

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

ANDRÉ PISCHKE BACCIN

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES EM COMPONENTES ESTRUTURAIS DE UMA
CARROCERIA DE ÔNIBUS CAUSADAS PELO PROCESSO DE SOLDA**

CAXIAS DO SUL
2021

ANDRÉ PISCHKE BACCIN

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES EM COMPONENTES ESTRUTURAIS DE UMA
CARROCERIA DE ÔNIBUS CAUSADAS PELO PROCESSO DE SOLDA**

Trabalho de conclusão de curso (MEC0291) apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador Prof.: MSc. Eng. Victor Hugo Velazquez Acosta

CAXIAS DO SUL

2021

ANDRÉ PISCHKE BACCIN

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES EM COMPONENTES ESTRUTURAIS DE UMA
CARROCERIA DE ÔNIBUS CAUSADAS PELO PROCESSO DE SOLDA**

Trabalho de conclusão de curso (MEC0291) apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de fabricação.

APROVADO EM 24/06/2021

Banca examinadora:

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

Prof. MSc. Eng. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. MSc. Eng. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho significa o final de um ciclo que teve início no ano de 2013. Durante esse período, inúmeras pessoas estiveram presentes:

Meus pais que fizeram todos os esforços possíveis para que nunca faltasse algo e que colocaram a felicidade dos filhos acima das suas.

A todos os professores que estiveram presente ao longo dessa caminhada, em especial o professor MSc. Eng. Victor Hugo Velazquez Acosta, orientador desse trabalho, pelo seu conhecimento, dedicação e comprometimento.

A empresa Marcopolo que permitiu a realização do trabalho e disponibilizou os recursos necessários.

Aos meus colegas, amigos e familiares que sempre torceram para o meu sucesso.
Meus sinceros agradecimentos

RESUMO

Neste trabalho, foi estudada a distorção causada pelo processo de solda na carroceria de ônibus. As distorções em peças soldadas alteram o dimensional que, quando fora das tolerâncias estabelecidas em projeto, traz consequências negativas na linha de montagem. O objetivo foi a obtenção de técnicas de baixo custo, que podem ser usadas em linhas de produção, visando controlar e reduzir a variação dimensional resultante do processo de soldagem em componentes estruturais de uma carroceria de ônibus, validando através de medições dimensionais. No estudo, foram aplicadas 6 metodologias de soldagem em um corpo de prova que representava a região de união do casulo estrutural de uma carroceria com o chassi. A primeira metodologia, com os padrões atuais da empresa Marcopolo, foi utilizada como referência. As metodologias propostas para a diminuição das distorções incluíam a execução da solda com o corpo de prova fixo em um gabarito, alteração da sequência de soldagem e um volume de solda maior nas arestas próximas ao centro. Verificou-se que a alteração de sequência de soldagem proposta não trouxe redução das distorções, enquanto a soldagem do corpo de prova com um gabarito que limitou os movimentos e a aplicação de um volume maior de soldagem apresentaram menores valores de distorções. A metodologia que combinou as técnicas de utilização de um gabarito e maior volume de soldagem foi a que apresentou os melhores resultados. Todas as situações propostas podem ser aplicadas em linha de montagem e requerem pouco valor de investimento comparado com os ganhos operacionais e de qualidade.

Palavras chaves: Soldagem. GMAW. Distorções. Ônibus.

ABSTRACT

The present study analyses the distortion caused in a bus body by the welding process. Distortions in welded parts change the dimensional which has negative consequences on the assembly line when it exceeds tolerances established in the project. The main objective was to obtain low-cost techniques that can be used in production lines, aiming to control and reduce the dimensional variation which results from the welding process in structural components of a bus body, validating through dimensional measurements. Six welding methodologies were applied to a specimen that represented the region where the bus body joins the chassis. Marcopolo's current standards was used as the reference methodology. The proposed methodologies in order to reduce distortions included performing the weld with the specimen fixed in a template, changing the welding sequence and using a larger weld volume on the edges close to the center. It was found that the change in the proposed welding sequence did not reduce distortions, while welding the specimen with a template limiting movements and the application of a larger welding volume presented lower distortion values. The best results were shown by a methodology combining the techniques of using a template and increasing the volume of welding. All proposed situations can be applied on the assembly line and require little investment value compared to the operational and quality gains.

Keywords: Welding. GMAW. Distortions. Bus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de soldagem GMAW	17
Figura 2 – Posições de soldagem para soldas de topo	18
Figura 3 – Esquema de equipamentos para a soldagem MIG/MAG.....	18
Figura 4 – Ciclo térmico de soldagem.....	22
Figura 5 – Regiões de uma solda GMAW	23
Figura 6 – Esquema das três barras	25
Figura 7 – Diagrama das tensões internas em função da temperatura	26
Figura 8 – Comparação entre tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras e numa solda de topo por fusão	27
Figura 9 – Evolução da deflexão longitudinal de um corpo	27
Figura 10 – Tipos de distorções em soldagem.....	28
Figura 11 – Distorção angular em uma junta com restrição	30
Figura 12 – Volume de solda para chanfros em “V” e “X”	33
Figura 13 – Número de passes numa junta	33
Figura 14 – Solda próxima à linha neutra.....	34
Figura 15 – Sequência de soldagem em um chanfro simétrico	34
Figura 16 – Peças pré-deformadas.....	35
Figura 17 – Distribuição t de <i>student</i> para um teste bilateral.....	37
Figura 18 – Fluxograma de trabalho	38
Figura 19 – Acoplamento.....	39
Figura 20 – União da carroceria com o chassi	40
Figura 21 – Espaçamento entre a estrutura e o chassi	40
Figura 22 – Máquina de solda.....	41
Figura 23 – Corpo de prova	42
Figura 24 – Montagem do corpo de prova no gabarito de medição.....	43
Figura 25 – Dimensões avaliadas	44
Figura 26 – Ordem de soldagem dos todos	44
Figura 27 – Sequência de soldagem.....	45
Figura 28 – Arestas com maior volume de solda	46
Figura 29 – Gabarito de medição montado em uma bancada.....	47
Figura 30 – Medidas avaliadas no gabarito.....	47
Figura 31 – Corpo de prova montado no gabarito antes da soldagem	48
Figura 32 – Distribuição normal para os valores de W	49
Figura 33 – Espaçamento entre o corpo de prova e o gabarito.....	50
Figura 34 – Medição do corpo de prova.....	51

Figura 35 – Registro dos valores de distorções	51
Figura 36 – Corpo de prova com restrição de movimento	52
Figura 37 – Comportamento do corpo de prova.....	53
Figura 38 – Somatório da deflexão em relação à linha de referência.....	56
Figura 39 – Somatório da deformação em Y.....	57
Figura 40 – Deformação no eixo x para todas as amostras	59
Figura 41 – Valores encontrados para W.....	60
Figura 42 – Teste de hipótese	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Técnicas avaliadas.....	46
------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem	41
Tabela 2 – Lista de tubos.....	42
Tabela 3 – Medidas do gabarito.....	48
Tabela 4 – Dimensões do conjunto antes do processo de solda.....	48
Tabela 5 – Média dos valores pré solda.....	49
Tabela 6 – Medições do corpo de prova para o primeiro processo de soldagem.....	51
Tabela 7 – Medições do corpo de prova para o segundo processo de soldagem	52
Tabela 8 – Medições do corpo de prova para o terceiro processo de soldagem.....	54
Tabela 9 – Medições do corpo de prova para o quarto processo de soldagem.....	54
Tabela 10 - Medições do corpo de prova para o quinto processo de soldagem.....	55
Tabela 11 - Medições do corpo de prova para o sexto processo de soldagem	55
Tabela 12 – Deformação no eixo x para todas amostras	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	<i>American Welding Society</i>
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem
<i>et al.</i>	e outros
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
gl	graus de liberdade
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
mm	milímetros
ms	milissegundos
RN	Região de Não Rejeição
RC	Região Crítica
S.A.	Sociedade Anônima

