio, auxilia na estabilização do arco e na diminuição da ocorrência de respingos e mordeduras, aumenta a penetração e altera a secção transversal do cordão.

Wainer, Brandi e Mello (1992) citam que o gás CO₂ é utilizado principalmente para soldagem de aço carbono e de baixa liga, devido ao seu baixo custo e características de grande penetração de junta e altas velocidades de soldagem. Possui como desvantagens o excesso de respingos. O modo de transferência de curto-circuito é característico do gás CO₂ puro. A adição de Argônio ao CO₂ melhora a aparência do cordão e diminui a quantidade de respingos.

Segundo Machado (1996) para a soldagem de aço carbono ou baixa liga, e indicado o uso de misturas de argônio e teores de 2% a 5 % de oxigênio (O₂) e 5% a 10% de CO₂.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005) o calor gerado no arco elétrico é maior nos gases Hélio (He) e CO₂ do que no argônio, devido a condutividade térmica ser maior nos dois primeiros.

Conforme Machado (1996) a adição de até 9% O₂ ao argônio causa aumento da penetração, entretanto a taxa de fusão reduz 10% com a posterior adição de 5% de O₂.

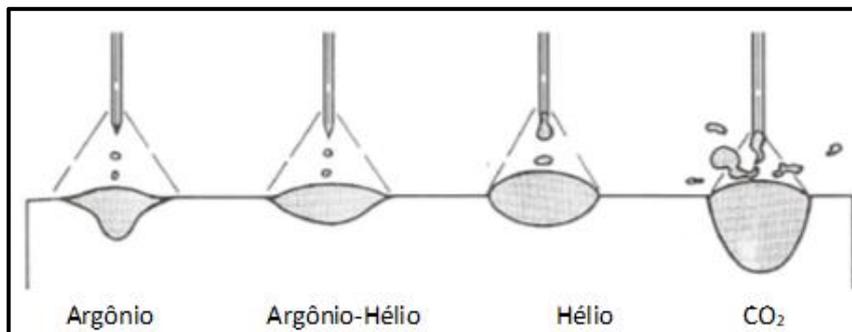
Tabela 2 - Gases e misturas usados na soldagem

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Quase todos os metais, exceto aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas. Alta penetração
Ar + He (20-50%)	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
Nitrogênio	-	Cobre, maior energia de soldagem
Ar + 20-30% N ₂	-	Idem N ₂ , mas melhor que 100% N ₂
Ar + 1-2% O ₂	Ligeiramente oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + 3-5% O ₂	Oxidante	Aço carbono e alguns aços de baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aço carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + 20-50% CO ₂	Oxidante	Aços (transferência por curto-circuito)
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Aços

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

A Figura 9 ilustra os efeitos de diferentes gases de proteção na secção transversal do cordão de solda.

Figura 9 - Efeito do gás de proteção no formato do cordão



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

2.2 FATORES TÉRMICOS DA SOLDAGEM

Processos de soldagem por fusão, como o GMAW, utilizam fontes de calor concentradas e a altas temperaturas, gerando variações de temperatura de até 10³ °C/s tendo

influência na microestrutura e propriedades do material da junta (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2005).

Os fatores de maior influência na transferência de calor são a energia de soldagem, o ciclo térmico, o tempo de permanência acima da temperatura crítica e a velocidade de resfriamento (WAINER, BRANDI, & MELLO, 1992).

2.2.1 Energia de soldagem

Marques, Modenesi e Bracarense definem a energia de soldagem, também chamado aporte térmico, como “[...] a quantidade de energia fornecida à junta por unidade de comprimento da mesma”. De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), parte da energia gerado pelo arco elétrico é dissipada através radiação do calor e convecção dos gases de proteção, sendo necessário considerar uma eficiência térmica no processo de soldagem para expressar a quantidade de energia efetivamente utilizada na soldagem. A energia de soldagem é característica de cada processo de soldagem e é expressa conforme Equação 1 (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2005).

$$H = \eta \cdot \frac{V \times I}{v} \quad (1)$$

onde: H é a energia de soldagem (J/mm);
 η é a eficiência térmica do processo;
 V é a tensão (V);
 I é a corrente de soldagem (A);
 v é a velocidade de soldagem (mm/s).

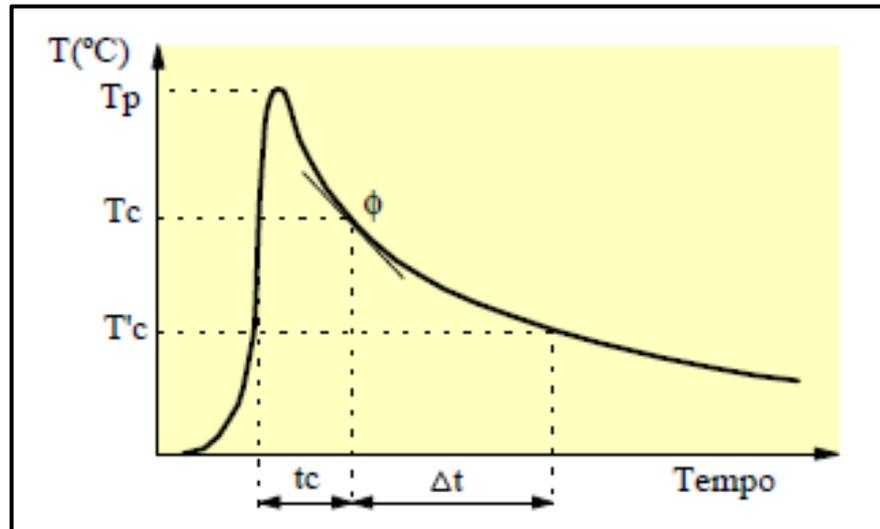
Segundo Machado (1996) a eficiência térmica do processo GMAW varia de 65% a 85%.

2.2.2 Ciclo térmico de soldagem

O calor da soldagem e a sua dissipação, devido principalmente à condução, provocam variações de temperatura, em função do tempo, para cada ponto da junta soldada. A Figura 10 mostra a variação da temperatura para um determinado ponto da região soldada em função do tempo, onde as variáveis apresentadas são descritas como: T_p é a temperatura máxima atingida ou

temperatura de pico, t_c é o tempo de permanência acima de determinada temperatura crítica T_c na qual podem ocorrer alterações microestruturais, ϕ é a velocidade de resfriamento e Δt é o tempo de resfriamento entre duas temperaturas T_1 e T_2 .

Figura 10 - Ciclo térmico de soldagem



Fonte: Modenesi (2003)

O conhecimento do ciclo térmico, da temperatura de pico e sua variação com o tempo, são de suma importância para a predição das transformações metalúrgicas que ocorre nas juntas soldadas. Conforme Modenesi (2003, p. 16), “A temperatura de pico indica a possibilidade de ocorrência de transformações microestruturais [...]”.

Segundo (AWS, 1976) a velocidade de resfriamento tem efeito significativo nas propriedades e na estrutura metalúrgica do metal base, e pode ser encontrada através da determinação da taxa de resfriamento na linha central da solda no instante em que o metal está passando por uma determinada temperatura de interesse;

Conforme (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2005), as espessuras de junta maiores facilitam a dissipação do calor, portanto, quanto maior a espessura da junta menor será o tempo necessário para o resfriamento, até uma espessura limite.

2.2.3 Zona termicamente afetada

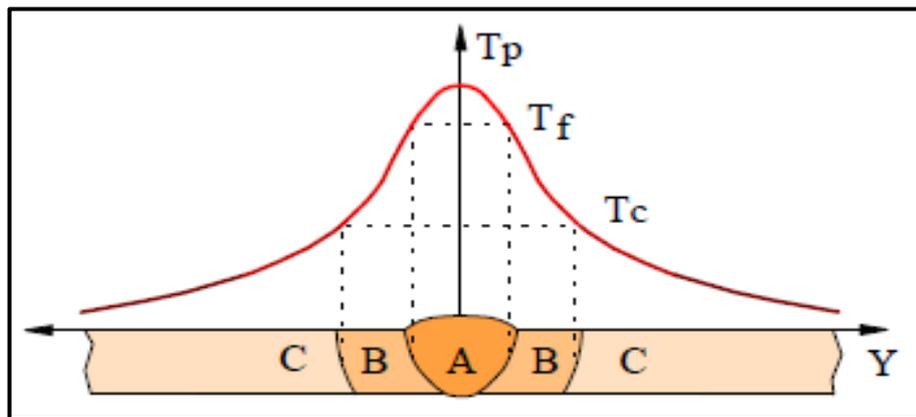
Conforme descreve Modenesi (2003), a variação da temperatura de pico com a distância ao centro de soldagem é conhecida como curva de repartição térmica, como pode ser

visto na Figura 11, a zona fundida está representada pela letra A, a zona termicamente afetada está representada pela letra B e o metal base está representado pela letra C.

A curva de repartição térmica pode ser dividida em três regiões:

- a) zona Fundida (ZF): Região onde houve a fusão e a solidificação durante a soldagem. Neste ponto as temperaturas de pico excederam as temperaturas de fusão do material;
- b) zona termicamente afetada (ZTA): Região onde houve alteração das propriedades e/ou microestrutura devido ao ciclo térmico. As temperaturas de pico foram inferiores a temperatura de fusão, mas superiores a temperatura crítica.
- c) metal de base (MB): Região não alterada pelo ciclo térmico de soldagem. Temperatura de pico inferiores a temperatura crítica.

Figura 11 - Curva de repartição térmica



Fonte: Modenesi (2003)

2.3 TENSÕES RESIDUAIS E DEFORMAÇÕES

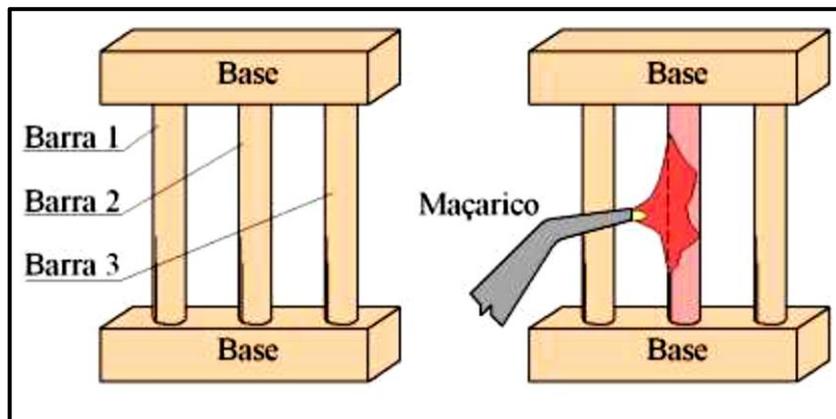
As altas cargas de energia decorrentes do aquecimento localizado promovido pela soldagem provocam, além das alterações metalúrgicas já vistas, tensões residuais e deformações, que devem ser consideradas e corrigidas e/ou minimizadas durante a fase de projeto do produto ou processo das peças soldadas.

Conforme explicam Marques, Modenesi e Bracarense (2005), as distorções são alterações permanentes na geometria da peça soldada, causada pelo surgimento de deformações elásticas e plásticas; tais deformações são oriundas da dificuldade de dilatação que as regiões soldadas possuem devido ao seu entorno estar submetido a temperatura menores; isto é; a

temperatura não é uniforme ao longo da peça. As tensões residuais permanecem mesmo após serem removidas quaisquer solicitações externas que possam estar sendo exercidas.

Segundo Kou (2002) as tensões residuais podem ser explicadas considerando o aquecimento e o resfriamento de barras sob restrição. A Figura 12 mostra três barras de metal, inicialmente à temperatura ambiente, conectadas a dois blocos rígidos. A barra central é aquecida, mas sua expansão térmica é restringida pelas barras laterais.

Figura 12 - Analogia barra aquecida



Fonte: Adaptado de Modenesi, Marques e Santos (2012)

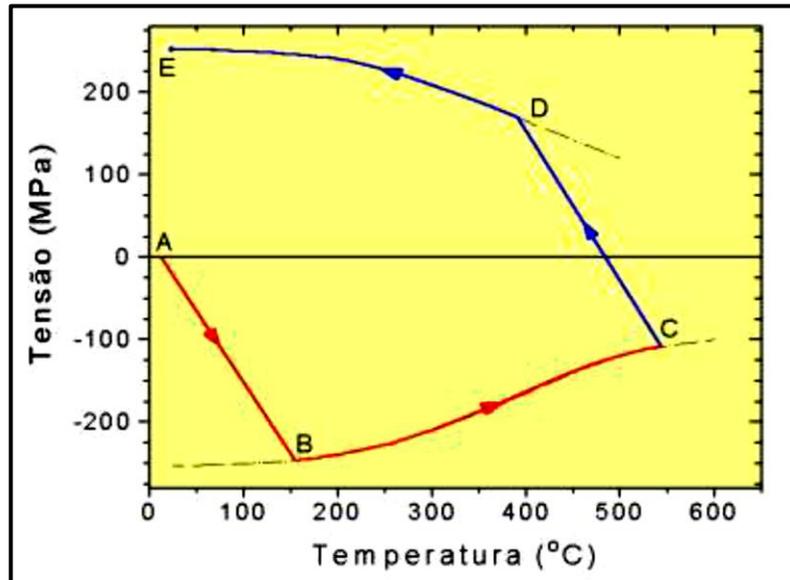
Desta forma tensões de compressão são geradas na barra central, e elas aumentam com o aumento da temperatura até o limite de elasticidade na compressão. Quando o aquecimento cessa e a barra central é resfriada, sua contração térmica é contida pelas barras laterais. Com isso as tensões de compressão na barra central caem rapidamente, mudam para tensões de tração e aumentam com a diminuição da temperatura até que a tensão de escoamento em tensão seja alcançada.

Ao final uma tensão de tração residual igual à tensão de escoamento à temperatura ambiente é criada na barra central quando ela esfria até a temperatura ambiente. As tensões residuais nas barras laterais são tensões de compressão com valor igual a metade da tensão de tração na barra central.

A Figura 13 mostra as tensões internas em função da temperatura, assim, o ponto A representa o estado inicial, onde a barra central está na temperatura ambiente. Com o aumento da temperatura observa-se o crescimento das tensões de compressão na barra central, até que seja atingido o limite de escoamento em compressão, ponto B. Continuando o aquecimento, surgem deformações plásticas em deformação, ocasionando redução de comprimento e aumento de seção transversal, até que seja cessado o aquecimento, ponto C. Com o início do resfriamento, a barra central inicia o processo de contração, reduzindo assim a tensão de

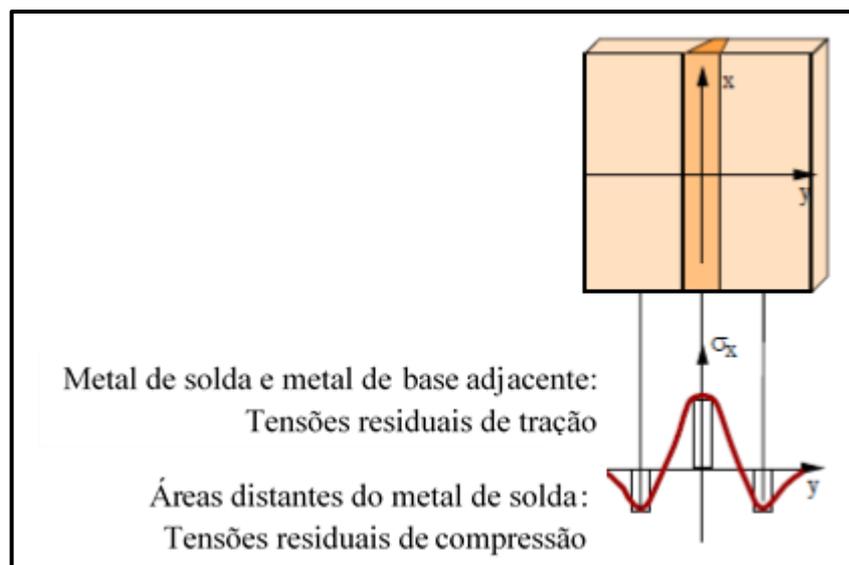
compressão, até que a uma temperatura acima da temperatura inicial ela é anulada. Continuando-se o resfriamento a barra central começa a sofrer esforços de tração até o limite de escoamento em tração ser atingido, ponto D. A partir desta temperatura, a barra central passa a deformar plasticamente até atingir a temperatura ambiente.

Figura 13 - Tensões internas em função da temperatura



Fonte: Modenesi, Marques, Santos (2012)

Figura 14 - Tensões residuais na soldagem



Fonte: Adaptado de Modenesi, Marques, Santos (2012)

O comportamento de uma chapa soldada é análogo as tensões verificadas no exemplo da barra aquecida, onde após o resfriamento à temperatura ambiente, existem tensões residuais

de tração no metal de solda e no metal de base adjacente, enquanto as tensões de compressão residuais existem nas áreas mais distantes do metal de solda, como pode ser visto na Figura 14.

Conforme FBTS (2016), o preaquecimento a temperaturas inferiores a 150°C, para aços carbono, não produzem nenhum efeito de redução de tensões residuais, mas tende a aumentar as deformações. A redução das deformações é possível através da utilização de métodos de soldagem de mais baixa energia, como a transferência pulsada.

2.3.1 Tipos de distorções na soldagem

Segundo Modenesi, Marques e Santos (2012) existem três tipos básicos de distorções que podem ocorrer em juntas simples.

- a) contração transversal;
- b) contração longitudinal;
- c) distorção angular.

A contração transversal trata-se de uma redução de dimensão perpendicular ao eixo do cordão de solda. Como indica AWS (1976) a contração transversal de soldas de topo de aço carbono ou de baixa liga depende de vários fatores como, por exemplo, o grau de restrição da junta, a quantidade de rotação da junta durante a soldagem e o número de passes usados. Um maior número de passes causa maiores contração transversal e distorção angular.

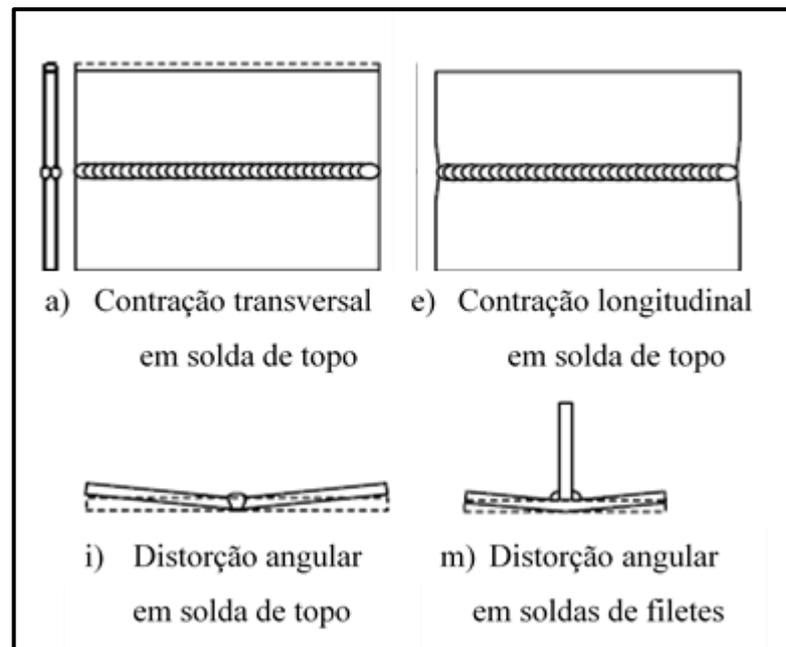
Segundo FBTS (2016), a contração transversal é reduzida com o aumento do grau de restrições durante a soldagem e resfriamento, é aumentada com a extensão da curva de repartição térmica e diminui com o martelamento da solda.

A contração longitudinal é entendida como a redução do comprimento do cordão de solda; isto é; a relação entre a seção transversal da zona fundida e a seção restante da peça. A Figura 15 mostra os tipos básicos de deformações evidenciando as estruturas antes e após a soldagem.

Conforme indica Modenesi (2003) apesar da contração longitudinal ser menor que a contração transversal, pode haver o dobramento de peças soldadas fora da linha neutra e distorções de soldagem em chapas finas.

A distorção angular ocorre quando a contração transversal não é uniforme ao longo da linha neutra da peça, podendo ocorrer tanto em soldas de topo como em soldas de filete (MODENESI P. J., 2003). A distorção angular aumenta com a espessura da peça devido ao aumento da quantidade do metal de solda e, portanto, aumentando o encolhimento da solidificação e a contração térmica. (KOU, 2002).

Figura 15 - Tipos básicos de deformações



Fonte: Adaptado de AWS (1976)

2.3.2 Prevenção e controle da deformação

Conforme indicam Marques, Modenesi e Bracarense (2005), diferentes medidas podem ser adotadas para a prevenção e controle das distorções, tais medidas podem ser adotadas tanto na fase de projeto, na fase de fabricação e após a soldagem. A seguir serão adotadas as principais.

No projeto de estruturas soldadas:

- 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.

Na fabricação:

- estimar a distorção que ocorrerá na estrutura e posicionar as peças de forma a compensar esta distorção;

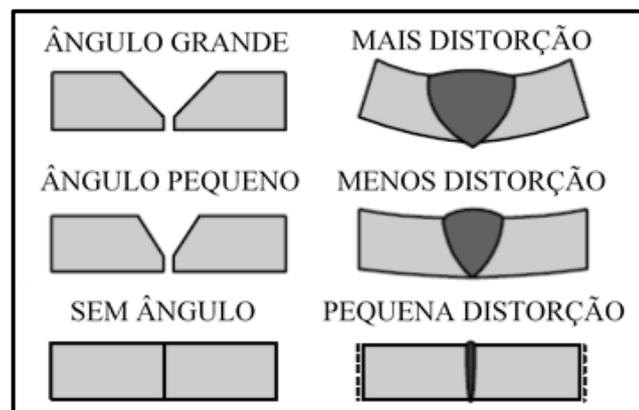
- b) colocar peças na sua posição correta, ou próximo desta, e utilizar dispositivos de fixação ou outras técnicas para aumento da restrição das peças ao movimento (ponteamto antes da soldagem, dispositivos etc.);
- c) usar sequências de deposição de cordões de solda e de montagem que minimizem a distorção;
- d) usar técnicas ativas de controle da distorção.

Correção da distorção após a soldagem:

- a) aquecimento localizado;
- b) aquecimento uniforme e pressão mecânica;
- c) calandragem;
- d) prensagem;
- e) martelamento.

Como as tensões residuais e as distorções são causadas pelo efeito térmico da soldagem, a redução da quantidade de solda, normalmente, resulta na redução delas. Como afirma Kou (2002), a redução do chanfro de solda e, conseqüentemente, do volume de solda pode reduzir a distorção angular e a contração lateral. A Figura 16 mostra a relação entre o ângulo do chanfro da solda e a distorção angular provocada.

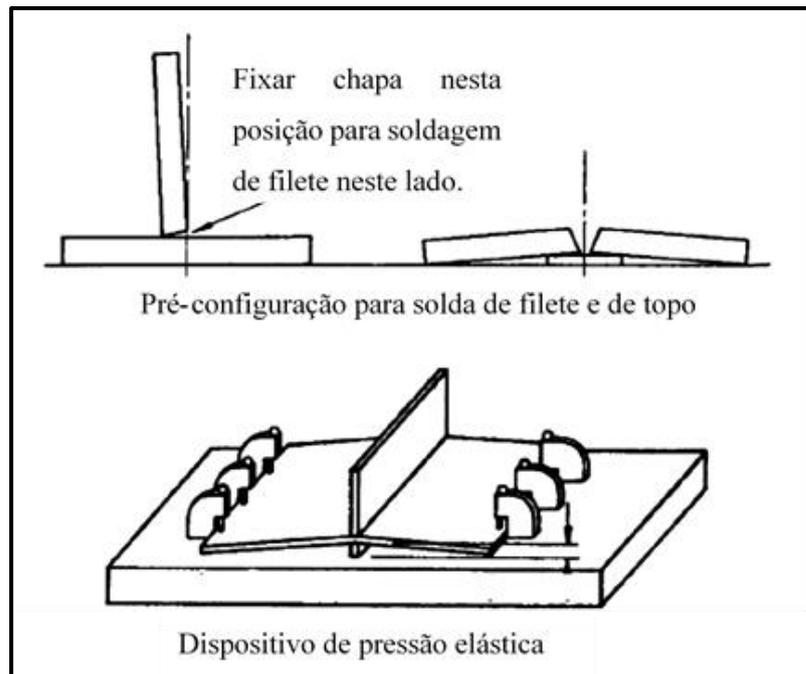
Figura 16 - Redução da distorção angular



Fonte: Adaptado de Kou (2002)

Estimar a distorção que ocorrerá durante a soldagem e colocar peças em posições pré-configuradas para compensá-la, ou ainda, utilizar de dispositivos de pressão elástica para reduzir as mudanças angulares após a remoção da restrição, são métodos eficazes para minimizar os efeitos térmicos da soldagem (AWS, 1976). A Figura 17 mostra os métodos de prevenção de distorções com auxílio de dispositivos.

Figura 17 - Métodos de redução de distorções



Fonte: Adaptado de AWS (1976)

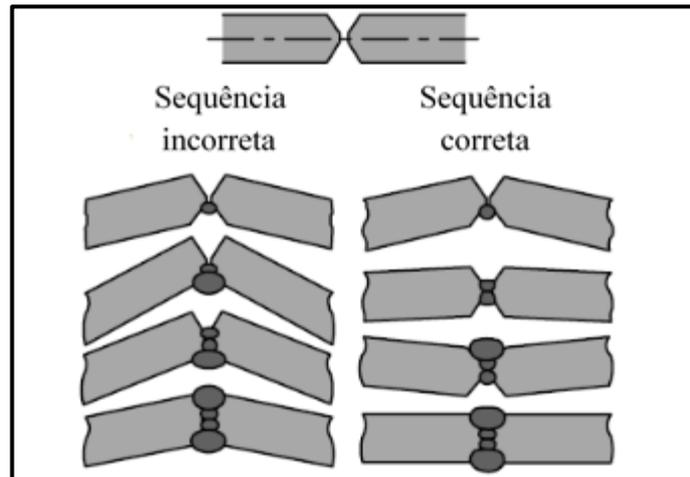
Outras formas de prevenção e controle passam pelo adequado planejamento e gerenciamento térmico, através da utilização de métodos e/ou processos que reduzam o aporte térmico ao mínimo necessário. A utilização de fontes de energia modernas, que permitam a utilização de modos de transferência pulsada torna-se fundamental para reduzir o aporte térmico e consequentemente as distorções, embora exija um custo inicial maior para aquisição do equipamento e demande, portanto, uma alta produção para tornar-se viável economicamente.

O planejamento da sequência de soldagem, através da deposição de material de forma alternada em diferentes pontos da peça a ser soldada, produz bons resultados na redução de distorções. A Figura 18 mostra o efeito que a sequência correta de soldagem pode provocar na geometria da peça soldada.

Conforme indica Soares (2006) a correta sequência de soldagem pode gerar restrições que garantirão a redução das contrações causadas pelas tensões térmicas. Park e An (2015) ressaltam que componentes de menores dimensões são mais afetados pela sequência, gerando maiores ou menores distorções dependendo da posição e sequência em que são soldados em um conjunto.

Rupani e Barai (2016) ao realizarem estudos sobre os efeitos da sequência de soldagem nas distorções, pelo processo TIG em tubulações em aço inoxidável, concluem que as distorções que causam alteração de diâmetro e a ovalização do tubo, podem ser minimizadas com o aumento do número de segmentos soldados.

Figura 18 - Influência da sequência de soldagem



Fonte: Adaptado de Kou (2002)

Pazooki, Hermans e Richardson (2016) concluem em seu experimento de soldagem com aquecimento adicional por chama, que quanto mais próximos a chama está da linha do centro da solda, maior a deformação resultante. Além disso, indicam que houve influência da posição da chama de aquecimento sobre a distorção gerada. Salientam ainda que a temperatura ideal para soldagem com aquecimento adicional depende de diversos fatores, como o processo de soldagem, a posição dos queimadores, as propriedades térmicas e mecânicas do material, o sistema de fixação, a área aquecida pelos queimadores e a geometria da placa. Pazooki (2014), destaca que a distorção de chapas soldadas de topo pode ser reduzida consideravelmente com a aplicação de aquecimento adicional lateral durante a soldagem.

Coules et al. (2011) utilizam a técnica de laminação pré-solda, onde rolos comprimem a região a ser soldada, com forças variando de 55 kN a 200 kN. Após a compressão foi realizada a soldagem de topo pelo processo GMAW. Os resultados indicam que a distorção pós-solda pode ser reduzida em média 38% aplicando forças de 200 kN. As medições foram obtidas através de braço articulado 3D ao qual foi acoplado um scanner laser.

Cozzolino et al. (2017) apresentam um método de laminação pós solda. Foram realizados dois experimentos, no primeiro foi realizada a laminação do topo do cordão de solda e segundo a laminação com dois rolos próximos ao cordão de solda. Foi demonstrado que a laminação no topo da solda é a que trás resultados mais satisfatórios na redução da distorção.

Njiraini, Maranga e Ikua (2014) ao realizarem um estudo comparativo de técnicas de soldagem entre os métodos de soldagem manual convencional, soldagem com passa a ré e soldagem de mais de um cordão, com tempo de resfriamento entre cada cordão variando de 10

a 60 minutos, verificaram que a técnica soldagem com passe a ré produz menores distorções comparados com os outros dois métodos descritos, sendo recomendada para juntas simples.

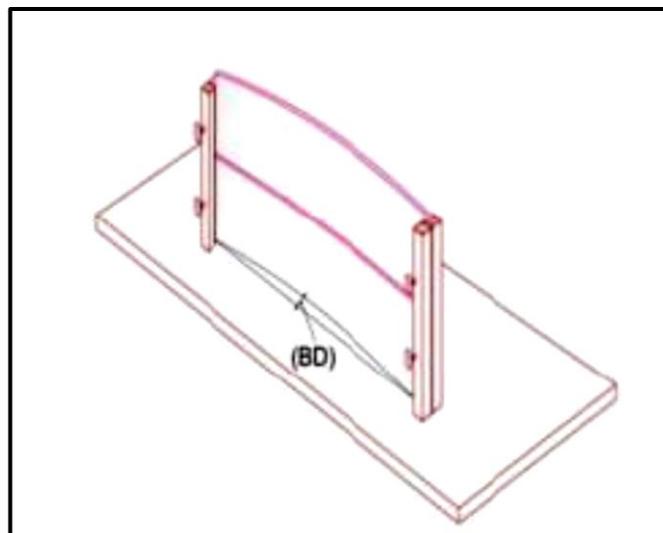
A energia de soldagem é um dos fatores de maior influência nas distorções da soldagem, diversos métodos têm sido criados para seu cálculo. Atualmente, com a melhoria dos softwares de análise de elementos finitos, tem-se estudado diversos modelos de análise e cálculo da energia de soldagem e, conseqüentemente, das distorções sofridas pelas peças soldadas, reduzindo o tempo para determinação das distorções e melhorando a confiabilidade dos resultados encontrados. Farajpour e Ranjbarnodeh (2018) indicam que a análise térmica através de elementos finitos, apresenta apenas 11% de erro em comparação com dados experimentais; concluem ainda que o tempo de análise pode ser reduzido em 70% com a utilização do método de deformação inerente.

2.3.3 Métodos de medição da deformação

Os instrumentos usados para medir as dimensões ou a forma de uma estrutura pode ser classificada como contato ou sem contato, por ponto ou por campo inteiro.

Conforme indica Venkatesan e Murugan (2014) o método do traçador de perfil consiste em traçar o perfil da placa em uma folha de papel. A medição das distorções de solda é feita medindo as linhas desenhadas na folha de papel. O traçador de perfil pode ser usado para medir a distorção de flexão. A Figura 19 mostra um diagrama esquemático de um traçador de perfil que mede a distorção de flexão.

Figura 19 - Diagrama esquemático traçador de perfil



Fonte: Venkatesan e Murugan (2014)

Ainda segundo Venkatesan e Murugan (2014) distorções angulares podem ser medidas através de goniômetros, que é composto por uma base com escala, podendo ser analógico ou digital, e uma régua móvel. A Figura 20 mostra um goniômetro e seus componentes.

Figura 20 - Goniômetro



Fonte: Venkatesan e Murugan (2014)

Njiraini, Ikua e Maranga (2012) utilizam em seu estudo um traçador de altura para realizar as medições das distorções de flexão.

Podem ser usados mecanismos de medição mais avançados, como sistemas de medição por coordenadas, que permitem a medição de características geométricas das peças. Esses dispositivos são compostos de uma estrutura com uma sonda que se move em duas ou três dimensões. Dependendo do tipo de sonda, o sistema de medição pode ser definido como varredura de contato ou varredura sem contato. Na varredura por contato, a sonda é mecânica enquanto na varredura sem contato, a sonda pode ser óptica, laser ou luz branca. A Figura 21 mostra um sistema de medição por coordenadas tridimensional de varredura por contato.

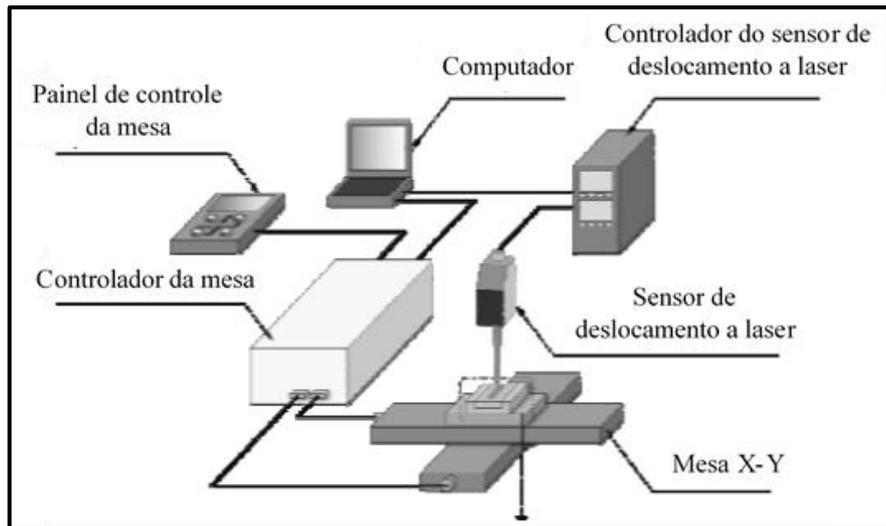
Figura 21 - Máquina de medição por coordenadas



Fonte: O autor (2019)

A varredura a laser consiste no uso de sensores que emitem feixes, que são refletidos no objeto e coletados pelos sensores. As informações são enviadas para um computador para obter os valores das distorções, como pode ser visto na Figura 22. Este método pode ser usado para medir os deslocamentos durante o processo de soldagem. É usado para medir distorções angulares, de flexão e de flambagem.