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Energia térmica (J)
ΔV	Queda de potencial no arco (V)
I	Corrente elétrica (A)
t	Tempo de operação (s)
H	Energia de soldagem (J/mm)
η	Eficiência térmica do processo
V	Tensão no arco (V)
v	Velocidade de soldagem (mm/s)
°C	Graus Celsius
T_p	Temperatura de pico (°C)
T_c	Temperatura crítica (°C)
t_c	Tempo de permanência acima da temperatura crítica (s)
ϕ	Velocidade de resfriamento
Δt	Tempo de resfriamento (s)
T	Temperatura (°C)
T_f	Temperatura de fusão (°C)
σ_x	Tensão longitudinal (MPa)
δ_t	Distorção final
S	Contração transversal estimada (mm)
A_w	Área da secção transversal da solda (mm ²)
b	Espessura da chapa ou peça soldada (mm)
d	Abertura da raiz do chanfro (mm)
ΔL	Contração longitudinal (mm)
L_s	Comprimento da solda (mm)
δ	Distorção estimada (mm)
Φ	Varição angular (radianos)
L	Comprimento do vão (mm)
x	Distância da linha de centro da estrutura até o ponto onde a deformação é medida (mm)
H0	Hipótese nula
H1	Hipótese alternativa
X	Média amostral
s	Desvio padrão
n	Número de elementos da amostra
α	Nível de significância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	SOLDAGEM GMAW	17
2.1.1	Equipamentos.....	18
2.1.2	Consumíveis	19
2.2	TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA SOLDAGEM GMAW.....	20
2.3	CICLOS TÉRMICOS E SEUS EFEITOS NA SOLDAGEM.....	21
2.3.1	Distribuição do calor	22
2.3.2	Zonas termicamente afetadas pelo calor	23
2.4	TENSÕES RESIDUAIS	24
2.4.1	Desenvolvimento de tensões residuais	25
2.5	DISTORÇÕES.....	27
2.5.1	Tipos de distorções de soldagem	28
2.6	PREVENÇÃO E CONTROLE DE DISTORÇÕES.....	30
2.6.1	Controle e alívio de tensões residuais.....	30
2.6.2	Controle e correção da distorção	32
2.7	TESTES DE HIPÓTESES	36
2.7.1	Teste <i>t</i> de <i>student</i>.....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1	CASO DE ESTUDO.....	39
3.2	MÉTODO PROPOSTO.....	41
3.2.1	Processo e parâmetros de soldagem.....	41
3.2.2	Corpo de prova	42
3.2.3	Metodologia	43
4	RESULTADOS.....	47
4.1	SOLDAGEM UTILIZANDO OS PADRÕES DA MARCOPOLO	50
4.2	SOLDAGEM NO GABARITO COM A RETIRADA NA SEQUÊNCIA.....	52
4.3	SOLDAGEM NO GABARITO COM A RETIRADA APÓS O RESFRIAMENTO..	53
4.4	ALTERAÇÃO NA SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM	54
4.5	SOLDAGEM COM MAIOR VOLUME APLICADO NAS ARESTAS CENTRAIS .	54

4.6	SOLDAGEM NO GABARITO COM MAIOR VOLUME DE SOLDA	55
4.7	DEFLEXÃO EM RELAÇÃO À LINHA DE REFERÊNCIA.....	56
4.8	ANÁLISE GRÁFICA.....	57
4.9	TESTE DE HIPÓTESE	60
4.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
5	CONCLUSÃO	63
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	APÊNDICE A – TESTE DE HIPÓTESE COMPARANDO A METODOLOGIA DE REFERÊNCIA COM AS OUTRAS PROPOSTAS	67
	ANEXO A – TABELA T DE STUDENT	68

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem a arco elétrico está presente em grande escala na fabricação de carrocerias de ônibus, sendo mais utilizado na montagem estrutural e no acoplamento. Todo o produto inicia em uma estrutura metálica que é acoplada em um chassi antes de seguir na linha de produção, onde são montados todos os outros componentes.

As altas variações de temperaturas localizadas na região soldada fazem com que surjam tensões residuais, resultando em mudanças de dimensionamento (distorções) e também levando ao empenamento do conjunto. Quando o projeto é feito em *softwares* 3D, as distorções não são levadas em consideração, assim o dimensionamento final, na prática, difere do projeto inicial, sendo difícil obter as tolerâncias pré-estabelecidas.

As variações dimensionais no início do processo podem passar despercebidas. Entretanto, no momento de montagem de componentes seguintes que não conseguem absorver essa variação, como por exemplo as peças externas de acabamento, tem-se consequências de retrabalho ou montagens fora de posição, afetando a qualidade do produto.

A Marcopolo S.A., fundada em 1949, é uma multinacional brasileira, sediada em Caxias do Sul, com fábricas no Brasil e em 13 países no exterior, sendo referência na fabricação de carrocerias para ônibus. Dentre os produtos fabricados estão os modelos rodoviários, urbanos, micros e minis.

A empresa é líder no mercado brasileiro. No ano de 2019, o volume de vendas no Brasil representou uma participação de 49,8% do mercado total, sendo fabricadas 15.741 unidades, das quais 13.300 produzidas no Brasil. Já no ano de 2018, foram produzidas 16.103 unidades, com uma maior participação no mercado internacional.

A Marcopolo busca obter, através de simulações e testes práticos, um produto que apresente uma durabilidade de 10 anos em terrenos diversos. Por esse motivo, a solda tem grande responsabilidade, uma vez que, se feita de forma errônea, é responsável por trincas e quebras do produto durante a sua utilização.

O presente trabalho foi desenvolvido na área da engenharia da empresa Marcopolo, na unidade de Ana Rech, em Caxias do Sul, com apoio da engenharia de processos e da equipe do protótipo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Ao realizar a solda entre tubos ou um tubo em uma chapa, tem-se uma distorção do produto final. As montagens dos conjuntos podem ser realizadas em um gabarito, quando se tem a posição final dos componentes já preestabelecida, ou em uma bancada, onde as peças

estão livres para se movimentar. Quando montado em um gabarito, o empenamento faz com que o conjunto contraia, prendendo-se ao mesmo e dificultando a retirada.

A carroceria do ônibus pode chegar a 15 metros de comprimento (não considerando os ônibus articulados). Variações dimensionais, quando dentro das tolerâncias pré-estabelecidas, podem ser absorvidas, não influenciando no processo de montagem. Porém, quando as distorções, causadas pela soldagem, alteram o dimensional de projeto, acima do admissível, tem-se como resultado consequências negativas na linha de produção. As distorções são mais evidentes em montagens de maior dimensional.

No acoplamento, quando a carroceria encontra o chassi, tubos soldados que apresentam ângulo entre eles têm esse ângulo aumentado ou diminuído devido à contração da solda, o que resulta em um posicionamento final errado dos tubos.

Ainda utilizando como exemplo o acoplamento do chassi, tubos fora da posição de projeto representam um retrabalho na linha. A preparação do chassi é feita em um posto, onde são colocadas chapas soldadas nas longarinas e nas asas do chassi. No posto do acoplamento, antes do posicionamento da carroceria estrutural junto ao chassi, o mesmo é nivelado, com auxílio de garras que empurram o chassi para cima, tirando o contato dos pneus do solo. Dessa forma, o chassi se torna uma referência de posicionamento.

Quando um tubo do casulo não encontra as chapas soldadas no chassi, pois apresenta variação dimensional, o operador tem que usar grampos para colocar o tubo na posição de projeto, diminuindo a velocidade de montagem e podendo resultar em um acidente de trabalho.

Com a finalidade de aumentar os lucros, a Marcopolo criou campanhas internas nas quais tem como objetivo a redução do número de acidentes e aumento de produtividade. No ano de 2019, a empresa chegou a atingir uma eficiência de produção de 70%. Dentro dos indicadores de produtividade está o retrabalho, portanto a empresa busca mecanismos que tragam retorno de velocidade de produção para aumentar seus valores de eficiência.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Obter técnicas de baixo custo, que podem ser usadas em linhas de produção, visando controlar e reduzir a variação dimensional resultante do processo de soldagem em componentes estruturais de uma carroceria de ônibus, validando através de medições dimensionais.

1.2.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de garantir que o objetivo geral seja atendido, os seguintes objetivos específicos são previstos:

- a) Estudar as variáveis envolvidas no processo de soldagem e suas influências na distorção e no empenamento;
- b) Propor e testar metodologias que tenham como objetivo diminuir as distorções causadas pelo processo de solda;
- c) Desenvolver um corpo de prova representativo para aplicar as metodologias indicadas;
- d) Desenvolver um critério de avaliação dimensional;
- e) Verificar a viabilidade de implementação dos resultados.

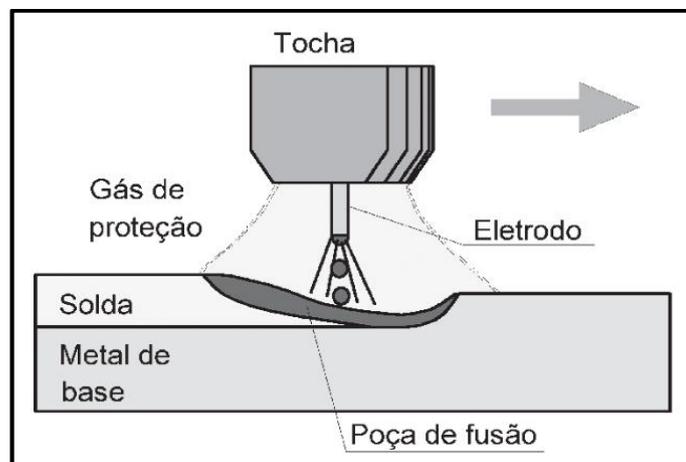
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica, sendo baseado em referências bibliográficas envolvendo o processo de soldagem, mais especificamente o processo (GMAW) *Gas Metal Arc Welding*. São abordados os princípios básicos do processo, os fatores térmicos envolvidos, as distorções resultantes da solda e as possíveis soluções.

2.1 SOLDAGEM GMAW

O processo de soldagem GMAW consiste na união de peças metálicas através do aquecimento destas com um arco elétrico visível estabelecido entre um eletrodo metálico consumível, alimentado continuamente, e a peça de trabalho. O metal fundido na ponta do eletrodo, resultante do calor causado pelo arco elétrico, transfere-se para a peça, criando uma poça de fusão, como pode ser visto na Figura 1. A proteção do arco e a região soldada, contra a contaminação atmosférica, é feita por um fluxo de gás que pode ser inerte (MIG – *Metal Inert Gas*) ou ativo (MAG – *Metal Active Gas*). (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

Figura 1 – Processo de soldagem GMAW

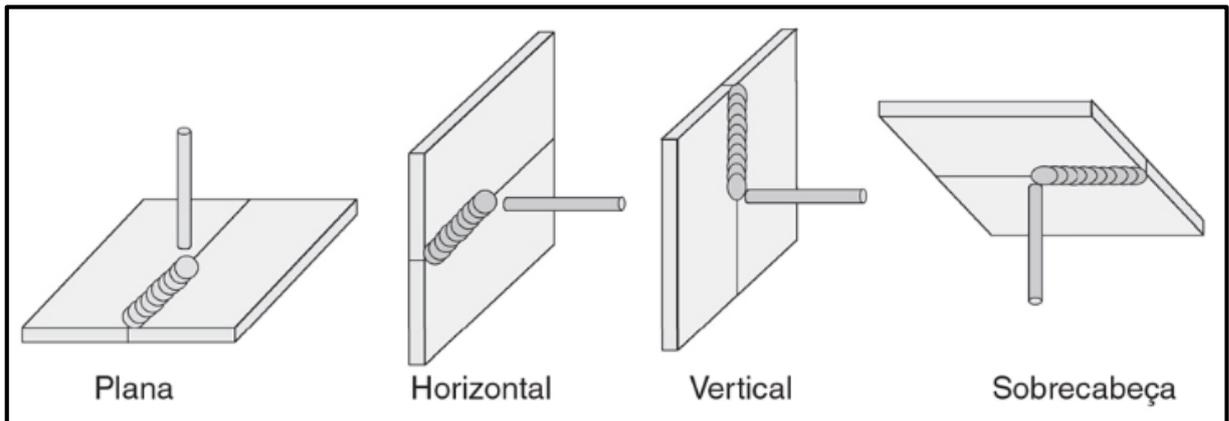


Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

Dentre as vantagens do processo, pode-se destacar a execução da soldagem com facilidade em todas as posições, alimentação contínua do eletrodo, velocidade elevada, não formação de escória e elevada taxa de deposição. Entre as limitações estão: maior velocidade de resfriamento, o que aumenta a ocorrência de trincas; projeção de gotículas de metal líquido durante o processo; grande emissão de raios ultravioletas e um equipamento mais complexo e caro, quando comparada o processo de solda por eletrodo revestido. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

A Figura 2 mostra as possíveis posições de soldagem, podendo ela ser plana, horizontal, vertical ou sobrecabeça. A soldagem na vertical pode ser executada na direção ascendente ou descendente. A posição plana é a mais fácil de ser executada e a que apresenta uma maior produtividade.

Figura 2 – Posições de soldagem para soldas de topo

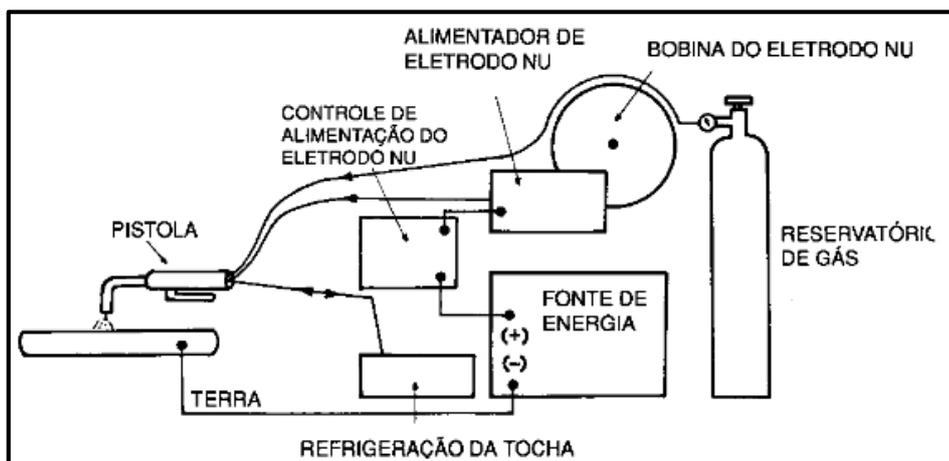


Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

2.1.1 Equipamentos

O equipamento utilizado para a soldagem GMAW é composto de uma fonte de energia, um alimentador de eletrodo, uma tocha de soldagem (pistola) e um reservatório de gás, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Esquema de equipamentos para a soldagem MIG/MAG



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

Para que a solda com eletrodo consumível seja estável, é necessário que a velocidade de fusão seja igual a velocidade de alimentação, fazendo com que o arco

mantenha um comprimento constante. Existem duas alternativas para atingir esse objetivo: permitir que o equipamento controle a velocidade de alimentação ou manter a velocidade de alimentação constante e permitir variações no processo. (QUITES, 2002)

No primeiro caso, trabalha-se com uma fonte do tipo corrente constante, contendo um alimentador de arame que apresenta velocidade variável controlada pelo equipamento com a finalidade de manter o comprimento do arco estável. Por exemplo, quando a tocha é afastada da peça, provocando um aumento do arco de soldagem, a tensão do arco irá aumentar, ficando maior que a tensão de referência, resultando num aumento momentâneo da velocidade de alimentação. (QUITES, 2002)

No segundo caso, utiliza-se uma fonte do tipo tensão constante e uma velocidade de alimentação do eletrodo também constante, assim, o comprimento do arco tende a se manter estável. A variação do comprimento do arco, acompanhada de variação de tensão, causam variações na corrente de soldagem. Quando o arco está maior que o valor de equilíbrio, a corrente será reduzida, de modo que a velocidade do consumo cairá e o comprimento do arco voltará ao tamanho original. (QUITES, 2002)

2.1.2 Consumíveis

Os principais consumíveis utilizados na soldagem GMAW são o arame eletrodo e o gás de proteção.

De acordo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), os arames são constituídos de metais ou ligas metálicas que apresentam composição química, dureza, condições superficiais e dimensões controladas. Os arames possuem, em sua maioria, uma camada de cobre como revestimento, a qual é responsável por proteger o arame contra a corrosão e melhorar o contato elétrico entre este e o bico de contato na tocha.