Figura 22 - Diagrama esquemático de sistema de varredura a laser



Fonte: Adaptado de Matsuoka, Okamoto e Okada (2013)

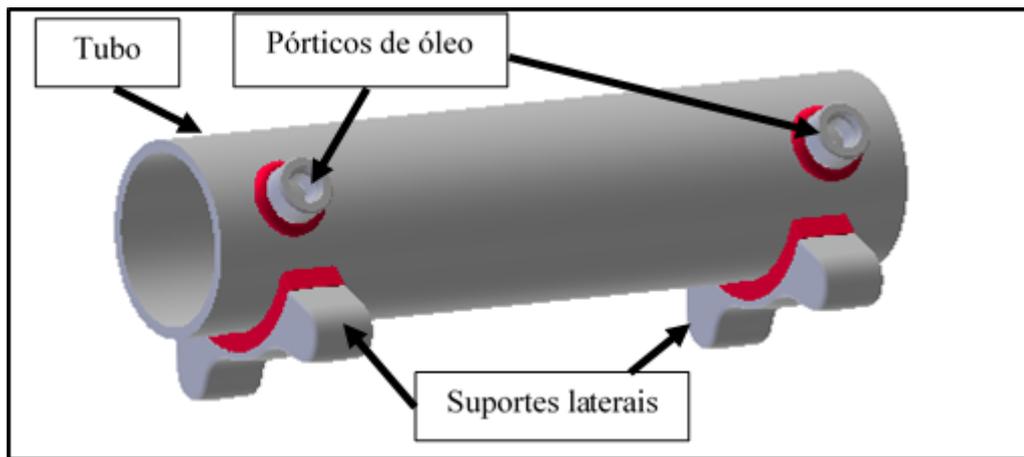
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão detalhados os materiais empregados nos corpos de prova submetidos ao processo de soldagem. Também, são descritas as metodologias de análise e os procedimentos e processos adotados, bem como a metodologia de medição das amostras e os ensaios metalográficos.

3.1 MATERIAIS

A peça soldada é composta de 5 componentes, um tubo, dois pórticos de óleo e dois suportes laterais. A Figura 23 mostra os componentes soldados, evidenciando os cordões de solda em vermelho.

Figura 23 - Corpo de prova



Fonte: O autor (2019)

A matéria prima utilizada para os corpos o tubo é o E355 + SR com costura, com diâmetros externo e interno de, respectivamente, 82 mm e 71,5 mm, ou seja, espessura de 5,25. Segundo a norma técnica DIN EN 10305-2 a matéria prima do tubo possui limite de escoamento igual ou superior a 435 MPa.

Conforme indica a norma DIN EN 10305-2, o tubo mecânico trefilado a frio chamado de +SR, recebe após o último passe de trefila um tratamento térmico de alívio de tensões em atmosfera controlada. Este tratamento é executado com a finalidade de obter uma microestrutura mais refinada e melhorar a usinabilidade, permitindo a obtenção de propriedades mecânicas adequadas a fabricação de cilindros hidráulicos.

Os pórticos de óleo são obtidos através da matéria prima SAE 1020 trefilado, possuem diâmetro externo de 25 mm e internamente possuem rosca passante M14 passo 1.5 mm com classe de tolerância 6G. Segundo a norma SAE J1397, este material possui limite de escoamento igual ou superior a 350 MPa.

A rosca interna dos pórticos de óleo serve para conexão das mangueiras hidráulicas, e, portanto, deve possuir a menor deformação possível, a fim de não comprometer a montabilidade do cilindro pelo cliente.

Os suportes laterais são obtidos através do processo de forjamento da matéria prima ST52, possuem uma espessura de 28 mm e um cálice de solda incorporado nas laterais de maior dimensão. Conforme especificado a desenho, os suportes devem ter, após o processo de forjamento, um limite de escoamento de 355 MPa e dureza variando de 146 a 187 HB.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos componentes

COMPONENTE	MATERIAL	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO (MPa)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	ALONGAMENTO (%)
TUBO	E355 + SR	590	435	10
PÓRTICO DE ÓLEO	SAE 1020	420	350	15
SUPORTE LATERAL	ST52.3 DIN 17100	490	315	14
ARAME DE SOLDA	AWS 5.18 ER70S-6	480	400	22

Fonte: O autor (2019)

Tabela 4 - Composição química dos componentes

COMPONENTE	MATERIAL	C	Mn	Si	S	P
TUBO	E355 + SR	0,22	1,6	0,55	0,025	0,025
PÓRTICO DE ÓLEO	SAE 1020	0,2	0,45	0,2	0,05	0,03
SUPORTE LATERAL	ST52	0,20 - 0,22	1,6	0,55	0,04	0,04
ARAME DE SOLDA	AWS 5.18 ER70S-6	0,6 - 0,15	1.40-1.85	0.80-1.15	< 0.035	< 0.025

Fonte: O autor (2019)

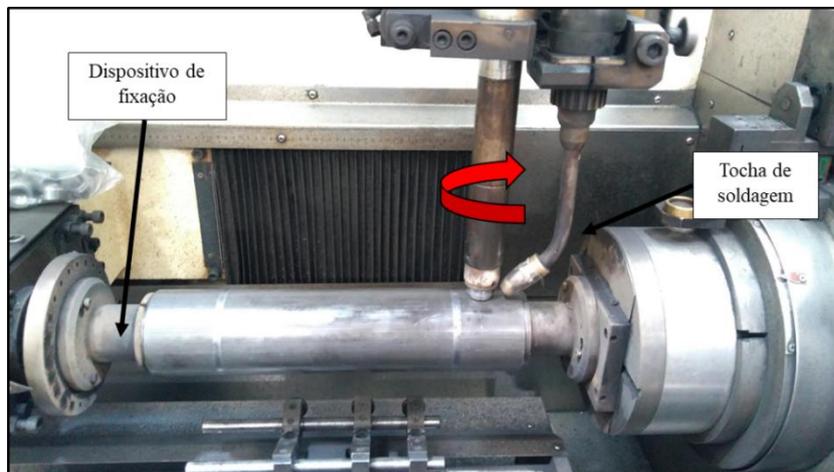
A soldagem foi realizada com material de adição arame de solda sólido LINCOLN ELETRIC AWS A5.18 ER70S-6, com diâmetro de 1 mm com mistura de 85% Argônio (Ar) + 15% gás carbônico (CO₂). Conforme norma AWS, o material de adição possui limite de escoamento mínimo de 400 MPa. A tabela 3 e 4 indicam, respectivamente, as propriedades mecânicas e a composição química dos materiais utilizados.

3.2 MÁQUINAS E SEQUÊNCIA PARA SOLDAGEM

A execução das soldagens foi realizada nas dependências da empresa Ognibene, utilizando duas máquinas de soldagem, uma automatizada e outra robotizada, ambas possuindo fonte de soldagem FRONIUS TPS 4000.

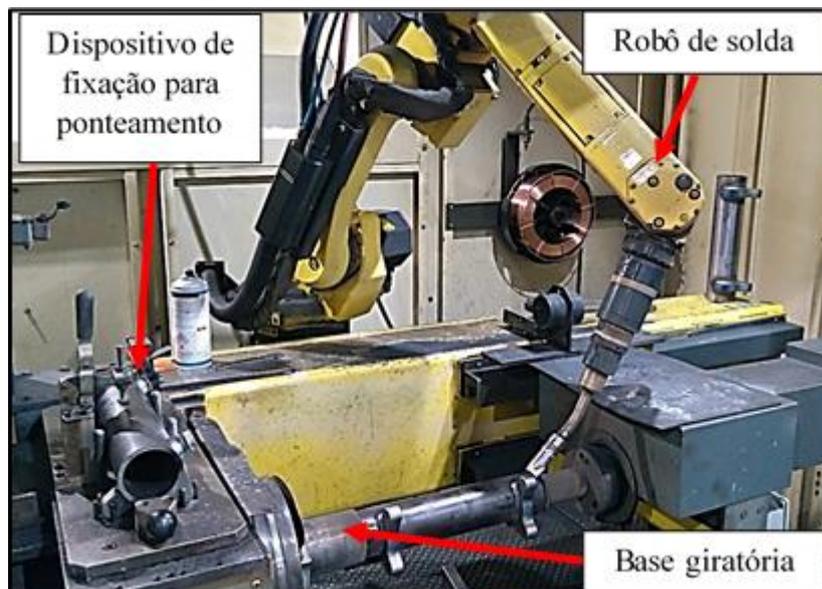
O ciclo de soldagem atual consiste na soldagem de ambos pórticos de óleo ao tubo, realizado na máquina automatizada SITEC SM2M-CAB, na qual a peça está fixa enquanto a tocha realizada um movimento giratório para a execução da soldagem. A Figura 24, mostra o movimento realizado pela tocha durante a execução da soldagem dos pórticos de óleo.

Figura 24 - Movimento da tocha durante soldagem



Fonte: o autor (2019)

Figura 25 - Componentes da máquina RWC1200



Fonte: o autor (2019)

Após a soldagem dos pórticos de óleo, foi executada na máquina robotizada Tecnorobot RWC1200, o ponteamento e posterior soldagem dos suportes laterais. A soldagem de cada um dos suportes se dá através de 4 cordões de solda. Como pode ser visto na Figura 25, a máquina Tecnorobot RWC1200 é composta por um dispositivo de ponteamento adaptado para as dimensões da peça a ser soldada, um robô de soldagem Fanuc Arcmate 50IB3L e uma base giratória, que possibilita girar a peça mantendo a tocha de soldagem fixa na vertical.

3.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

A análise consistiu em um comparativo entre o estado atual do processo e um estado futuro, no qual as deformações foram controladas e/ou atenuadas através dos métodos abaixo indicados.

- a) Alteração dos parâmetros de soldagem, reduzindo o aporte térmico;
- b) Alteração da sequência e parâmetros de soldagem;
- c) Alteração da sequência de soldagem dos suportes, reduzindo o aporte térmico;
- d) Aquecimento localizado, mantendo parâmetros atuais;
- e) Alteração da sequência de soldagem e aquecimento localizado, mantendo parâmetros atuais.

A Tabela 5 mostra a quantidade de amostras analisada para cada metodologia.

Tabela 5 - Metodologia e quantidade de amostras

Metodologia de análise	Total de amostras	Peças para análise dimensional	Peças para análise metalográfica
Processo atual	3	3	1
Redução do aporte térmico	3	3	1
Redução do aporte térmico e sequência modificada	3	3	1
Parâmetro atual e sequência modificada	3	3	1
Processo atual com pós aquecimento	3	3	1
Parâmetro atual e sequência modificada com pós aquecimento	3	3	1

As operações de soldagem dos pórticos não foram alteradas neste estudo, pois representam um ponto crítico na funcionalidade do cilindro hidráulico; isto é; não devem apresentar defeitos visuais, tais como porosidades e a penetração do cordão de solda deve ser ótima em todo o contorno, visto que deve proporcionar estanqueidade.

A soldagem dos suportes, por sua vez, representa o principal fator de deformações, devido a grande quantidade de cordões de solda depositado e conseqüentemente pela quantidade de calor gerado em um local específico da peça.

3.3.1 Metodologia de análise atual

A metodologia de análise atual foi realizada como comparativo entre o estado atual e estado futuro, podendo-se quantificar o ganho em termo de redução de deformações.

Os parâmetros de soldagem utilizados no trabalho estão indicados na Tabela 6, onde pode-se ver o parâmetro atual, denominado 1 e o parâmetro com aporte térmico reduzido, denominado 2. O parâmetro 2 foi estabelecido com base em experiências anteriores de soldagem de peças com características similares, desenvolvidas pela matriz italiana.

Tabela 6 - Parâmetros de processo

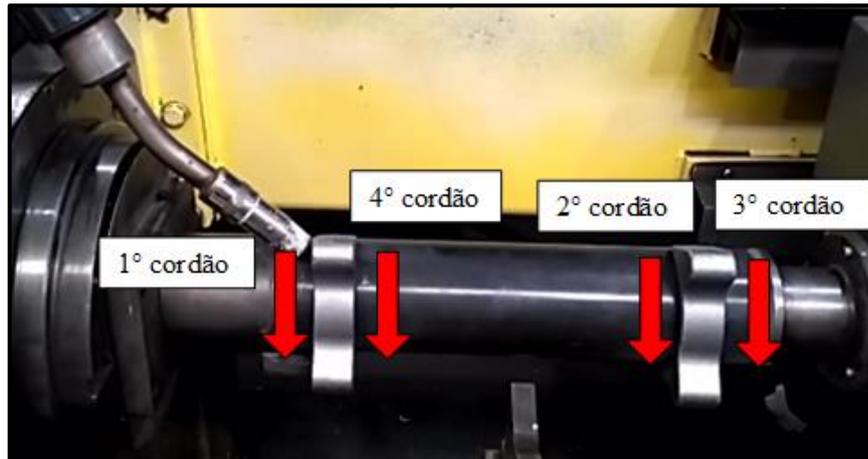
PARÂMETROS	1	2
Velocidade [cm/min]	65,00	72,00
Corrente [A]	220	185
Tensão [V]	24,7	23,5
Ap. Térmico [KJ/mm]	0,43	0,34

Fonte: O autor (2019)

O ciclo de soldagem utilizado para esta metodologia pode ser visto na Figura 26.

As peças soldadas com o processo atual foram identificadas como 1, 2 e 3. Este processo utilizou os parâmetros atuais de processo, identificado como parâmetro 1 na Tabela 6, obtendo-se um aporte térmico de 0,43 kJ/mm, considerando-se uma eficiência de processo de 85%.

Figura 26 – Ciclo de soldagem atual



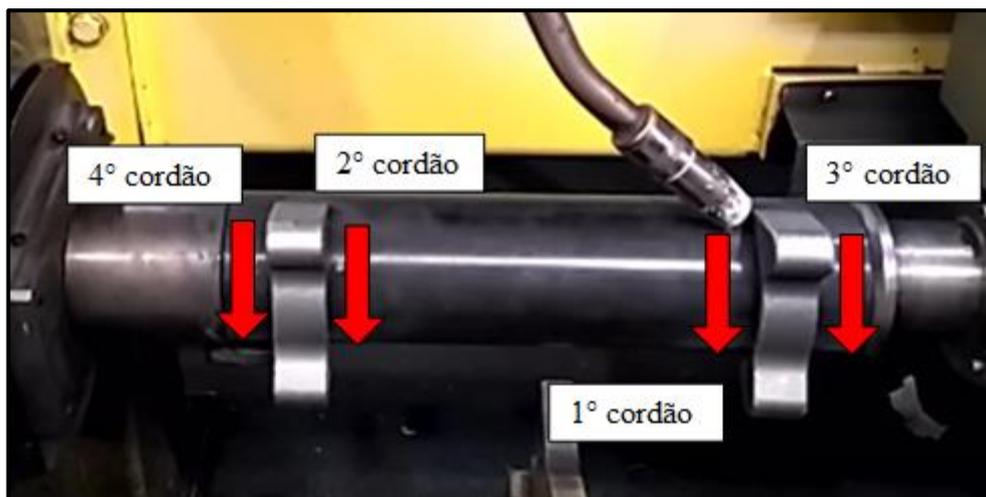
Fonte: O autor (2019)

3.3.2 Metodologia com redução do aporte térmico

Este método utilizou a sequência de soldagem atual, porém com parâmetros de soldagem novos, identificado como parâmetro 2 na Tabela 6. Tais parâmetros produziram um aporte térmico de 0,34 kJ/mm, considerando-se uma eficiência de processo de 85%. As peças soldadas com esta metodologia foram identificadas como 4, 5 e 6.

3.3.3 Metodologia com alteração da sequência de soldagem e redução do aporte térmico

Figura 27 – Novo ciclo de soldagem



Fonte: O autor (2019)

Para as peças identificadas como 8, 9 e 10 utilizou-se parâmetros de soldagem modificados, identificados como parâmetro 2 na Tabela 6. A sequência de soldagem foi alterada, conforme indicado na Figura 27. O objetivo foi reduzir a concentração de calor, realizando a soldagem alternadas dos cordões dos suportes.

3.3.4 Metodologia com alteração da sequência de soldagem

Optou-se nesta metodologia por empregar somente a alteração da sequência de soldagem, utilizando-se os parâmetros de soldagem atuais, buscando-se compreender o efeito da sequência de soldagem nas distorções da peça. As peças soldadas com esta metodologia foram identificadas como 12,13 e 14.

3.3.5 Metodologia com alteração da sequência de soldagem e aquecimento localizado.

A peças identificadas como 15, 16 e 17 foram soldadas com a nova sequência de soldagem e parâmetros identificados como 1 na Tabela 6.

Imediatamente após a soldagem foi executado o aquecimento por chama com gás GLP, como pode ser visto na Figura 28, promovendo uma distribuição homogênea da temperatura nas áreas entre os suportes e os pórticos de óleo. A temperatura foi controlada através de uma câmara térmica, possibilitando o controle preciso da temperatura. As peças foram aquecidas por chama até uma temperatura de aproximadamente 280° C.