Eletrodos de menor diâmetro apresentam maior taxa de deposição e penetração quando comparados com um de maior diâmetro nas mesmas condições de soldagem. Já os eletrodos com maior diâmetro originam cordões mais longos. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

Os gases utilizados na soldagem podem ser inertes, ativos ou uma mistura dos dois. São considerados gases inertes o argônio e o hélio ou uma mistura dos dois, e, para os ativos, considera-se o (CO₂) dióxido de carbono puro ou com adições de oxigênio e/ou argônio.

Gases inertes puros são usados para a soldagem de metais não ferrosos, como alumínio, magnésio e titânio. A adição de pequenas quantidades de gases ativos melhora a estabilidade do arco e a transferência de metal. Os gases ativos são utilizados para a soldagem de aço-carbono e aços de baixa liga. A utilização de CO₂ reduz o custo de soldagem. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

Tais gases são os responsáveis por proteger o metal recém fundido da contaminação atmosférica. Também influenciam as características do arco elétrico, a transferência do metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

2.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA SOLDAGEM GMAW

Na soldagem com eletrodo consumível, o metal fundido se transfere da ponta do eletrodo para a poça de fusão. A forma na qual ocorre essa transferência afeta algumas características do processo: a estabilidade do arco, quantidade de gases absorvidos pelo metal fundido, a posição de soldagem e o nível de respingos gerados. Pode-se citar 4 formas básicas de transferência do metal de adição do eletrodo para a peça: transferência por curto-circuito, globular, por aerossol e controlada. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

A transferência por curto-circuito ocorre quando são utilizados baixos valores de tensão e corrente. Comumente utilizado na união de peças de pequena espessura, pode ser usado com qualquer gás de proteção e é apropriado para todas as posições de soldagem. Dentre os pontos negativos, pode-se citar uma penetração não muito grande e, devido à instabilidade do arco elétrico, problemas de respingos. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

A transferência globular se restringe à posição plana. De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992, p. 103), “Este tipo de transferência pode gerar falta de penetração, falta de fusão e/ou reforço do cordão de solda excessivo”. Também é caracterizada por uma quantidade elevada de respingos.

Na transferência por aerossol, a tensão e a corrente são maiores que os outros processos, o que resulta numa maior penetração, com alta taxa de deposição. Existe também uma limitação quanto ao gás de proteção, não ocorrendo com gases altamente ativos. (MACHADO, 1996)

A transferência por aerossol não pode ser usada em chapas finas e não é recomendada para soldagens fora da posição plana devido ao tamanho elevado da poça de fusão, de difícil controle. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

Nas transferências controladas, estão inclusos os modos que podem ser obtidos pelo controle da forma de onda da corrente de soldagem. Tem como objetivo obter uma transferência controlada do metal de adição com as características desejáveis da transferência por aerossol, porém com valores de corrente média mais baixos, permitindo sua utilização na soldagem de chapas finas e fora da posição plana. (QUITES, 2002)

A transferência controlada mais usada é a pulsada, que se assemelha a globular, porém é mais estável e uniforme (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). Segundo Machado (1992), as vantagens desse processo em relação aos convencionais são:

- a) Baixa quantidade de respingos;
- b) Facilidade de abertura do arco;
- c) Possibilidade de realizar solda em chapas de espessura muito finas até grandes;
- d) Aplicação em todas as posições de soldagem;
- e) Maior taxa de deposição;
- f) Melhor qualidade da solda.

2.3 CICLOS TÉRMICOS E SEUS EFEITOS NA SOLDAGEM

Grande parte dos processos de soldagem tem o calor como fonte principal de energia, tornando-o essencial para a execução de uma união soldada. O calor pode ser responsável por alterações indesejadas nas propriedades do material e nos fenômenos mecânicos. Essas alterações ocorrem durante o resfriamento e a solidificação do cordão de solda.

O arco de soldagem transforma energia elétrica em energia térmica e transfere para a peça. Além do calor, o arco gera radiação eletromagnética de alta intensidade, nas faixas do infravermelho, visível e ultravioleta. A energia térmica gerada num arco elétrico pode ser calculada pela Equação 1: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

$$Q = \Delta V \cdot I \cdot t \quad (1)$$

onde: Q é a energia térmica gerada (J);
 ΔV é a queda de potencial no arco (V);
 I é a corrente elétrica no arco (A);
 t é o tempo de operação (s).

De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), uma parte da energia gerada pelo arco elétrico é dissipada para a atmosfera sob a forma de calor irradiante e outra perde-se por convecção nos gases de proteção. O restante é utilizado para a execução da soldagem. Assim, é necessário considerar a eficiência térmica do processo para chegar ao valor de energia usada na soldagem.

A energia de soldagem é expressa conforme a Equação 2: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

$$H = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad (2)$$

onde: H é a energia de soldagem (J/mm);

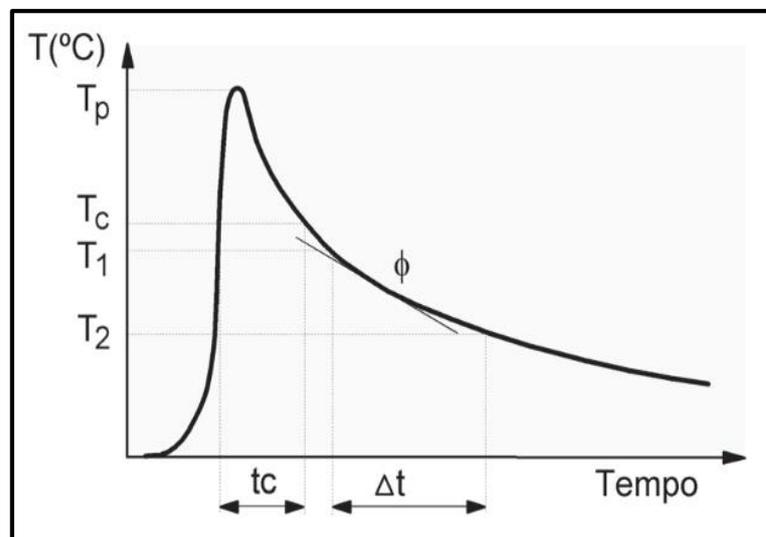
η é a eficiência térmica do processo;
 V é a tensão no arco (V);
 v é a velocidade de soldagem (mm/s).

2.3.1 Distribuição do calor

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), o fluxo de calor na soldagem pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa é quando acontece o fornecimento de calor à junta a ser unida. Já a segunda etapa é a dissipação desse calor, que ocorre principalmente por condução para o restante da peça.

O ciclo térmico de soldagem está representado na Figura 4. O gráfico ilustra, em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), a temperatura de pico (T_p), que é a máxima temperatura obtida no processo, na qual podem ocorrer transformações microestruturais do material, alterando as propriedades finais. A temperatura crítica (T_c) indica a mínima temperatura necessária para que ocorram as transformações microestruturais. O t_c é o tempo de permanência acima da temperatura crítica. O símbolo ϕ representa a velocidade de resfriamento e Δt é o tempo de resfriamento entre as temperaturas T_1 e T_2 .

Figura 4 – Ciclo térmico de soldagem



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

Diversas variáveis influenciam no ciclo térmico de soldagem, entre elas, estão: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

- a) Tipo do metal de base: metais e ligas com condutividade térmica elevada, como o alumínio e o cobre, dissipam o calor da região da solda para o restante da peça mais rapidamente, o que dificulta a formação da poça de fusão. Já materiais que

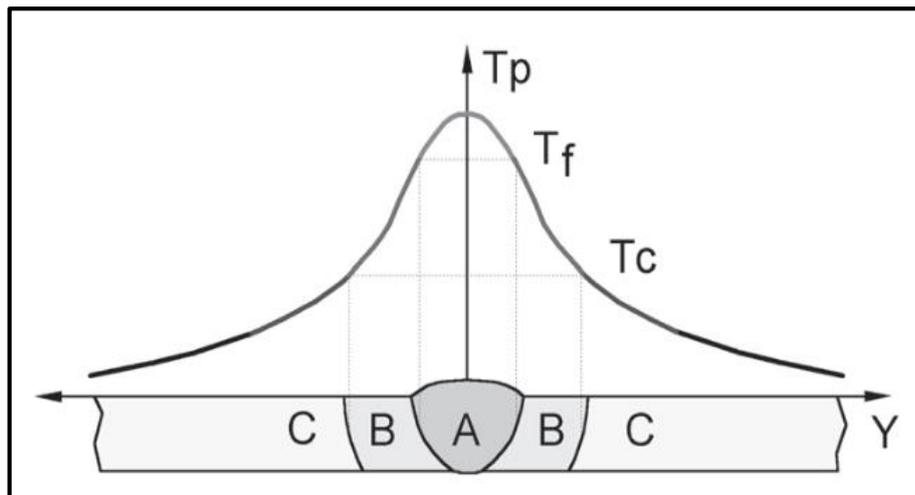
possuem baixa condutividade tendem a atingir maiores temperaturas e menor velocidade de resfriamento, apresentando uma melhor utilização da energia térmica.

- b) Geometria da junta: uniões em ângulo tendem a resfriar mais rapidamente. Uma junta em “T” possui 3 direções para o fluxo de calor, já uma junta de topo possui somente duas.
- c) Espessura da junta: quanto maior a espessura, maior o escoamento de calor da região soldada, acelerando o resfriamento.
- d) Energia de soldagem e temperatura inicial da peça: a velocidade de resfriamento diminui conforme o aumento desses dois parâmetros. A manipulação desses valores permite controlar a velocidade de resfriamento, o que influencia diretamente na microestrutura e propriedades.

2.3.2 Zonas termicamente afetadas pelo calor

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2005), uma junta soldada pode ser decomposta em 3 regiões distintas conforme mostra a Figura 5. A região A representa a zona fundida, a região B é a zona termicamente afetada e a região C é o metal base. Temos como variáveis no gráfico: T_p (temperatura de pico), T_f (temperatura de fusão) e T_c (temperatura crítica).

Figura 5 – Regiões de uma solda GMAW



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

A zona fundida é a região onde o material fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. As temperaturas obtidas nesta região são superiores à temperatura de fusão do metal base.

Na zona termicamente afetada, não ocorre a fundição do metal da base, pois, apesar da temperatura ser maior que a temperatura crítica do material, a temperatura de pico não atingiu a temperatura de fusão. Nessa região, ocorre a alteração da microestrutura e das propriedades do metal de base devido ao ciclo térmico de soldagem.

O metal de base é a região mais afastada do cordão de solda e, por isso, não é afetado pelo processo de soldagem. As suas temperaturas são inferiores às temperaturas críticas do material.

2.4 TENSÕES RESIDUAIS

O processo GMAW é caracterizado por aplicar na região a ser unida um aquecimento intenso. As regiões aquecidas tendem a se dilatar, porém, a dilatação encontra dificuldades, já que a distribuição de temperaturas não é uniforme na peça, o que causa deformações elásticas e, eventualmente, plásticas na região da solda. Como consequência, tem-se, ao final da soldagem, tensões residuais e mudanças permanentes de forma e de dimensões na junta soldada (distorções). (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

As tensões residuais de soldagem resultam da interação da distribuição de temperatura, deformação plástica e alteração microestrutural (PAZOOKI, 2014). As tensões residuais são aquelas que permanecem no corpo após todas solicitações externas serem removidas. Uma das principais causas é a ocorrência de deformação plástica não uniforme ao longo da peça resultante de efeitos térmicos ou mecânicos. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

Como consequência do desenvolvimento de tensões residuais na zona de solda, tem-se a propagação de trincas, maior facilidade para a ocorrência de fadiga ou fratura frágil e perda do controle dimensional. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

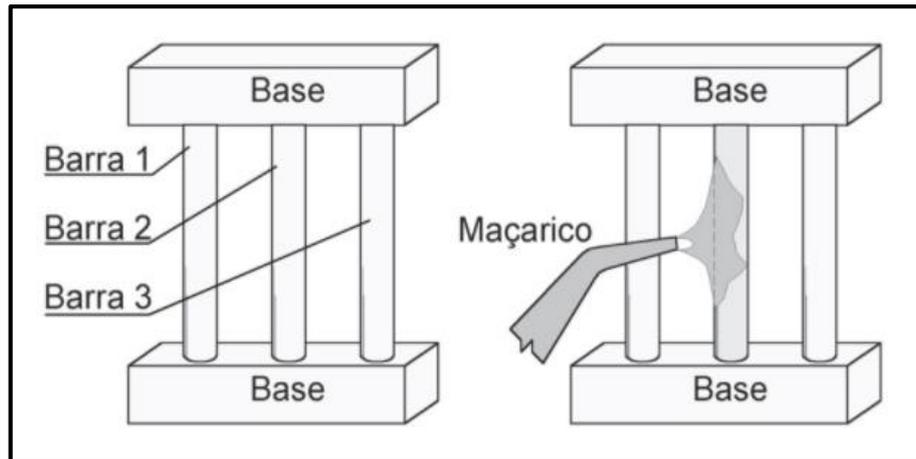
Segundo Mendes et al. (2016), conforme a velocidade de soldagem aumenta, tem-se um crescente valor das tensões residuais. Com velocidades menores de soldagem, é possível alcançar um maior aporte térmico, o que resulta na redução de tensões residuais na região soldada.

Gases de proteção têm influência na magnitude de tensões residuais. Conforme Maia et al. (2019), o acréscimo de CO₂ na composição do gás de proteção faz com que aumente a penetração da solda, influenciando no ciclo de soldagem, podendo resultar em um campo de tensões compressivas na zona termicamente afetada. Tensões compreensivas são benéficas para a junta soldada, enquanto tensões trativas podem ser prejudiciais. Portanto, um aumento da concentração de CO₂ no gás de proteção pode influenciar positivamente na junta soldada.

2.4.1 Desenvolvimento de tensões residuais

Kou (2002) e Marques, Modenesi e Bracarense (2005) explicam o desenvolvimento de tensões residuais considerando o aquecimento e resfriamento sob restrição. A Figura 6 mostra 3 barras idênticas conectadas a dois blocos rígidos.

Figura 6 – Esquema das três barras



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

As 3 barras, inicialmente, estão em temperatura ambiente e nenhuma está sob esforço mecânico (tensões internas nulas). Na etapa seguinte, a barra central é aquecida, porém sua expansão térmica é restringida pelos blocos rígidos e as barras laterais que não sofreram mudança de temperatura. Como consequência, tensões compressivas são produzidas na barra central, que tende a aumentar conforme a temperatura aumenta. A barra deforma-se elasticamente até que as tensões internas atinjam o limite de escoamento em compressão. O limite de escoamento representa o limite superior das tensões que um material suporta antes de começar a deformar plasticamente (deformação permanente).

Mantendo o aquecimento, a dilatação tende a continuar. Porém, como os níveis de tensões internas atingiu o limite de escoamento, a barra central começa a se deformar plasticamente. A deformação continua até que o aquecimento termine. Quando o aquecimento acaba e a barra central resfria, sua contração térmica é contida pelas barras laterais.

Com a diminuição da temperatura, o esforço de compressão sentido pela barra tende a diminuir, até se anular. A anulação ocorre numa temperatura superior à temperatura inicial, porém a temperatura continua a baixar e a barra quer continuar a diminuir de comprimento, entretanto a contração é restringida pelas barras transversais e laterais.

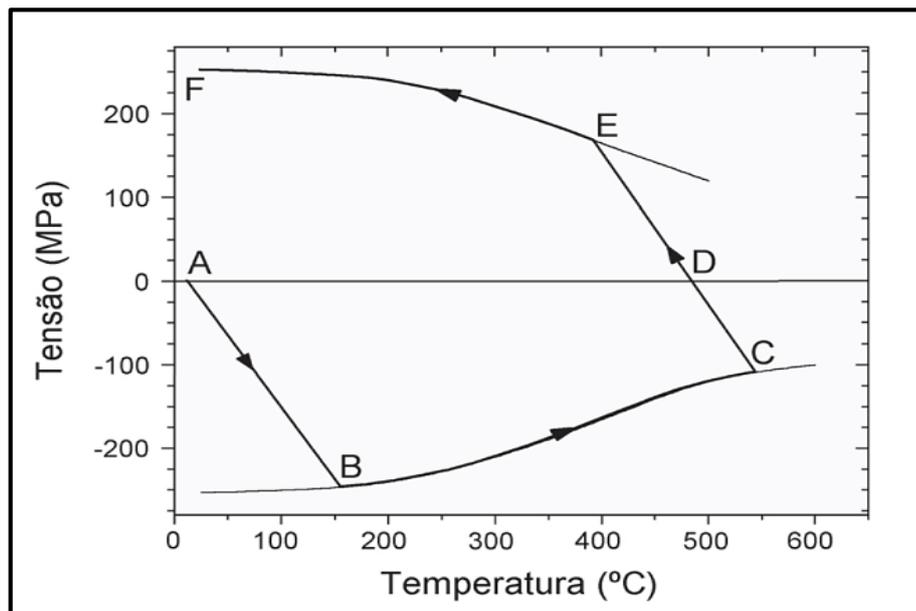
Consequentemente, as tensões compressivas na barra central caem rapidamente e mudam para tensões de tração, que aumentam conforme a temperatura reduz, até que o limite

de escoamento em tração seja alcançado. A partir daí a barra começa a se deformar plasticamente em tração até a temperatura inicial ser atingida.