Figura 28 – Aquecimento localizado

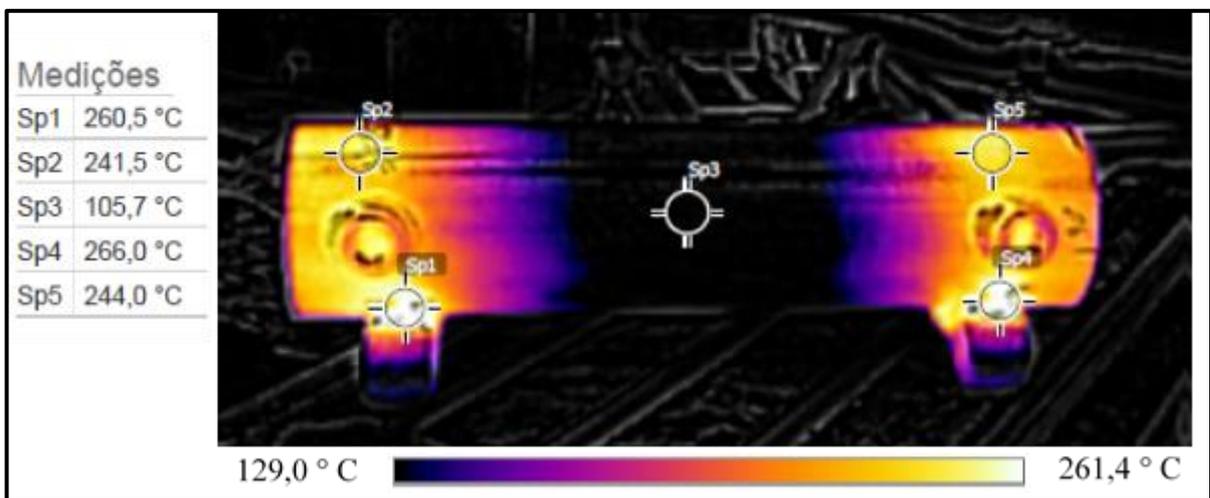


Fonte: O autor (2019)

3.3.6 Metodologia com aquecimento localizado

Com o objetivo de compreender o efeito do aquecimento localizando independentemente de quaisquer outras variáveis, optou-se por realizar o aquecimento por chama em peças com sequência de soldagem e parâmetros atuais. As peças foram aquecidas por chama até uma temperatura de aproximadamente 280° C, como pode ser visto na Figura 29. As peças sujeitas a essa metodologia foram identificadas como 18, 19 e 20.

Figura 29 - Controle do aquecimento localizado realizado por câmera térmica



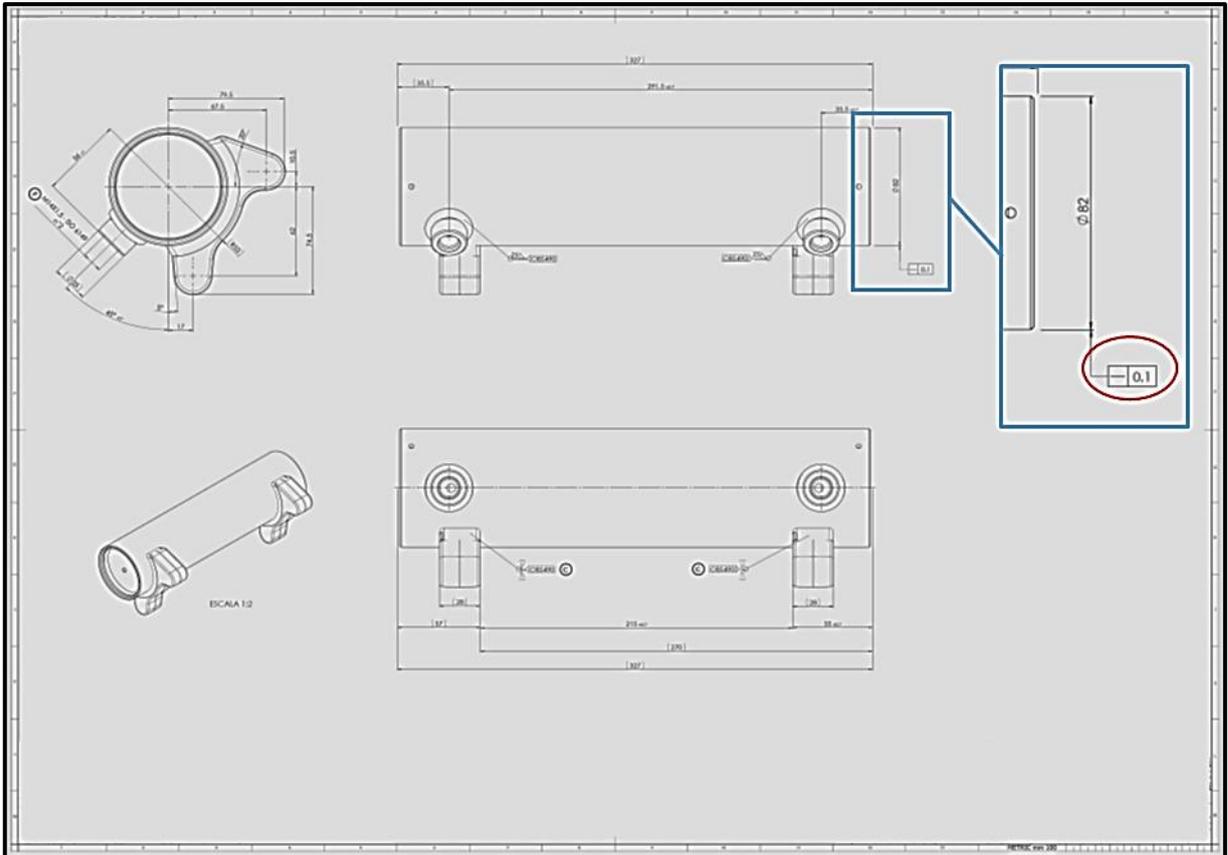
Fonte: O autor (2019)

3.4 ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional consistiu na medição das deformações internas (ovalização) do tubo antes e depois da realização da soldagem. As medições foram realizadas em 10 pontos ao longo do tubo, dos quais 5 pontos na posição 0° e 5 pontos na posição 90°, distribuídos ao longo do comprimento do tubo, nas posições 23 mm, 87 mm, 163 mm, 239 mm e 303 mm, identificadas como A, B, C, D e E, respectivamente. A definição dos eixos 0° e 90° foi definida pela posição a qual a peça será montada na máquina, sendo o eixo 0° correspondente a coordenada cartesiana X e o eixo 90° correspondente a coordenada cartesiana Y.

Conforme indicado em desenho, Figura 30, a flexão máxima admitida para a peça após a soldagem é de 0,1 mm.

Figura 30 - Desenho da peça



Fonte: O autor (2019)

A medição da deformação interna foi realizada através de um comparador de diâmetro interno modelo 511-713, com resolução de 0,001 mm e com certificado de calibração n° 5605R719, válido até 08/03/2020, como pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Medição da deformação interna



Fonte: O autor (2019)

Os dados foram registrados em uma tabela, possibilitando a análise da ovalização para cada uma das posições.

Como visto na Figura 32, a medição de flexão do tubo foi realizada com auxílio de um calibrador de altura digital de 0-600 mm com resolução 0,001 mm e certificado de calibração n° 15180/18, válido até 12/07/2020. As peças foram fixadas sobre um prisma magnético calibrado. As medições foram realizadas em 10 pontos ao longo do tubo, dos quais 5 pontos na posição 0° e 5 pontos na posição 90°, distribuídos ao longo do comprimento do tubo, nas posições 23 mm, 87 mm, 163 mm, 239 mm e 303 mm, identificadas como A, B, C, D e E, respectivamente.

Figura 32 – Medição da flexão



Fonte: O autor (2019)

3.5 ENSAIOS METALOGRAFICOS E DEFEITOS VISUAIS

Ensaio metalográficos foram realizados para verificar a penetração da solda e as zonas fundida e termicamente afetada. Foram retirados 6 corpos de prova, um para cada método de análise. As peças formam cortadas em uma serra fita, e enviadas ao Laboratório de Ensaio Mecânicos da UCS para embutimento, lixamento e análise das amostras.

Nesta fase, também, foram verificadas a presença ou não de defeitos ou discontinuidades, falta de fusão, falta de preenchimento na região soldada.

3.6 SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES

Para facilitar a compreensão e posterior análise a Tabela 7, traz um resumo dos métodos analisados e quais amostras foram utilizadas em cada método.

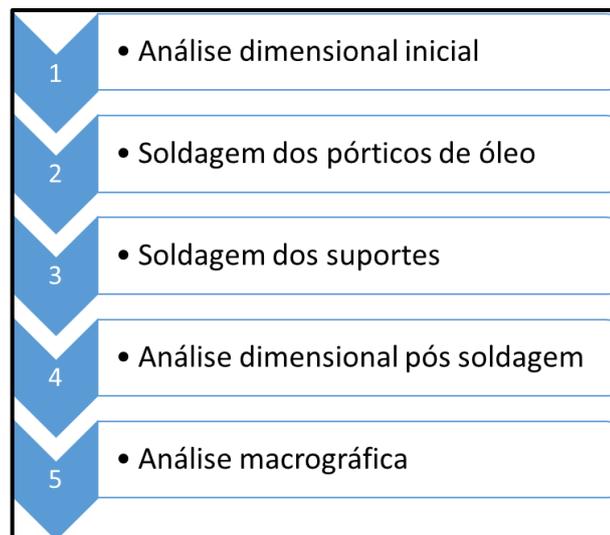
Tabela 7 – Resumo das metodologias

Metodologia de análise	Amostras	Sequência	Aporte térmico (kJ/mm)
Processo atual	1, 2 e 3	1	0,43
Redução do aporte térmico	4, 5 e 6	1	0,34
Redução do aporte térmico e sequência modificada	8, 9 e 10	2	0,34
Parâmetro atual e sequência modificada	12, 13 e 14	2	0,43
Processo atual com pós aquecimento	15, 16 e 17	1	0,43
Parâmetro atual e sequência modificada com pós aquecimento	18, 19 e 20	2	0,43

Fonte: O autor (2019)

As atividades desenvolvidas seguiram o fluxograma descrito na Figura 33.

Figura 33 - Fluxograma de operações



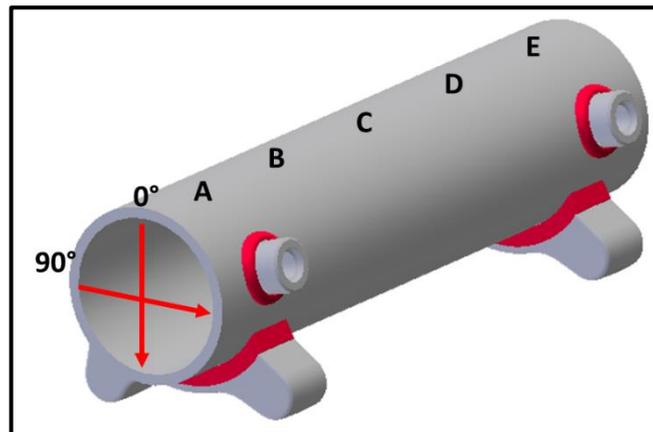
Fonte: O autor (2019)

4 RESULTADOS E ANÁLISES

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os resultados dos ensaios realizados, bem como a análise comparativa dos métodos de soldagem utilizados, tendo como base as referências bibliográficas apresentadas nos capítulos anteriores.

A Figura 34 ilustra as direções e posições que foram utilizadas para medição das amostras.

Figura 34 - Pontos e direções medidas

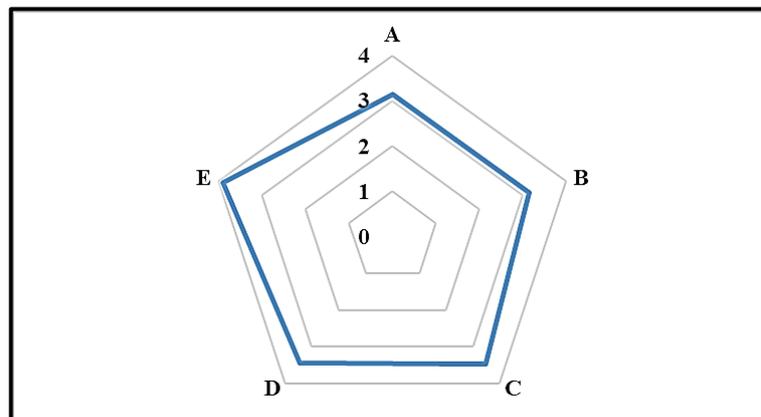


Fonte: O autor (2019)

4.1 OVALIZAÇÃO

Medições foram realizadas para controle da ovalização das peças antes do processo de soldagem visando verificar a uniformidade das peças. A Figura 35 mostra que a média da ovalização, para cada uma das posições, ficou entre 0,03 e 0,04 mm. O valor máximo encontrado foi 0,10 mm.

Figura 35 – Média da ovalização antes da soldagem

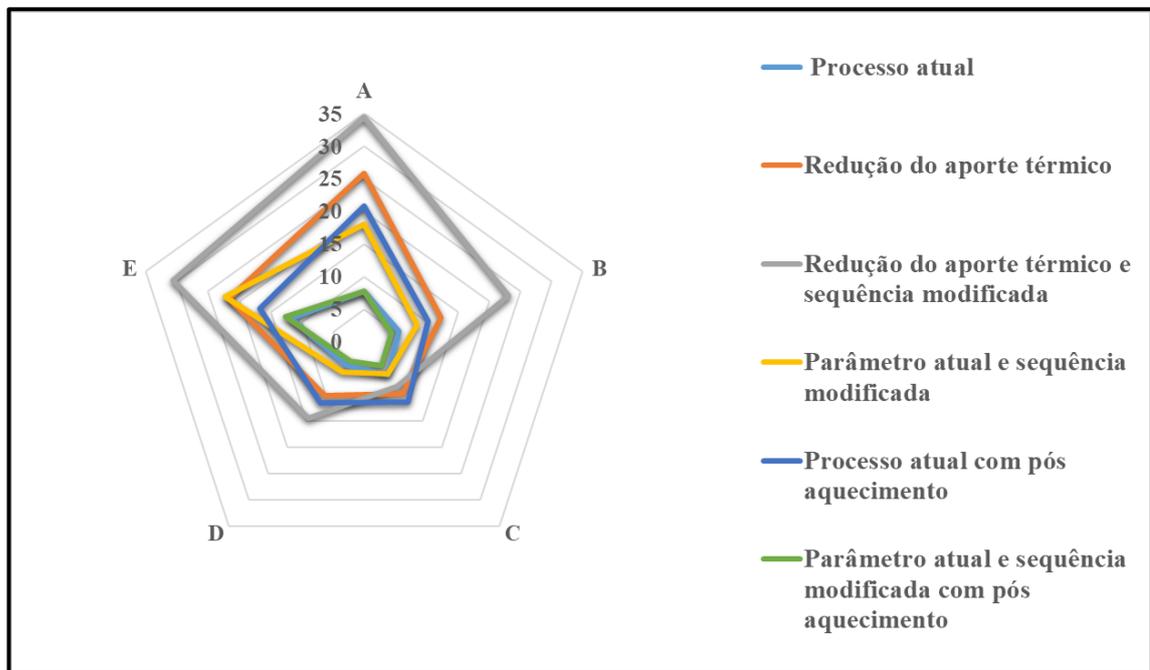


Fonte: O autor (2019)

Analisando-se a média das medições, observasse uma ovalização praticamente constante ao longo do comprimento do tubo. Porém, ao analisarmos as amostras individualmente, constatamos que existem variações consideráveis, de 0,01 a 0,07 mm, amostras 16 e 9, respectivamente, como pode ser visto no apêndice B.

O comportamento da ovalização para cada um dos métodos utilizados é mostrado na Figura 36. Observa-se que em todos os métodos houve uma maior ovalização nas bordas da peça, próximo as regiões onde houve a soldagem. A parte central, que também é a parte mais afastada da região de solda, apresentou a menor ovalização.

Figura 36 - Média da ovalização dos métodos testados



Fonte: O autor (2019)

Os métodos atual e com variação da sequência de soldagem com posterior aquecimento localizado foram aqueles que apresentaram a menor ovalização, apesar de apresentarem os maiores valores de aporte térmico (0,43 kJ/mm). Isso pode ser explicado pelo fato dos cordões de solda dos pórticos de óleo e dos suportes serem defasados de aproximadamente 90° e em regiões muito próximas, causando separadamente ovalizações no tubo em direções opostas, que acabam compensando-se; quando os valores de aporte térmico são reduzidos; isto é; quando a deformação torna menor, essa compensação é menor ou deixa de existir, como pode ser observado o método de redução de aporte térmico e sequência modificada.

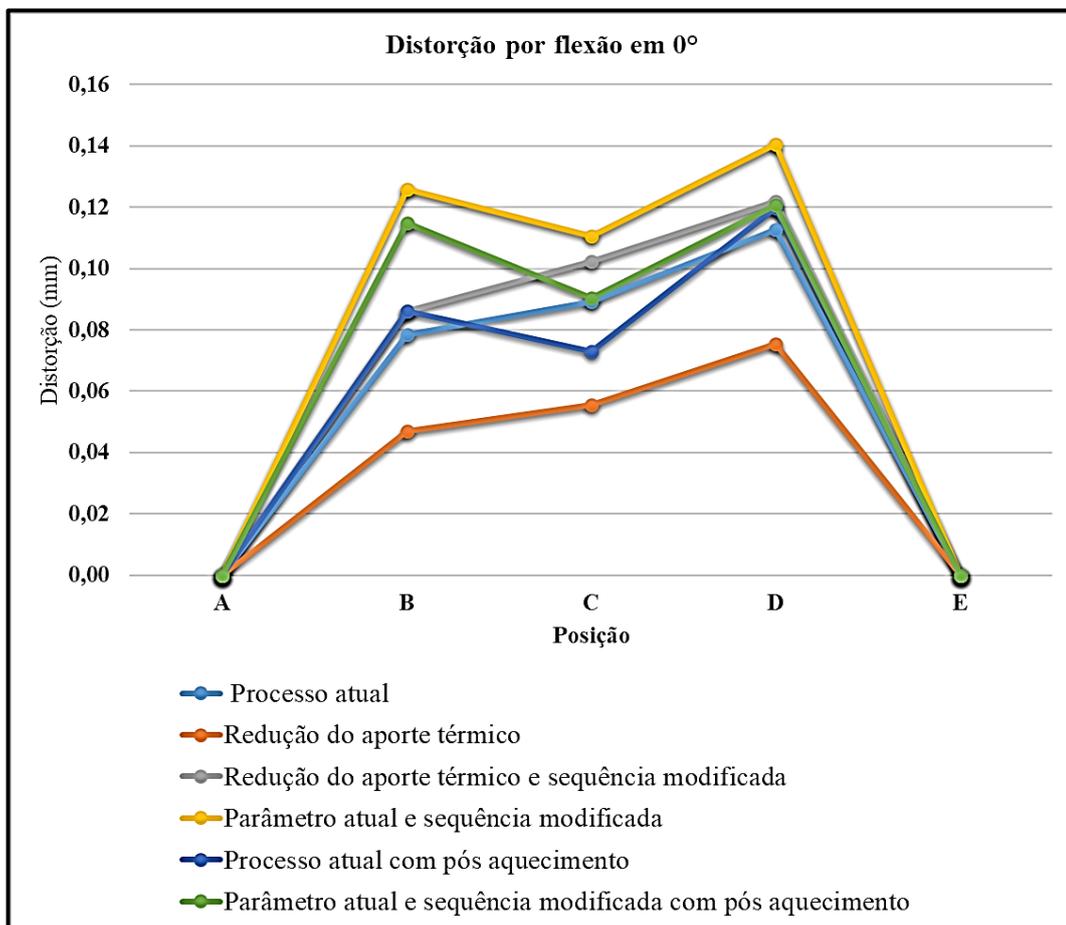
O processo com redução de aporte térmico e sequência modificada foi aquele que apresentou os maiores valores médios de ovalização, variando de 0,34 mm a 0,08 mm.

Os demais métodos apresentaram comportamentos similares, com valores médios de ovalização intermediários as outras técnicas já apresentadas. Diferenciando-se apenas o processo parâmetros atuais e sequência modificada por apresentar valores de ovalização menores na parte central da peça.

4.2 DISTORÇÃO POR FLEXÃO

A Figura 37 ilustra as distorções por flexão médias medidas na direção 0° em cada uma das posições do tubo e para cada um dos métodos testados. Os dados mostrados são resultado da variação da distorção ao longo o tubo, tomando como ponto zero, o ponto mais baixo medido, desconsiderando-se quaisquer variações de flexão aos quais as amostras pudessem estar; isto é; estabeleceu-se que as amostras antes da soldagem eram corpos retilíneos.

Figura 37 - Distorção por flexão na direção 0°



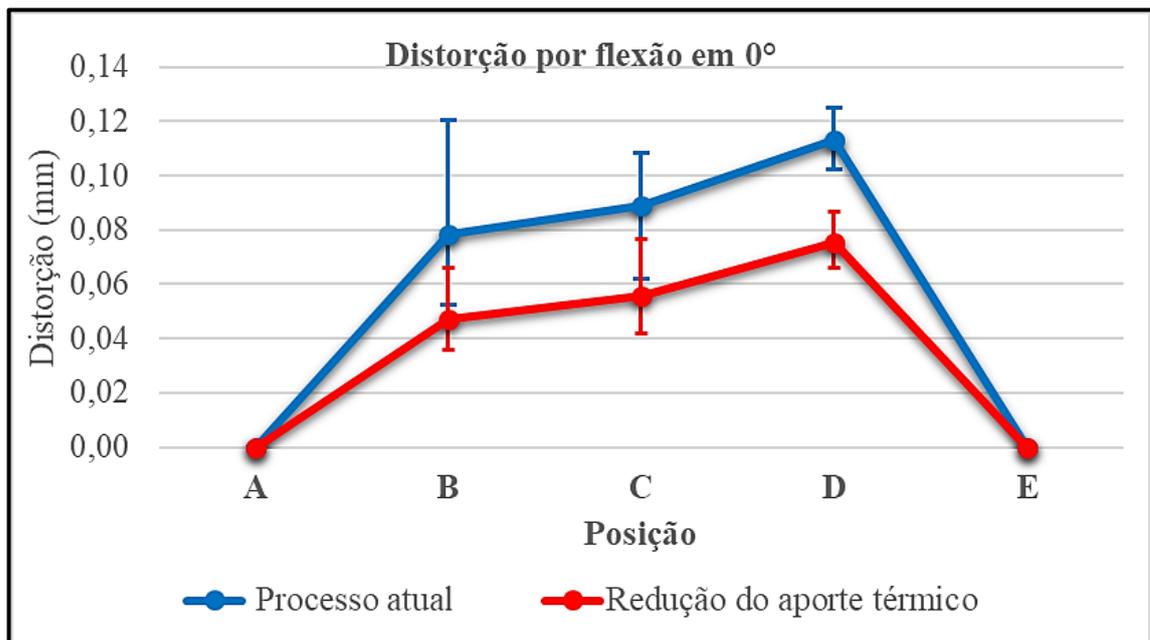
Fonte: O autor (2019)

Para a sequência de soldagem 1, utilizado no processo com redução do aporte térmico, o ponto D corresponde a parte da peça que foi submetida ao maior aquecimento, pois executou-se dois cordões de solda no mesmo suporte em sequência, justificando a variação visualizada na Figura 37.

Comparando o processo atual com o método com redução do aporte térmico, observa-se uma diferença maior do que 0,03 mm entre às médias dos pontos B, C e D, como pode ser observado na Figura 38. É mostrado os pontos máximos e mínimos encontrados em cada um dos pontos medidos.

Ao realizarmos uma análise de variância através do método do teste t, bicaudal, constatamos que apenas o ponto D apresenta um valor de prova menor que 0,05; isto é; apenas para este ponto as médias entre os dois modelos diferem, com uma confiabilidade de 95%, conforme pode ser visto no Apêndice K.

Figura 38 – Distorção por flexão para método atual e redução do aporte térmico



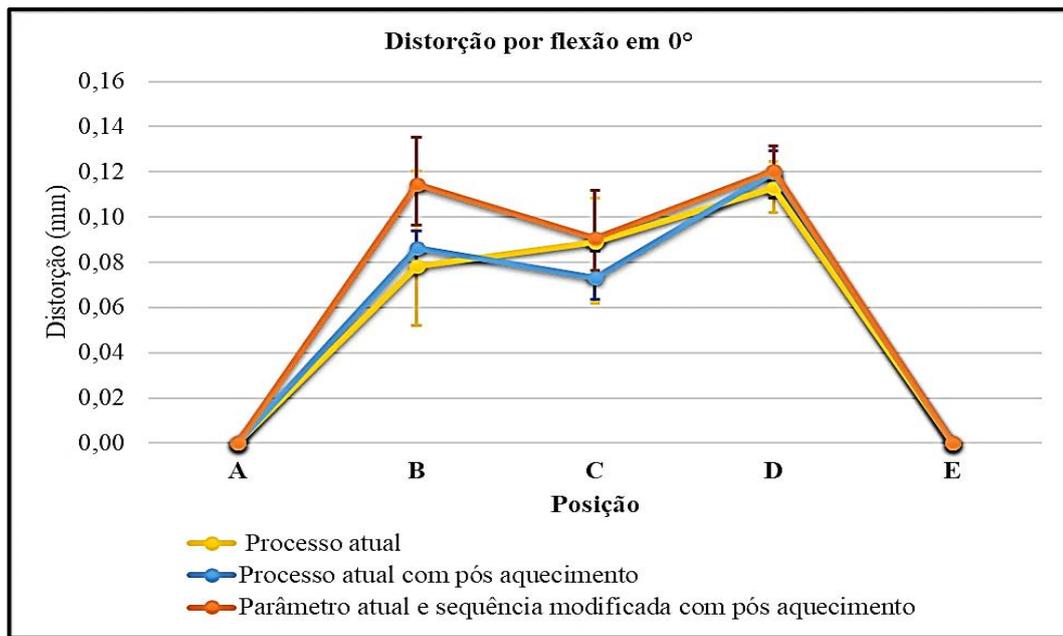
Fonte: O autor (2019)

Para os processos que utilizaram aquecimento após a soldagem, observou-se que o método onde houve a alteração de sequência de soldagem apresentou variações maiores que o método atual para o ponto B, enquanto os demais pontos não apresentaram variação significativa, como pode ser observado na Figura 39.

Observou-se ainda que o processo atual com pós aquecimento, apresentou uma redução de 0,02 mm no ponto C, para os demais pontos não houve alteração significativa.

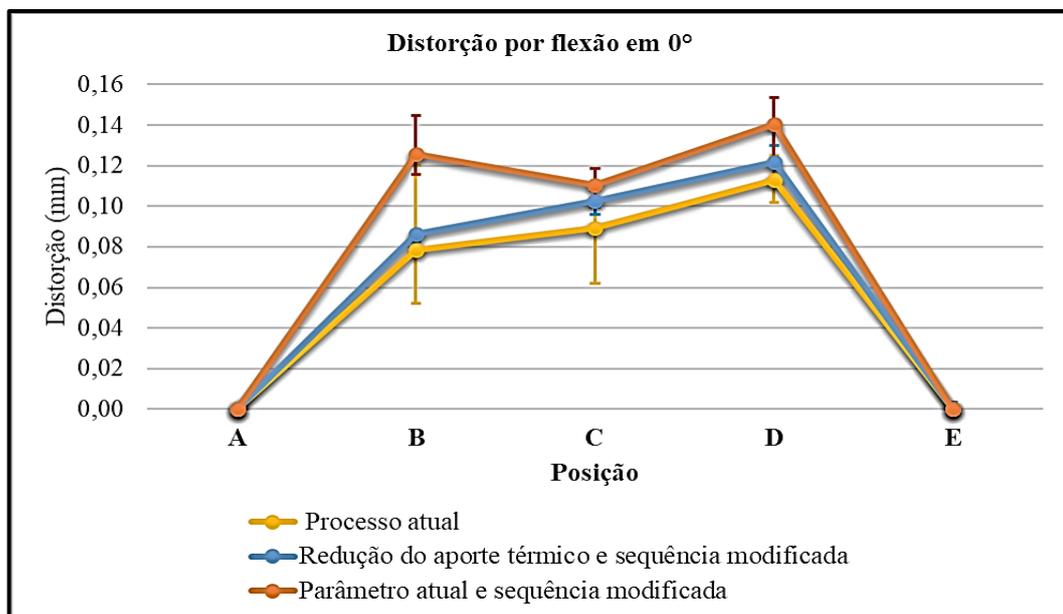
As variações apresentadas podem ser explicadas e condizem com os experimentos realizados por Pazooki, Hermans e Richardson, que afirmam que a posição da chama influencia na distorção gerada e a temperatura de aquecimento varia conforme as propriedades e a geometria da peça, sendo necessário a realização de diversas configurações de posição e temperatura para a obtenção dos dados ideiais.

Figura 39 - Distorção por flexão para método atual e com pós aquecimento



Fonte: O autor (2019)

Figura 40 - Distorção por flexão para método atual e com sequência modificada



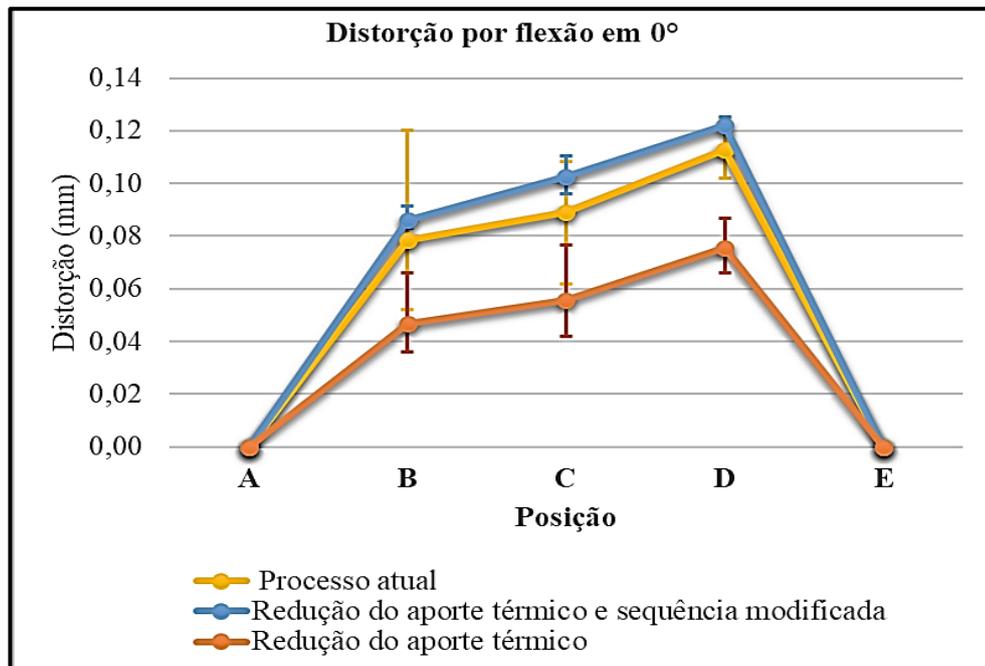
Fonte: O autor (2019)

A comparação do processo atual com os métodos que foram submetidos à alteração de sequência de soldagem apresentaram efeitos adversos, contribuindo para o aumento da distorção, como pode ser visto na Figura 40.

O método com redução do aporte térmico, apresentou comportamento levemente superior ao atual sem alteração da sequência. Se comparado com o processo atual e sequencia modificada, observamos que o ponto B, apresenta média 0,04 mm superior, neste ultimo caso.

A Figura 41 ilustra a comparação entre os processo atual e os processos submetidos a alteração de parâmetros. Como já abordado pelos diversos autores consultados, a alteração dos parâmetros, com redução do aporte térmico, é um dos principais fatores de redução de distorções, o que condiz com o observado no experimento executado.

Figura 41 - Distorção por flexão para método atual e com redução do aporte térmico

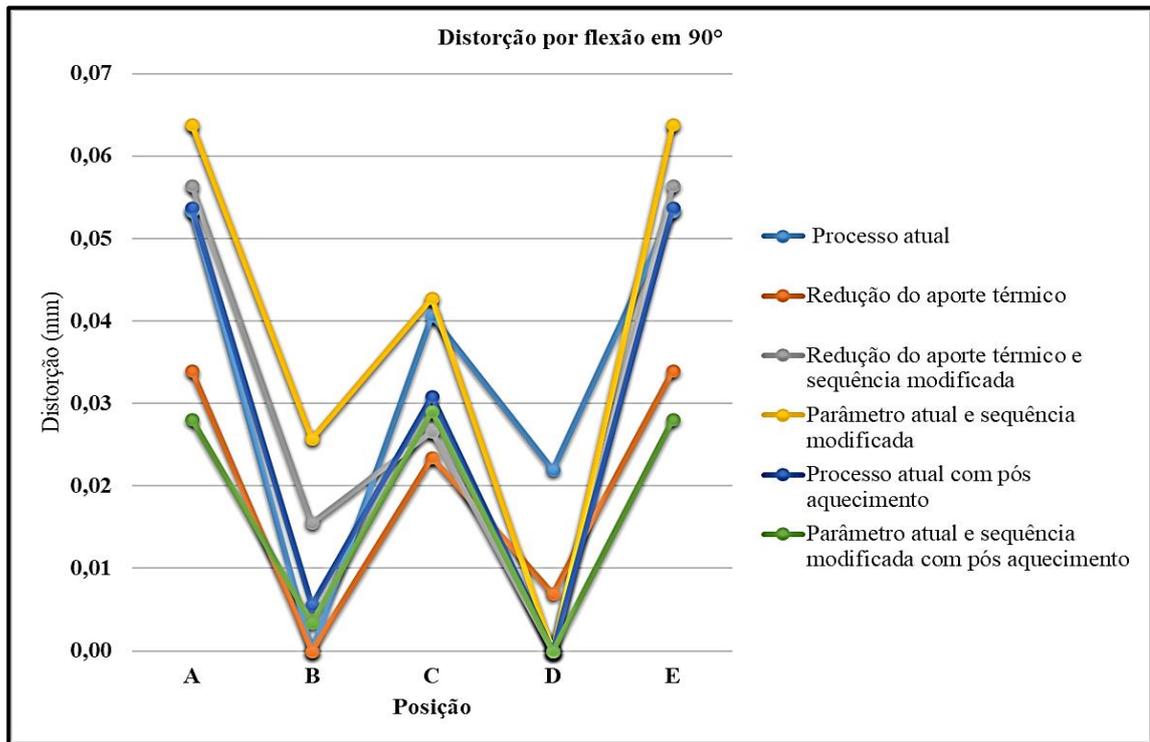


Fonte: O autor (2019)

Observa-se ainda que a alterações da sequência de soldagem, produziu efeitos negativos que causaram aumento das distorções.

A Figura 42 ilustra as distorções por flexão médias medidas na direção 90° em cada uma das posições do tubo e para cada um dos métodos testados. Os dados mostrados nesta figura são resultado da variação da distorção ao longo o tubo, tomando como ponto zero, o ponto mais baixo medido, desconsiderando-se quaisquer variações de flexão aos quais as amostras pudessem estar; isto é; estabeleceu-se que as amostras antes da soldagem eram corpos retilíneos.

Figura 42 - Distorção por flexão na direção 90°



Fonte: O autor (2019)

Constatou-se que o método com parâmetro atual e sequência modificada com pós aquecimento, apresentou a menor distorção por flexão na direção 90°, com variações médias menores de 0,03 mm. O processo que foi submetido a redução do aporte térmico apresentou comportamento similar, porém com variação máxima de 0,035 mm. O método com parâmetro atual e sequência modificada foi aquele que apresentou as maiores variações médias, com valores máximos de 0,65 mm.

Nos métodos que utilizaram a sequência de soldagem 2 e que não foram submetidos a pós aquecimento, nota-se que no ponto B, houve aumento da distorção em comparação com o ponto D, mesmo ambos estando a mesma distância dos cordões de solda.