Como resultado final, a barra central, que não tinha nenhum esforço interno no início, apresenta tensões residuais. Já as barras laterais, para manter o equilíbrio, ficam sujeitas a tensões de compressão iguais à metade da tensão de tração na barra central.

A Figura 7 é um diagrama esquemático das tensões internas em função da temperatura da barra central. O início do processo é no ponto A, onde a temperatura é a ambiente e a tensão interna é nula. O ponto B é quando a barra atinge o limite de escoamento em compressão. O ponto C é o final do aquecimento. O ponto D é quando os esforços de compressão sentidos pela barra se anulam. A temperatura continua caindo até chegar no ponto E, no qual o limite de escoamento em tração é alcançado. O ciclo termina no ponto F, quando a barra atinge a temperatura ambiente.

Figura 7 – Diagrama das tensões internas em função da temperatura

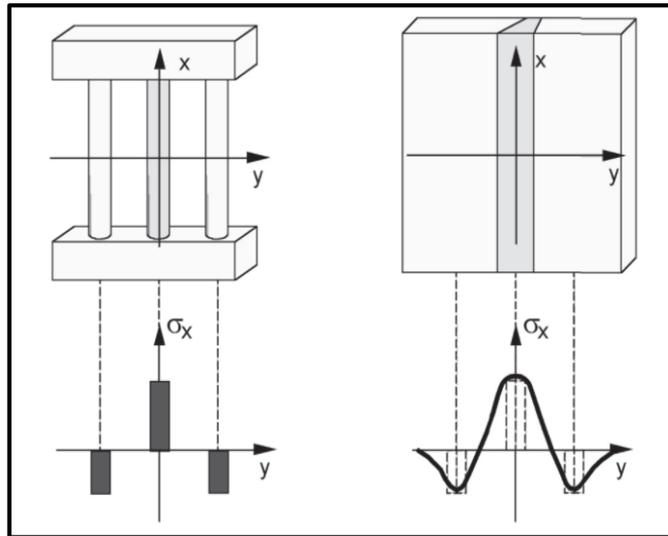


Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

Na soldagem, o cordão de solda se comporta de forma similar à barra central e o metal de base de forma similar às barras laterais. A Figura 8 mostra a distribuição de tensões residuais longitudinais (σ_x) numa junta soldada ao longo da direção transversal de uma solda de topo e compara à com o exemplo das três barras.

A expansão e contração do cordão de solda e do metal de base próximo ao cordão são restringidas pelas áreas mais distantes. Como consequência, após o resfriamento até a temperatura ambiente, existem tensões residuais de tração no cordão de solda e no metal base próximo a ele. Já a área mais afastada apresenta tensões residuais de compressão. (KOU, 2002)

Figura 8 – Comparação entre tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras e numa solda de topo por fusão

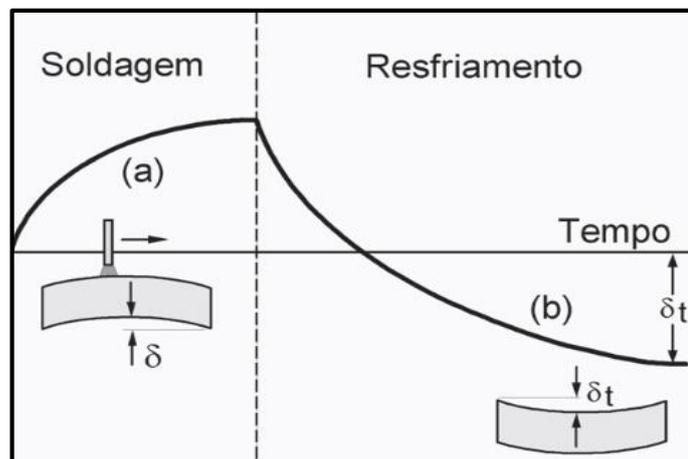


Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

2.5 DISTORÇÕES

Marques, Modenesi e Bracarense (2005) descrevem as distorções em peças soldadas como alterações permanentes de forma e/ou dimensões resultantes da deformação plástica que ocorre no processo de solda. A Figura 9 ilustra a formação de uma distorção. Durante a soldagem, o aquecimento (a), causa uma expansão térmica na região superior da peça, onde se tem a poça de fusão. Ao final da soldagem, com o resfriamento (b) da região soldada, ocorre a contração da peça. Como a região superior sofreu maior deformação plástica pelo aumento da temperatura, a peça apresenta distorção final (δ_i) voltada para a direção oposta da distorção transiente máxima.

Figura 9 – Evolução da deflexão longitudinal de um corpo



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

O estado final de tensões e deformações presentes numa junta soldada depende de diversos fatores. Entre eles estão: o material, as propriedades mecânicas e a espessura das peças, grau de rigidez da estrutura, dimensões, posições, geometria, quantidade e qualidade das soldas. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

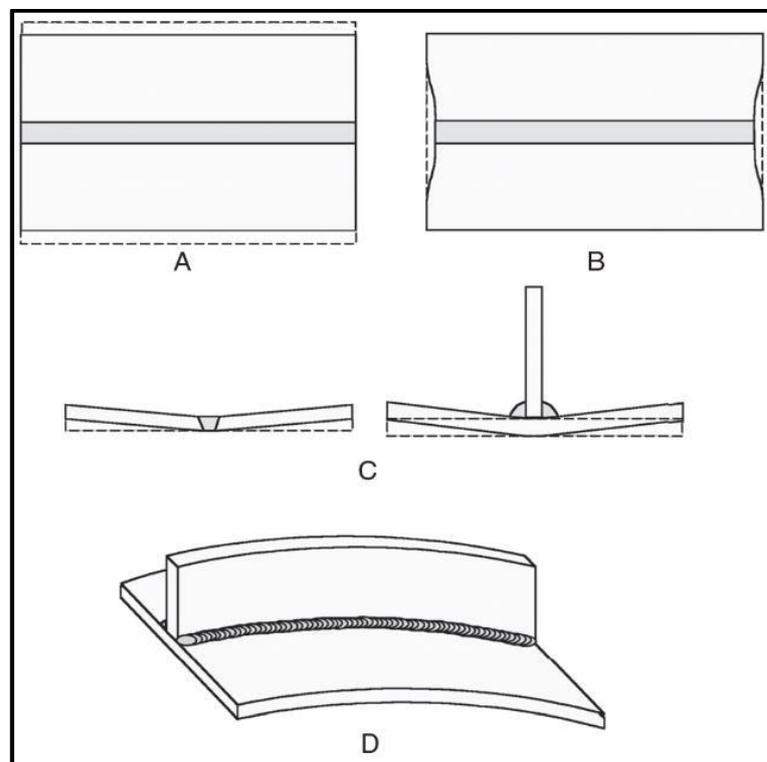
Segundo Pereira e Bracarense (2016), no mínimo 60% da distorção de soldagem em uma junta em “X” ou em “V” ocorre após a extinção do arco durante o resfriamento e, abaixo da temperatura de 110°C, não há variações significativas nos valores de distorção.

2.5.1 Tipos de distorções de soldagem

As distorções de soldagem são mudanças permanentes no corpo soldado. A Figura 10 apresenta os tipos básicos de distorções em soldagem:

- a) Contração transversal;
- b) Contração longitudinal;
- c) Distorção angular;
- d) Deflexão em relação à linha neutra.