Na sequência de soldagem 2 os cordões foram soldados alternadamente em cada suporte. Tal operação tenderia a apresentar a mesma deformação nos pontos B e D, porém isso não foi observado.

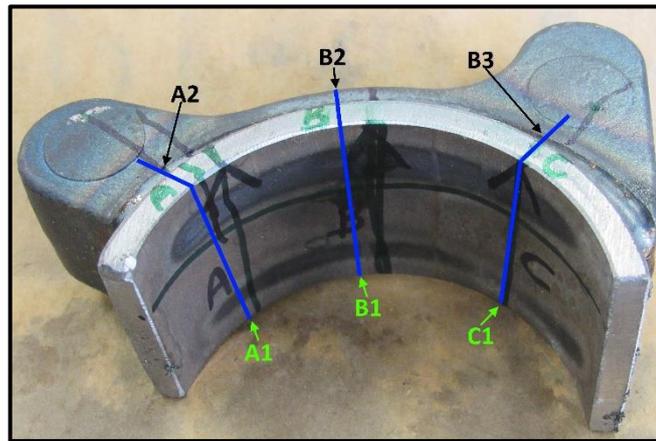
O processo atual e o método com redução do aporte térmico utilizaram a sequência de soldagem 1, sem aquecimento. Nestes casos, observa-se que o ponto D apresentou maior variação se comparado ao ponto B.

Os processos que utilizaram aquecimento pós soldagem apresentaram as menores variações entre os pontos B e D.

4.3 ANÁLISE MACROGRÁFICA

Foi realizada análise macrográfica de uma peça de cada método, para verificar a penetração da solda e possíveis defeitos. Foram retiradas amostras de apenas um dos suportes, visto que os parâmetros utilizados foram os mesmos para ambos os suportes. Foram executadas 3 análises para cada um dos suportes. A Figura 43, mostra os locais onde foram executados os cortes.

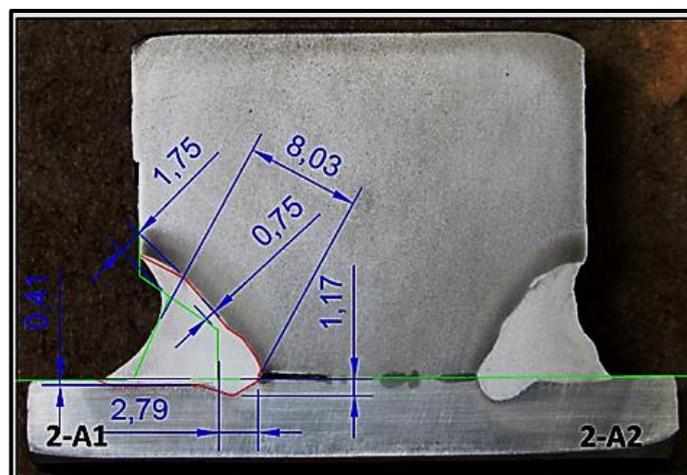
Figura 43 - Localização dos cortes para análise metalográfica



Fonte: O autor (2019)

A amostra 2, correspondente ao processo atual, exibiu uma penetração mínima de 0,41 mm e garganta de 8,03 mm, como pode ser observado na Figura 44. Apresentou um perfil com concavidade excessiva; defeito este não previsto na norma utilizada, sendo, portanto, considerado como conforme especificação. Não foram observados outros defeitos visuais na amostra.

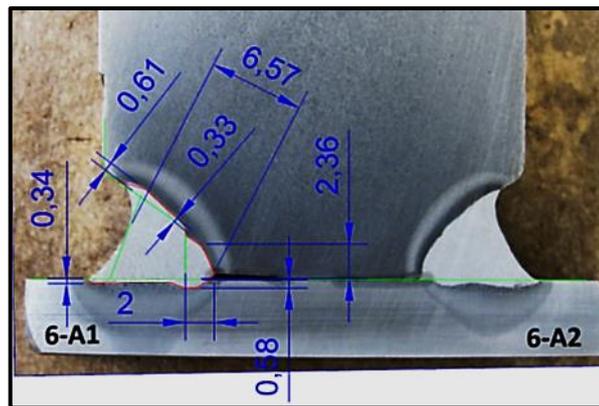
Figura 44 – Macrografia amostra 2 – método atual



Fonte: O autor (2019)

O método com redução do aporte térmico foi validado através da mostra 6. Como ilustra a Figura 45, observou-se uma penetração mínima de 0,33 mm e uma garganta de 6,57 mm. Também neste caso observou-se uma concavidade excessiva, porém menor do que no processo atual. Não foram observadas descontinuidades. O tamanho da zona afetada foi reduzido, como esperado, principalmente na região do tubo.

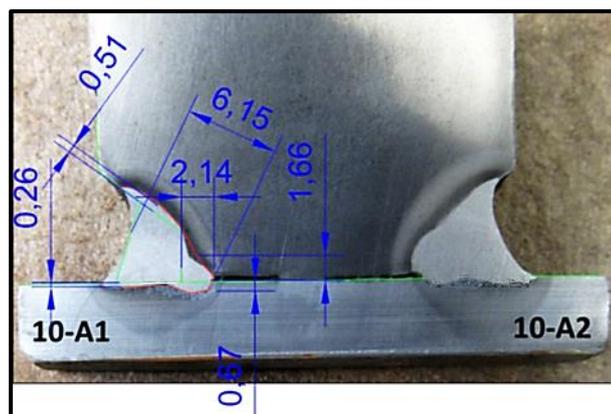
Figura 45 – Macrografia amostra 6 – Redução do aporte térmico



Fonte: O autor (2019)

A amostra 10, relativa ao processo com redução do aporte térmico e sequência de soldagem modificada, exibiu uma penetração mínima de 0,26 mm e 6,15 mm de garganta. Não foram observados outros defeitos visuais na amostra, como pode ser observado na Figura 46.

Figura 46 – Macrografia amostra 10 – Redução do aporte térmico e sequência modificada

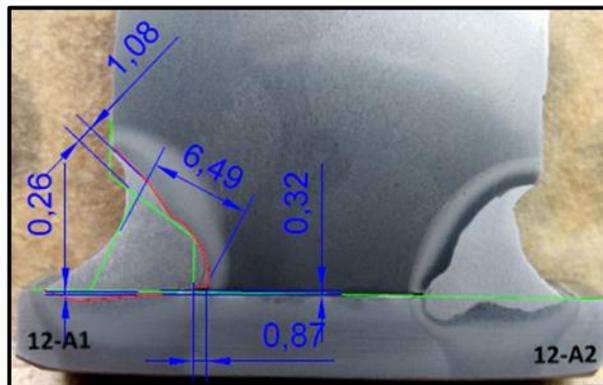


Fonte: O autor (2019)

O método com parâmetro atual e sequência modificada foi validado através da mostra 12. Conforme Figura 47, observou-se uma penetração mínima de 0,26 mm e uma garganta de 6,49 mm, valores menores que o esperado, dados os parâmetros utilizados, tendo como

comparação a amostra 2. Observou-se falta de penetração no lado A1. Tendo em vista as modificações realizadas, fica claro que a posição da tocha e a distância do bico de contato com a peça durante a soldagem, foram fatores de grande influência nos resultados obtidos. Não foram observadas descontinuidades. O tamanho da zona afetada aumentou, devido ao aporte térmico ser elevado.

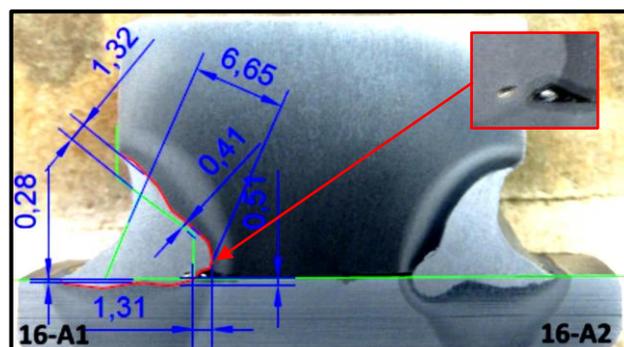
Figura 47 – Macrografia amostra 12 – Parâmetro atual e sequência modificada



Fonte: O autor (2019)

A amostra 16, ilustrada na Figura 48, correspondente ao processo atual com pós aquecimento, exibiu uma penetração mínima de 0,28 mm e garganta de 6,65 mm. Apresentou um perfil com concavidade excessiva, similar a amostra 2. Observou-se no lado A1 uma porosidade e falta de penetração na raiz.

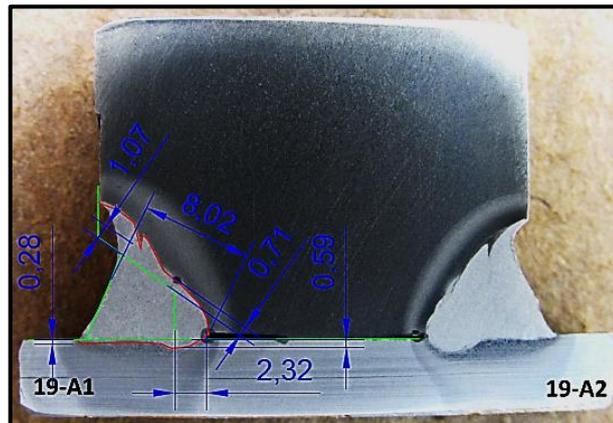
Figura 48 – Macrografia amostra 16 – Processo atual com pós aquecimento



Fonte: O autor (2019)

O método com parâmetros alterados foi validado através da amostra 6. Como mostra a Figura 49, observou-se uma penetração mínima de 0,28 mm e uma garganta de 8,02 mm. Não foram observadas descontinuidades.

Figura 49 – Macrografia amostra 19 –
Parâmetro atual e sequência modificada com pós aquecimento



Fonte: O autor (2019)

A norma interna da empresa Ognibene, denominada OBS490, foi utilizada como parâmetro para avaliação metalográfica dos corpos de prova. Tal norma estabelece uma penetração mínima de 0,25 mm e uma garganta mínima de 6 mm.

A Tabela 8 mostra os resultados da análise metalográfica realizada, na qual pode verificar que todos as metodologias superaram os requisitos da norma interna da empresa.

Tabela 8 – Resultados análise metalográfica

Metodologia de análise	Amostra	Aporte térmico (kJ/mm)	Garganta (mm)	Penetração Mínima (mm)
Processo atual	2	0,43	8,03	0,41
Redução do aporte térmico	6	0,34	6,57	0,33
Redução do aporte térmico e sequência modificada	10	0,34	6,15	0,26
Parâmetro atual e sequência modificada	12	0,43	6,49	0,26
Processo atual com pós aquecimento	16	0,43	6,65	0,28
Parâmetro atual e sequência modificada com pós aquecimento	19	0,43	8,02	0,28

Fonte: O autor (2019)

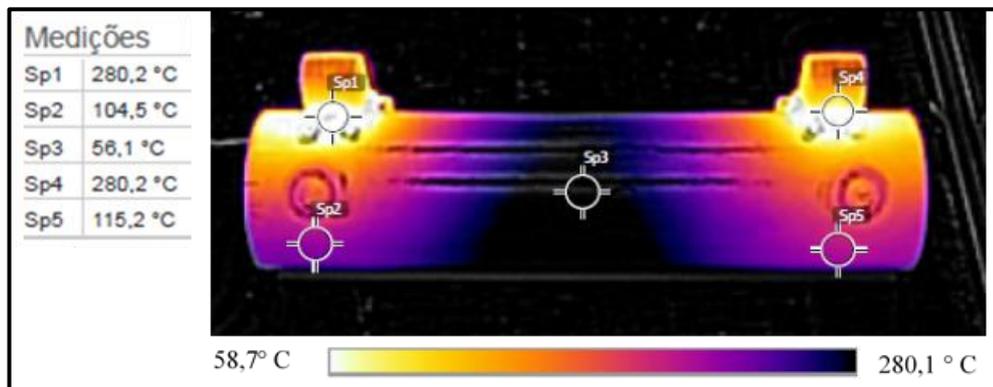
Destaca-se que os processos de redução do aporte térmico com sequência modificada e parâmetro atual com sequência modificada obtiveram resultados próximos ao limite estabelecido. O método com redução do aporte térmico obteve bons resultados de penetração aliado a redução da deformação por flexão.

4.4 ANÁLISE TERMOGRÁFICA

A análise das imagens captadas pela câmera térmica durante as soldagens das amostras, nos mostram a variação da temperatura entre as diversas regiões da peça.

Na Figura 50, registrada após a soldagem, sem aquecimento localizado, verifica-se uma diferença de temperatura superior a 200°C entre a parte central e as bordas da peça. O método sem aquecimento localizado tende a apresentar a maior deformação devido à dificuldade de dilatação do material.

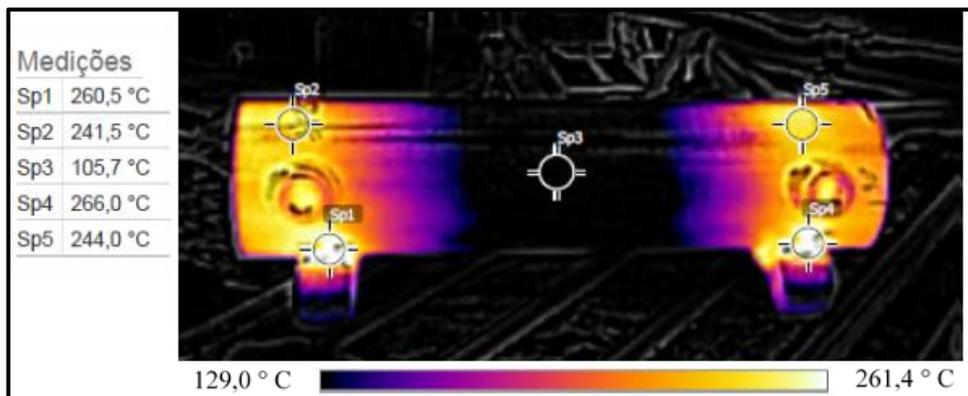
Figura 50 - Imagem termográfica sem aquecimento localizado



Fonte: O autor (2019)

A Figura 51 mostra a imagem capturada após o aquecimento localizado, onde é possível verificar que houve uma uniformidade entre as regiões ao longo do raio do tubo. Nota-se ainda uma diferença de temperatura menor que 150 °C entre a parte central e as bordas da peça. Este método tende a apresentar a menor deformação devido à facilidade de dilatação do material, que está ligado a menor diferença de temperatura.

Figura 51 - Imagem termográfica após aquecimento localizado



Fonte: O autor (2019)

5 CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que o controle das distorções oriundas do processo de soldagem para peças de aço carbono, necessita de um controle refiando do processo de produção, com o emprego de parâmetros e técnicas específicas para a manutenção de um processo de produção estável.

A ovalização foi observada, principalmente, nas bordas do tubo, região onde estava concentrada os cordões de solda. O método que obteve os melhores resultados foi aquele onde foram mantidos os parâmetros atuais e modificada a sequência de soldagem, seguido de um aquecimento localizado. O resultado deste método foi similar ao atual. Demais métodos não foram eficientes no controle da ovalização. O aspecto da ovalização, para este trabalho, não é o fator de maior importância, visto que esta característica é de fácil correção nos processos de usinagem posteriores.

Considerando a flexão do tubo na direção 0° o método de redução do aporte térmico foi responsável por alcançar os menores valores médios, havendo uma redução de 0,03 mm em comparação com o método atual, conduzindo a uma deformação média máxima de flexão dentro dos parâmetro permitido de 0,1 mm. Os valores medidos, porém, apresentaram variações, não sendo possível admitir uma diferença real entre estes métodos, como demonstrado, através da análise de variância.

O método de análise com parâmetro atual e sequência modificada com pós aquecimento apresentou os menores valores de flexão do tubo na direção 90° , porém, a análise de variância não demonstrou diferença entre os métodos analisados.

Cabe ressaltar que a alteração da sequência de soldagem, não apresentou melhora na redução da ovalização e quanto a distorção por flexão, houve aumento em ambas as direções. Conclui-se, portanto, que este método é inadequado para a resolução das distorções.

A penetração da solda foi aprovada em todas as amostras, estando em conformidade com os padrões estabelecidos pela empresa.

A metodologia de redução do aporte térmico apresentou os melhores na redução da deformação por flexão a 0° e 90° , mantendo a penetração dentro dos limites aceitáveis, sendo o melhor método, dentre os testados, para ser utilizado na redução da deformação.

Conclui-se, no entanto, que nenhum dos métodos empregados foi eficiente na redução efetiva da distorção por flexão do tubo, principal objetivo deste trabalho.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Avaliar método de soldagem CMT para redução das distorções;
- b) Estudo da variação dos parâmetros de aquecimento após soldagem;
- c) Aplicação de simulações numéricas para estudo da redução das distorções;

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (Estados Unidos). American Welding Society (Org.). **Welding Handbook: Fundamentals of Welding**. 7. ed. Miami: Charlotte Weissman, 1976. 361 p.

ANDRADE, Augusto Fernandes Cordeiro de. **Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro da gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Séries mensais, a partir de janeiro/1960, de máquinas agrícolas e rodoviárias por segmento (tratores de rodas, tratores de esteiras, cultivadores motorizados (até 2016), colheitadeiras de grãos, colhedoras de cana, retroescavadeiras) de produção; vendas**. 2018. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/docs/SeriesTemporais_MaqAgri&Rodoviaras.xlsx>. Acesso em: 7 abr. 2019.

BARRA, Sergio Rodrigues. **Influência do processo mig/mag térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. 2003. 220 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CHÁVEZ, Jairo José Muñoz. **Uma Metodologia para Obtenção e Validação de Parâmetros Ótimos em Soldagem GMAW Pulsado**. 2014. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CLEBER FONTES (Brasil). Engenheiro Metalúrgico (Org.). **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. Brasília, 2005. 68 p.

CORDEIRO, Filipe David Santos. **A Critical Analysis on Weld's Distortion**. 2015. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.

COULES, H. E. et al. High pressure rolling of low carbon steel weld seams: Part 1. **Science And Technology Of Welding And Joining**, Cranfield, p.76-83, jan. 2013.

COULES, Harry E. et al. The Effect of Pre-Weld Rolling on Distortion and Residual Stress in Fusion Welded Steel Plate. **Materials Science Forum**, [s.l.], v. 681, p.486-491, mar. 2011. Trans Tech Publications. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.681.486>.

COZZOLINO, Luis D. et al. Investigation of post-weld rolling methods to reduce residual stress and distortion. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 247, p.243-256, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.04.018>.

ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. Apostila ESAB - 2005. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoldagemmigmag_nova.pdf>. Acesso em: 01 maio 2019.

FARAJPOUR, Mehdi; RANJBARNODEH, Eslam. Finite Element Simulation of Welding Distortion in Dissimilar Joint by Inherent Deformation Method. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.],

v. 23, n. 1, p.60-72, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.07>.

FBTS. Fundação Brasileira de Tecnologia e Soldagem (Org.). **Curso de inspetor de soldagem**. 3. ed. Rio de Janeiro: Publit, 2016. 417 p.

FONTES, Cleber. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. Brasília, 2005. 68 p.

KALYANKAR, V.d.; SHAH, Prassan. A review on methodologies to reduce welding distortion. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 5, n. 11, p.24741-24749, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.272>.

KOU, Sindo. **WELDING METALLURGY**. 2. ed. New Jersey: Wiley, 2002. 480 p.

LIPPOLD, John C.. **Welding Metallurgy and Weldability**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015. 421 p.

MACHADO, Ivan Guerra. Dimensionamento de Juntas Soldadas de Filete: Uma Revisão Crítica. **Soldagem & Inspeção**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p.189-201, jun. 2011.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Editado Pelo Autor, 1996. 477 p.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz (Ed.). **Soldagem: Fundamentos e Tecnologias**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2005. 363 p.

MATSUOKA, S.; OKAMOTO, Y.; OKADA, A.. Influence of Weld Bead Geometry on Thermal Deformation in Laser Micro-Welding. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 6, p.492-497, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.054>.

MODENESE, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B.. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 2012.

MODENESI, Paulo J.. **Fluxo de Calor em Soldagem**. 2003. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

NJIRAINI, B. N.; MARANGA, S. M.; IKUA, B. W.. Experimental Investigations on Welding Deformation Control Methods of a Butt-Weld in a Manual Arc Welding Operation. In: PROCEEDINGS OF THE 2012 MECHANICAL ENGINEERING ANNUAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE RESEARCH AND INNOVATION, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos], 2014, [si]. **Proceedings...** . [si]: [si], 2014. v. 4, p. 305 - 309.

PARK, Jeong-ung; AN, Gyu Baek. Effect of welding sequence to minimize fillet welding distortion in a ship's small component fabrication using joint rigidity method. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s.l.], v. 230, n. 4, p.643-653, 8 jun. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405415589716>.

PAZOOKI, A. M. A.; HERMANS, M. J. M.; RICHARDSON, I. M.. Control of welding distortion during gas metal arc welding of AH36 plates by stress engineering. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 88, n. 5-8, p.1439-1457, 14 maio 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8869-9>.

PAZOOKI, Amir Masoud Akbari. **Distortion Control during Welding**. 2014. 261 f. Tese (Doutorado) - Curso de Material Science And Engineering, Delft University Of Technology, Tehran, 2014.

RUPANI, Shubham V.; BARAI, Anand. Influence of Welding Sequence on Distortion of Circumferential Pipe Joint– A Review. **Journal Of Production Research And Management**, Gujarat, v. 6, p.1-5, mar. 2016.

SANTOS, Luciano Amaury dos. **Condução de calor na soldagem com pulsação térmica**. 2001. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artiliber Editora, 2008. 284 p.

SELVI, S.; RAJASEKAR, E.; RAJASEKAR, E.. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. **Defence Technology**, [s.l.], v. 14, p.28-44, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914717301022>>. Acesso em: 21 maio 2019.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G.. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2005. 960 p.

SOARES, Hélio Coelho Guimaraes. **Estudo de Sequência de Soldagem Para Redução e Eliminação de Distorções**. 2006. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Processo de Fabricação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

VENKATESAN, M.v.; MURUGAN, N.. Role of FCA welding process parameters on bead profile, angular and bowing distortion of ferritic stainless steel sheets. **Journal Of Engineering Science And Technology**, [si], v. 9, n. 1, p.106-121, fev. 2014.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: processo e metalurgia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

ZHOU, Chen et al. On the Analysis of Metal Droplets During Cold Metal Transfer. **Procedia Manufacturing**, [s.l.], v. 10, p.694-707, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.024>.

ZIBEROV, Maksym. **Avaliação da pulsação térmica para controle da poça de fusão em soldagem de raiz com MIG/MAG automat**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

APÊNDICE A - DIÂMETRO INTERNO ANTES DA SOLDAGEM

AMOSTRA	0°					AMOSTRA	90°				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	71,52	71,50	71,50	71,49	71,49	1	71,51	71,53	71,53	71,54	71,54
2	71,50	71,51	71,51	71,51	71,50	2	71,55	71,55	71,55	71,55	71,54
3	71,55	71,55	71,53	71,53	71,51	3	71,52	71,53	71,54	71,55	71,56
4	71,52	71,50	71,51	71,51	71,52	4	71,55	71,55	71,56	71,56	71,56
5	71,48	71,49	71,50	71,50	71,52	5	71,51	71,50	71,50	71,50	71,49
6	71,52	71,54	71,53	71,53	71,54	6	71,53	71,51	71,51	71,51	71,49
7	71,53	71,56	71,54	71,53	71,50	7	71,52	71,45	71,50	71,51	71,55
8	71,55	71,56	71,56	71,53	71,53	8	71,54	71,56	71,55	71,56	71,57
9	71,53	71,55	71,57	71,55	71,54	9	71,51	71,48	71,47	71,49	71,51
10	71,52	71,52	71,51	71,52	71,53	10	71,57	71,56	71,56	71,55	71,55
11	71,55	71,54	71,53	71,54	71,52	11	71,55	71,55	71,56	71,55	71,58
12	71,55	71,54	71,56	71,56	71,57	12	71,54	71,54	71,52	71,52	71,51
13	71,49	71,52	71,53	71,54	71,54	13	71,57	71,56	71,55	71,53	71,53
14	71,52	71,50	71,51	71,50	71,50	14	71,56	71,56	71,57	71,56	71,55
15	71,54	71,53	71,55	71,53	71,52	15	71,55	71,55	71,53	71,52	71,53
16	71,51	71,51	71,51	71,52	71,51	16	71,51	71,52	71,53	71,52	71,52
17	71,49	71,48	71,47	71,46	71,46	17	71,54	71,54	71,53	71,54	71,56
18	71,52	71,52	71,54	71,55	71,55	18	71,51	71,51	71,49	71,48	71,47
19	71,52	71,52	71,51	71,52	71,52	19	71,48	71,49	71,50	71,50	71,49
20	71,57	71,55	71,55	71,55	71,55	20	71,49	71,50	71,51	71,51	71,53

Fonte: O autor (2019)

APÊNDICE B - DIÂMETRO INTERNO APÓS A SOLDAGEM

AMOSTRA	0°					AMOSTRA	90°				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	71,47	71,47	71,51	71,47	71,49	1	71,46	71,51	71,48	71,51	71,40
2	71,48	71,48	71,54	71,50	71,57	2	71,45	71,53	71,50	71,53	71,37
3	71,57	71,56	71,59	71,48	71,50	3	71,38	71,49	71,47	71,54	71,44
4	71,56	71,56	71,54	71,51	71,53	4	71,45	71,52	71,52	71,53	71,47
5	71,61	71,59	71,57	71,56	71,60	5	71,27	71,44	71,46	71,40	71,26
6	71,63	71,59	71,60	71,54	71,57	6	71,29	71,41	71,44	71,41	71,32
7	71,54	71,53	71,55	71,53	71,54	7	71,31	71,37	71,43	71,27	71,19
8	71,62	71,56	71,55	71,54	71,60	8	71,26	71,37	71,49	71,39	71,29
9	71,61	71,59	71,58	71,55	71,57	9	71,24	71,32	71,40	71,29	71,18
10	71,58	71,56	71,51	71,46	71,51	10	71,28	71,33	71,50	71,44	71,28
11	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-
12	71,52	71,59	71,58	71,52	71,59	12	71,32	71,39	71,47	71,41	71,28
13	71,52	71,51	71,55	71,48	71,50	13	71,34	71,46	71,49	71,45	71,31
14	71,53	71,48	71,51	71,47	71,50	14	71,37	71,49	71,52	71,49	71,33
15	71,48	71,51	71,55	71,48	71,35	15	71,35	71,47	71,49	71,48	71,39
16	71,44	71,48	71,54	71,51	71,54	16	71,37	71,43	71,48	71,43	71,37
17	71,42	71,47	71,49	71,45	71,55	17	71,38	71,43	71,48	71,42	71,38
18	71,54	71,54	71,57	71,51	71,58	18	71,31	71,39	71,44	71,37	71,33
19	71,49	71,49	71,55	71,47	71,51	19	71,34	71,43	71,45	71,33	71,41
20	71,52	71,52	71,57	71,51	71,49	20	71,28	71,42	71,47	71,44	71,34

Fonte: O autor (2019)

APÊNDICE C - RETILINEIDADE DO TUBO ANTES DA SOLDAGEM

AMOSTRA	0°					AMOSTRA	90°				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	156,41	156,41	156,40	156,40	156,41	1	156,39	156,42	156,40	156,41	156,39
2	156,37	156,38	156,38	156,37	156,37	2	156,43	156,43	156,43	156,43	156,43
3	156,39	156,39	156,39	156,39	156,39	3	156,44	156,46	156,45	156,45	156,44
4	156,42	156,41	156,41	156,40	156,42	4	156,38	156,38	156,39	156,38	156,38
5	156,35	156,36	156,35	156,36	156,35	5	156,36	156,37	156,36	156,37	156,36
6	156,48	156,46	156,45	156,46	156,48	6	156,39	156,40	156,40	156,39	156,39
7	156,43	156,42	156,42	156,42	156,43	7	156,40	156,38	156,41	156,39	156,40
8	156,41	156,42	156,41	156,40	156,41	8	156,47	156,46	156,47	156,47	156,47
9	156,47	156,49	156,50	156,49	156,47	9	156,41	156,42	156,47	156,41	156,41
10	156,39	156,39	156,39	156,39	156,39	10	156,44	156,45	156,45	156,45	156,44
11	156,46	156,46	156,52	156,46	156,46	11	156,41	156,40	156,43	156,41	156,41
12	156,39	156,39	156,43	156,39	156,39	12	156,40	156,39	156,40	156,40	156,40
13	156,48	156,49	156,51	156,49	156,48	13	156,43	156,43	156,47	156,40	156,43
14	156,37	156,39	156,44	156,38	156,37	14	156,36	156,37	156,42	156,38	156,36
15	156,43	156,44	156,54	156,43	156,43	15	156,50	156,50	156,60	156,50	156,50
16	156,48	156,44	156,47	156,46	156,48	16	156,45	156,46	156,46	156,44	156,45
17	156,40	156,41	156,55	156,53	156,40	17	156,38	156,36	156,47	156,40	156,38
18	156,49	156,49	156,48	156,49	156,49	18	156,37	156,38	156,46	156,37	156,37
19	156,43	156,42	156,42	156,40	156,43	19	156,41	156,41	156,42	156,38	156,41
20	156,43	156,43	156,42	156,43	156,43	20	156,47	156,45	156,45	156,43	156,47

Fonte: O autor (2019)

APÊNDICE D - RETILINEIDADE DO TUBO APÓS A SOLDAGEM

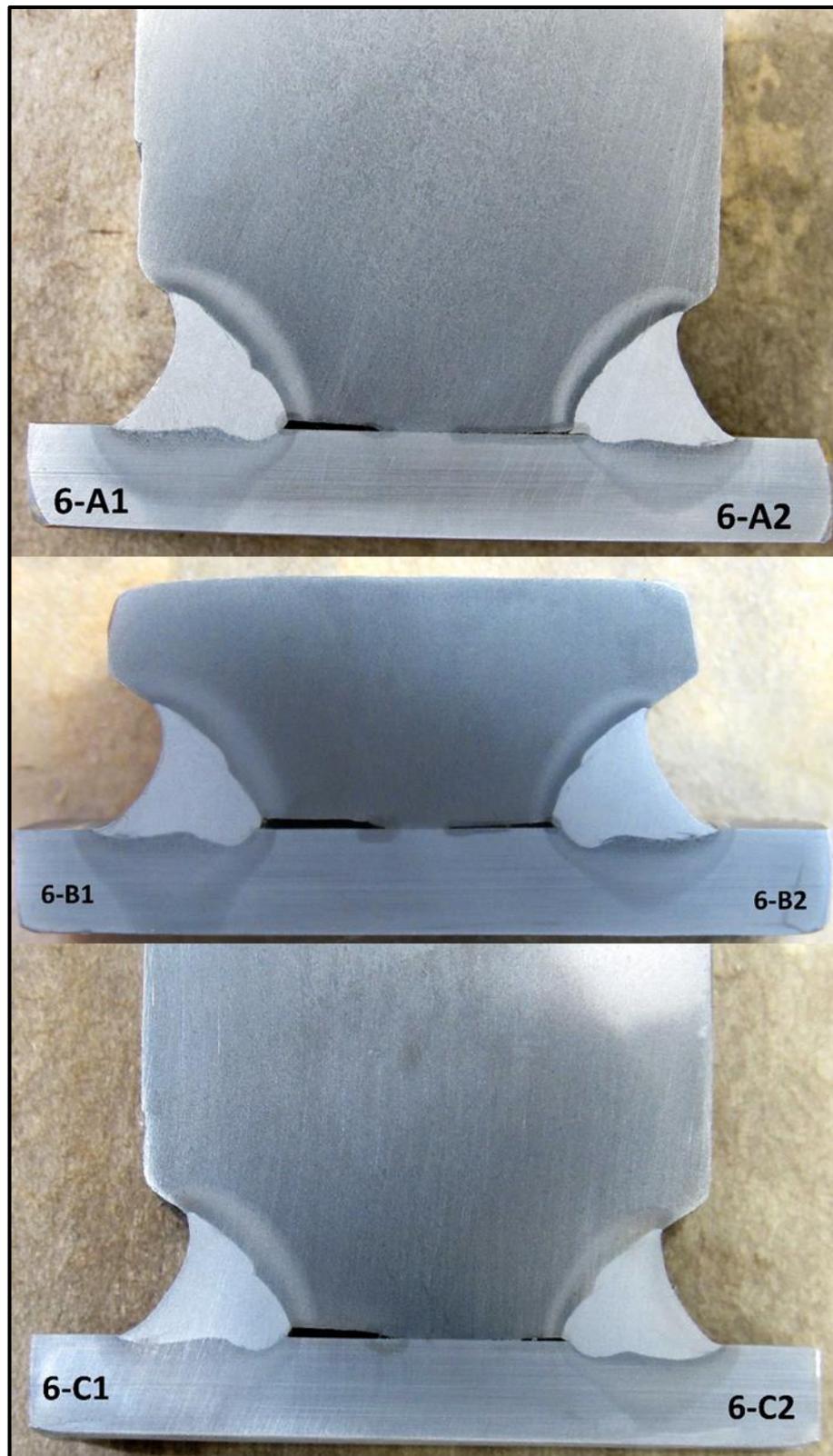
AMOSTRA	0°					AMOSTRA	90°				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	156,59	156,47	156,49	156,48	156,59	1	156,31	156,38	156,34	156,35	156,31
2	156,51	156,45	156,40	156,38	156,51	2	156,33	156,37	156,34	156,34	156,33
3	156,55	156,49	156,49	156,45	156,55	3	156,41	156,47	156,42	156,46	156,41
4	156,56	156,49	156,48	156,47	156,56	4	156,39	156,43	156,40	156,41	156,39
5	156,52	156,48	156,47	156,44	156,52	5	156,32	156,37	156,35	156,37	156,32
6	156,52	156,48	156,47	156,45	156,52	6	156,31	156,33	156,31	156,32	156,31
7	156,45	156,39	156,38	156,37	156,45	7	156,38	156,41	156,40	156,42	156,38
8	156,57	156,49	156,47	156,45	156,57	8	156,44	156,48	156,46	156,50	156,44
9	156,54	156,46	156,45	156,42	156,54	9	156,26	156,31	156,31	156,33	156,26
10	156,60	156,51	156,49	156,48	156,60	10	156,42	156,44	156,44	156,45	156,42
12	156,56	156,45	156,46	156,44	156,56	12	156,42	156,44	156,44	156,50	156,42
13	156,52	156,41	156,41	156,37	156,52	13	156,40	156,45	156,43	156,47	156,40
14	156,60	156,45	156,48	156,45	156,60	14	156,40	156,44	156,41	156,44	156,40
15	156,49	156,39	156,41	156,37	156,49	15	156,44	156,47	156,45	156,49	156,44
16	156,52	156,41	156,44	156,41	156,52	16	156,45	156,46	156,45	156,49	156,45
17	156,58	156,45	156,47	156,45	156,58	17	156,39	156,42	156,38	156,39	156,39
18	156,52	156,43	156,46	156,41	156,52	18	156,36	156,40	156,37	156,43	156,36
19	156,50	156,42	156,43	156,38	156,50	19	156,33	156,39	156,37	156,40	156,33
20	156,53	156,43	156,44	156,40	156,53	20	156,38	156,43	156,39	156,41	156,38