Figura 10 – Tipos de distorções em soldagem



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

A contração transversal consiste em uma redução dimensional causada pelo movimento do material em direção à região soldada. Dentre os fatores que influenciam a

contração, estão o grau de restrição da junta e o número de passes usados. Um maior número de passes resulta em um aumento das contrações transversais e distorções angulares. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

A contração transversal em aços ao carbono ou de baixa liga pode ser estimada pela Equação 3: (AWS, 1987)

$$S = 0,2 \cdot \frac{A_w}{b} \cdot 0,05 \cdot d \quad (3)$$

onde: S é a contração transversal estimada (mm);
 A_w é a área da secção transversal da solda (mm²);
 b é a espessura da chapa ou peça soldada (mm);
 d é a abertura da raiz do chanfro (mm).

A contração longitudinal pode ser definida como uma redução do comprimento da estrutura soldada, sendo essa redução não uniforme em toda secção da junta. Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2005), ela pode causar o dobramento de peças soldadas quando feita fora da linha neutra e a distorção por flambagem de chapas finas.

A Equação 4 estima a contração longitudinal: (AWS, 1987)

$$\Delta L = \frac{305 \cdot I \cdot L_s}{b} \cdot 10^{-7} \quad (4)$$

onde: ΔL é a contração longitudinal (mm);
 I é a corrente de soldagem (A);
 L_s é o comprimento da solda (mm);

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), a distorção angular pode ocorrer em soldas de topo e em soldas de filete. Ela ocorre quando a contração transversal não é uniforme ao longo da espessura do componente.

A distorção angular presente na solda de topo ocorre, pois, a solda tende a ser mais larga na parte superior do que na parte inferior da peça, causando uma contração térmica maior no topo. Consequentemente, a distorção angular é para cima. (KOU, 2002)

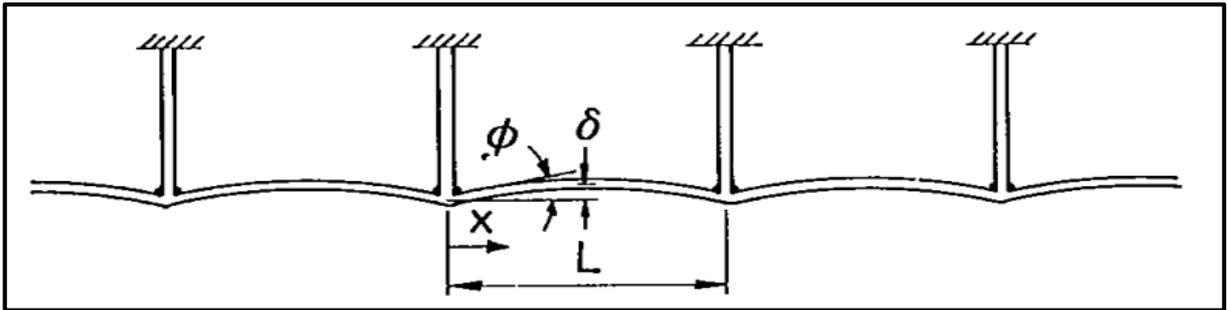
Conforme a espessura da chapa aumenta, aumenta também a distorção angular, pois o volume de metal de solda aumenta, amplificando a contração. (KOU, 2002)

A Equação 5 define a relação entre a variação angular e a distorção estimada. A Figura 11 facilita a visualização da distorção angular e suas variáveis. (AWS, 1987)

$$\frac{\delta}{L} = 0,25 \cdot \phi - \left[\left(\frac{x}{L} \right) - 0,5 \right]^2 \cdot \phi \quad (5)$$

onde: δ é a distorção estimada (mm);
 Φ é a variação angular (radianos);
 L é o comprimento do vão (mm);
 x é a distância da linha de centro da estrutura até o ponto onde a deformação é medida (mm).

Figura 11 – Distorção angular em uma junta com restrição



Fonte: AWS (1987)

2.6 PREVENÇÃO E CONTROLE DE DISTORÇÕES

Existem alguns métodos para controlar a tensão residual e a distorção nas indústrias. Qualquer mudança na distorção tem como consequências mudanças no nível da tensão residual. Diminuições nas distorções podem elevar o nível das tensões. O método escolhido para a redução depende do tipo de distorção a ser reduzida. (PAZOOKI, 2014)

2.6.1 Controle e alívio de tensões residuais

Existem métodos para reduzir o nível de tensões residuais em uma junta soldada, sendo eles a redução da quantidade de calor fornecida à junta ou a quantidade de metal depositado. Tensões residuais também podem ser reduzidas pelo uso de um metal de adição que apresente menores resistências, assim como a redução dos vínculos externos da junta soldada. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

Após a soldagem, as tensões residuais podem ser aliviadas por tratamentos térmicos ou processos mecânicos.

Os tratamentos térmicos consistem em aquecer a peça uniformemente a uma temperatura determinada, durante certo período de tempo, seguido de um resfriamento lento, de maneira que o limite de escoamento do material permaneça a níveis inferiores às tensões residuais. Para impedir mudanças de microestrutura ou dimensões da peça, a temperatura não deve ultrapassar a temperatura crítica do material. (CUNHA, 2013)

Segundo Cunha (2013), para que o tratamento térmico de alívio de tensões seja realizado com sucesso, é necessário que:

- a) A taxa de aquecimento seja uniforme, permitindo a dispersão do calor para o restante do material e evitando o surgimento de tensões residuais devido a efeitos térmicos no material.
- b) A temperatura de tratamento seja controlada, não ultrapassando os limites pré-estabelecidos.
- c) O tempo de permanência na temperatura de tratamento não seja excedido.
- d) A taxa de resfriamento seja uniforme e controlada. Resfriamentos não uniformes podem gerar tensões residuais e altas taxas de resfriamento, podendo temperar o material.

O recozimento a alta temperatura pode eliminar completamente as tensões residuais. O tratamento consiste no aquecimento da peça a 900-950°C (aços ferríticos) durante o tempo necessário para que toda microestrutura se austenitize, seguido de um resfriamento muito lento. A microestrutura resultante nos aços carbono são a perlita grossa e ferrita. (CUNHA, 2013)

As limitações do recozimento são as dificuldades de se obter as altas temperaturas em componentes de grande estrutura e a execução no campo, além do custo elevado. O alívio de tensões a baixas temperaturas pode ser uma solução para grandes estruturas. Nesse caso, o aquecimento do local da solda fica na faixa dos 150-200°C em uma largura total de 60 a 130 mm, porém o alívio de tensões é parcial. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

As interrupções de soldagem na construção naval são inevitáveis devido à geometria e à exaustão do soldador. Foi estudado por Podder et al. (2015), em amostras de aço de 9,53 mm de espessura, as consequências dessas interrupções. O estudo constatou que, conforme o tempo de interrupção aumenta, ocorre um aumento nas tensões máximas de tração longitudinal, enquanto as tensões máximas de compressão longitudinal diminuem.

Segundo Podder et al. (2015), uma interrupção de 2 minutos durante a soldagem de componentes navais de espessura entre 6 e 10 mm produz efeitos semelhantes ao de pré-aquecimento de 200°C. Portanto, a utilização de interrupções pode substituir a necessidade de pré-aquecimento.

O alívio de tensões por processos mecânicos consiste em adicionar tensões na junta soldada, de forma que a solda escoie plasticamente, aliviando as tensões. São aplicados com mais facilidade quando comparados com processos térmicos. Dentre os processos, pode-se citar: vibração, encruamento, laminação e martelamento. (FERREIRA, 1984)

As vibrações são aplicadas na estrutura soldada, causando uma ressonância de baixa frequência. Como resultado, tem-se uma deformação plástica parcial e alívio de

tensões, porém o alívio não é uniforme em toda estrutura. A vibração não é adequada para chapas grossas ou grandes estruturas. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005)

Os tratamentos vibratórios, aplicados na soldagem a arco elétrico de placas de aço inoxidável 304, reduziram as alterações dimensionais em 30%. O alívio de tensões com esse tipo de tratamento é uma opção viável para substituir os tratamentos térmicos. (GARCIA; SALDARRIAGA; ARENAS, 2008)

O martelamento pode ser feito durante ou após o processo de soldagem. Comparado com os outros processos, o martelamento apresenta baixo custo, pois não envolve equipamentos sofisticados e não requer mão de obra qualificada (FERREIRA, 1984). O martelamento pode causar refino de grão e é inadequado para materiais de baixa ductilidade (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

No encruamento, a junta soldada é deformada plasticamente pela aplicação de cargas de tração. Não é adequado para estruturas complexas devido à dificuldade de aplicar tensões uniformes. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Conforme, Cozzolino et. al (2017), assim como os outros processos mecânicos, a laminação induz a deformação plástica positiva, que neutraliza a deformação plástica negativa gerada durante o processo de soldagem. Quanto maior for a carga de rolamento, maior será a tensão residual compressiva.