Fonte: O autor (2019)

APÊNDICE E - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 2 – MÉTODO ATUAL

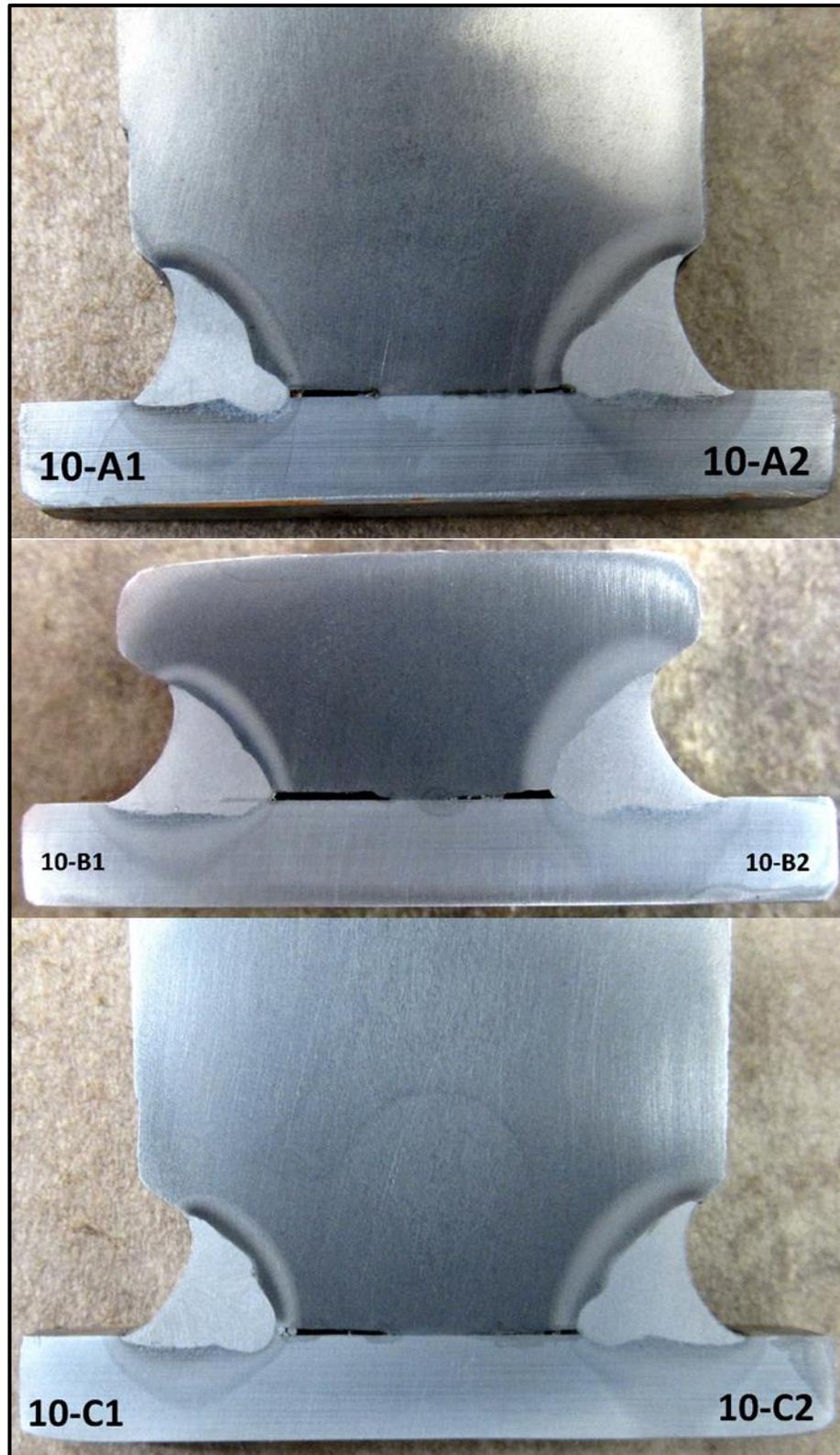
Fonte: O autor (2019)

**APÊNDICE F - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 6 – PARÂMETROS
MODIFICADOS**



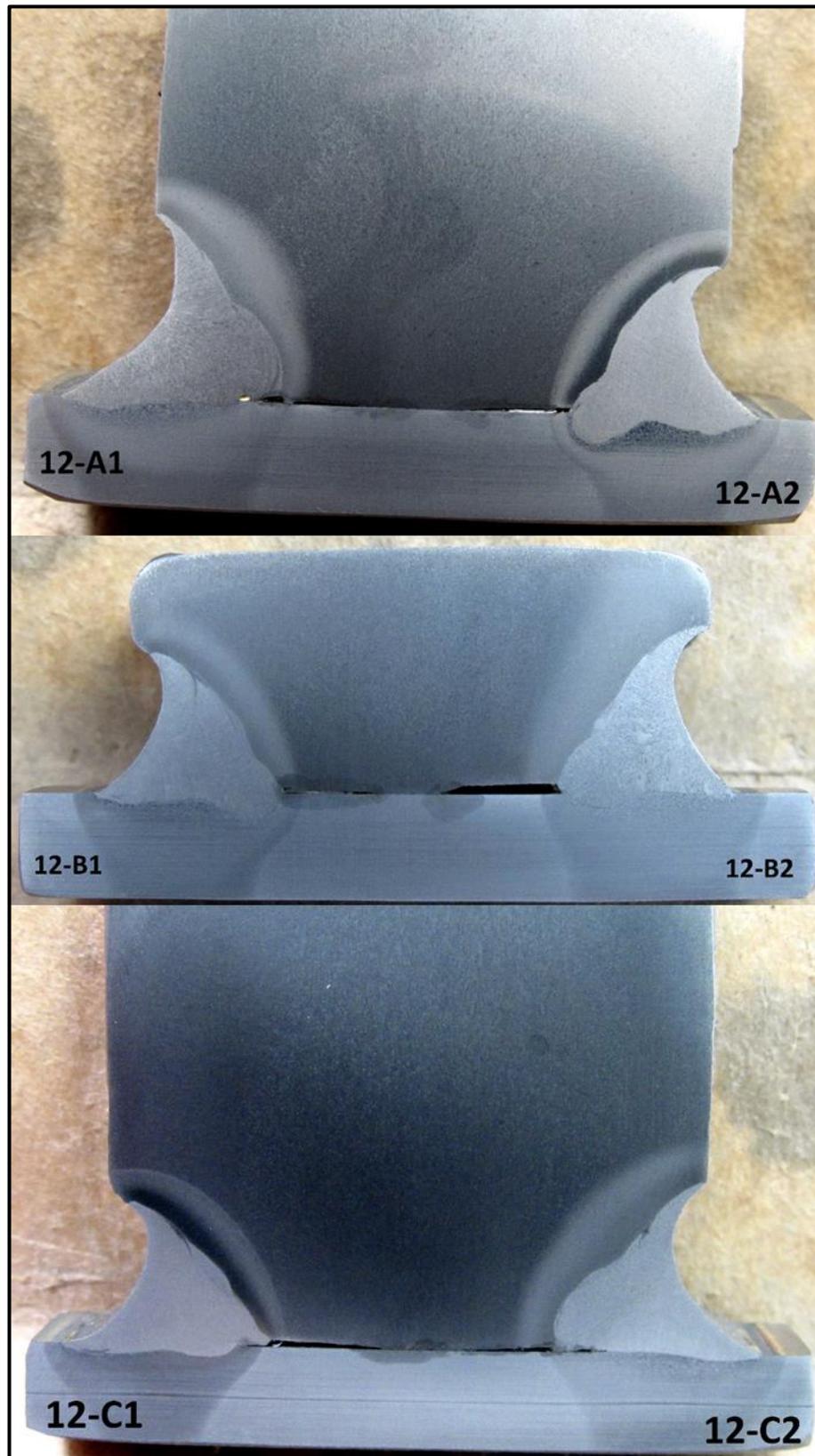
Fonte: O autor (2019)

**APÊNDICE G - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 10
PARÂMETROS E SEQUÊNCIA MODIFICADOS**



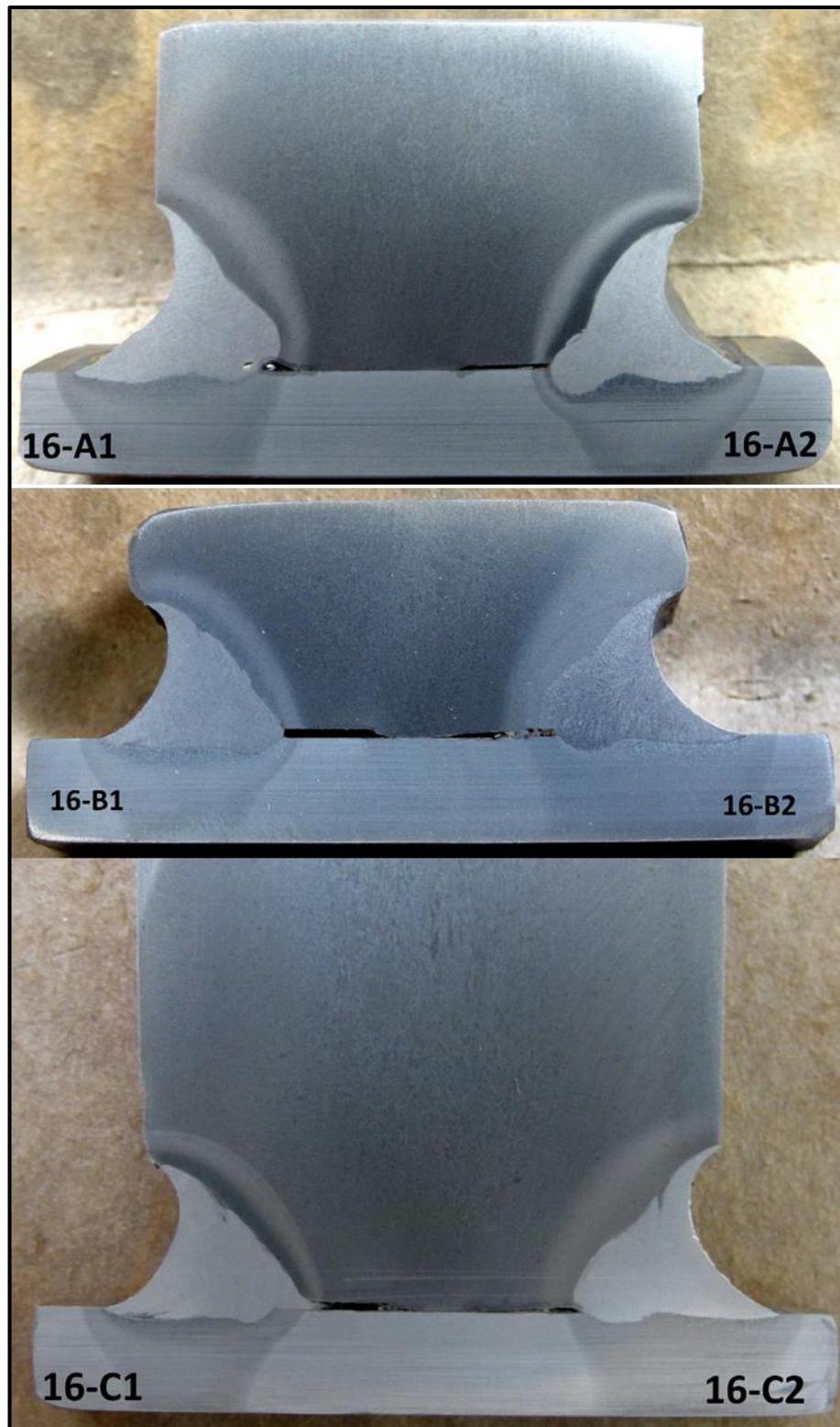
Fonte: O autor (2019)

**APÊNDICE H - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 12
PARÂMETRO ATUAL E SEQUÊNCIA MODIFICADA**



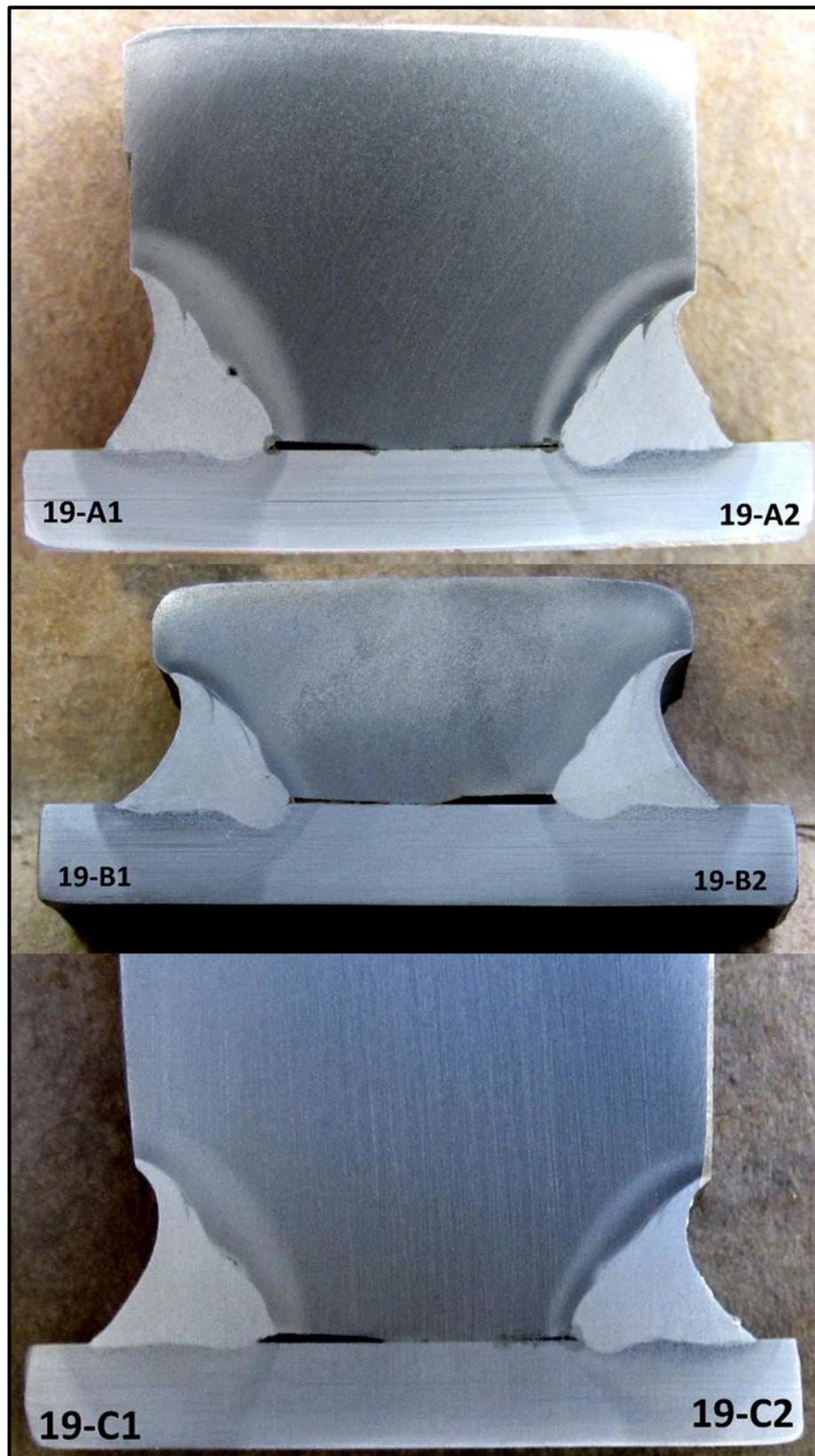
Fonte: O autor (2019)

**APÊNDICE I - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 16
PROCESSO ATUAL COM PÓS AQUECIMENTO**



Fonte: O autor (2019)

**APÊNDICE J - MACROGRAFIA DA AMOSTRA 19 - PROCESSO ATUAL
E SEQUÊNCIA MODIFICADA COM PÓS AQUECIMENTO**



Fonte: O autor (2019)

**APÊNDICE K – ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE PROCESSO ATUAL E
MÉTODO COM REDUÇÃO DO APORTE TÉRMICO**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes			Ponto B
	Processo atual	Redução do aporte térmico	
Média	0,078457141	0,046971428	
Variância	0,001339129	0,000277658	
Observações	3		3
Hipótese da diferença de média	0		
gl	3		
Stat t	1,356275109		
P(T<=t) uni-caudal	0,134030185		
t crítico uni-caudal	2,353363435		
P(T<=t) bi-caudal	0,268060371		
t crítico bi-caudal	3,182446305		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes			Ponto C
	Processo atual	Redução do aporte térmico	
Média	0,089166662	0,055666665	
Variância	0,000586583	0,000336083	
Observações	3		3
Hipótese da diferença de média	0		
gl	4		
Stat t	1,910218255		
P(T<=t) uni-caudal	0,06435677		
t crítico uni-caudal	2,131846786		
P(T<=t) bi-caudal	0,128713539		
t crítico bi-caudal	2,776445105		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes			Ponto D
	Processo atual	Redução do aporte térmico	
Média	0,112876183	0,075361902	
Variância	0,000129948	0,000111963	
Observações	3		3
Hipótese da diferença de média	0		
gl	4		
Stat t	4,177626796		
P(T<=t) uni-caudal	0,006972498		
t crítico uni-caudal	2,131846786		
P(T<=t) bi-caudal	0,013944997		
t crítico bi-caudal	2,776445105		

Fonte: O autor (2019)