Foram estudadas duas técnicas de laminação pós-solda: a primeira é a laminação aplicada no topo da solda, por meio de um único rolo, já a segunda técnica utiliza dois rolos ao lado do cordão de solda. Ambos os métodos apresentaram redução da tensão residual, sendo a laminação no topo do cordão mais eficaz e recomendada. (COZZOLINO et al., 2017)

2.6.2 Controle e correção da distorção

Existem medidas que podem ser usadas para reduzir as distorções resultantes do processo de soldagem. Marques, Modenesi e Bracarense (2005), separam em três grupos:

Medidas que podem ser utilizadas no projeto de estruturas soldadas:

- a) Projetar estruturas visando a menor quantidade de solda possível;
- b) Utilizar chanfros que necessitem de menos material de adição;
- c) Usar chanfros simétricos;
- d) Soldar próximo à linha neutra da peça ou em posições simétricas em relação à linha neutra;
- e) Determinar o menor tamanho possível para o cordão de solda ou utilizar a soldagem intermitente.

Medidas que podem ser utilizadas na fabricação:

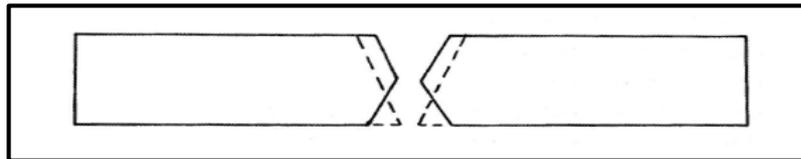
- Estimar a distorção que ocorrerá e posicionar as peças para compensar a futura distorção;
- Utilizar equipamentos para fixar as peças na posição correta, por exemplo, gabaritos;
- Estipular uma sequência de soldagem e de montagem que minimize as distorções.

Medidas utilizada após a soldagem:

- Aquecimento localizado ou aquecimento uniforme e pressão mecânica;
- Deformação a frio: calandragem, prensagem e martelamento;

A Figura 12 mostra o volume de solda utilizada numa junta com chanfro “V” e numa junta chanfro “X”. Numa chapa de mesma espessura, a quantidade de solda depositada numa junta com chanfro “X” é cerca de metade da quantidade depositada na junta em “V”. Outra vantagem é que a solda em ambos os lados possibilita o equilíbrio dos esforços de contração. (CUNHA, 2013)

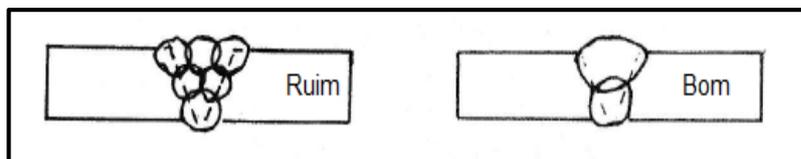
Figura 12 – Volume de solda para chanfros em “V” e “X”



Fonte: Cunha (2013)

Recomenda-se a utilização de poucos passes, como pode ser observado na Figura 13. É preferível a utilização de eletrodos de grandes diâmetros do que muitos eletrodos de pequeno diâmetro. O maior número de passes acumula a contração causada pela solda, resultando numa contração total maior. (CUNHA, 2013)

Figura 13 – Número de passes numa junta

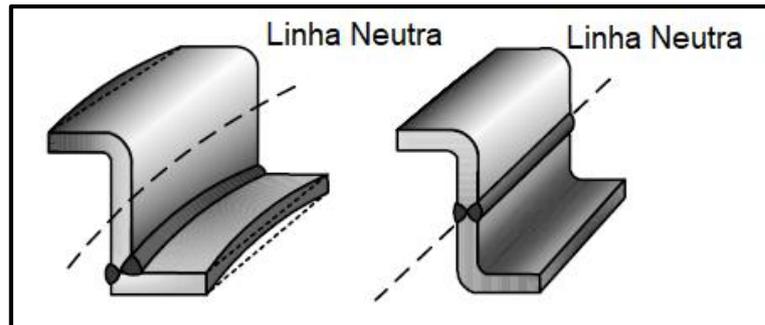


Fonte: Cunha (2013)

Segundo Cunha (2013), a deformação é minimizada quando se consegue o menor braço de alavanca possível. As forças de contração tendem a puxar o perfil para fora do seu alinhamento. A Figura 14 ilustra a diferença de deformação causada por uma solda longe da linha neutra em relação a uma solda na linha neutra.

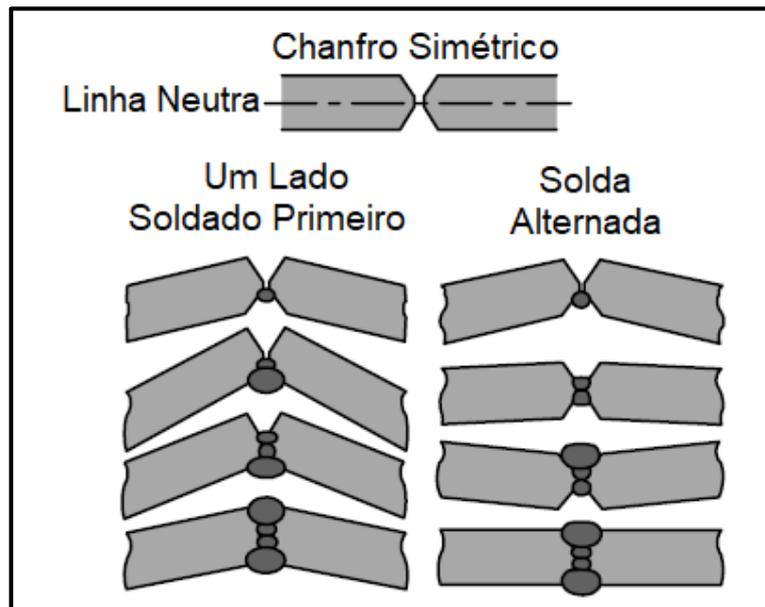
A sequência de soldagem, com intuito de reduzir as distorções, inclui a realização de solda alternada em diferentes pontos do componente. Assim, conforme o conjunto se contrai em uma direção, a mesma será combatida por forças de contração de soldas já executadas. A Figura 15 é um exemplo de soldagem alternada em ambos os lados da linha neutra em uma junta com chanfro simétrico. (KOU, 2002)

Figura 14 – Solda próxima à linha neutra



Fonte: Adaptado de Kou (2002)

Figura 15 – Sequência de soldagem em um chanfro simétrico



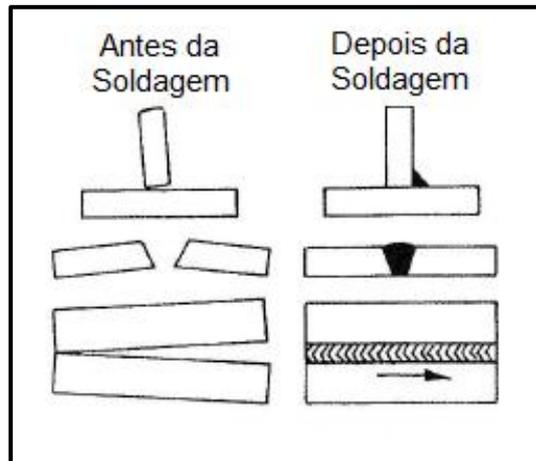
Fonte: Adaptado de Kou (2002)

Em chanfros assimétricos, o lado a ser preenchido por último é o que apresenta o maior volume de metal depositado para compensar a restrição imposta pela primeira solda. (CUNHA, 2013).

A partir de soldas experimentais é possível prever a deformação. Com os dados obtidos, pode-se colocar os componentes a serem soldados fora de posição, fazendo com que

a contração trabalhe de maneira construtiva. A Figura 16 traz exemplos de peças fora de posição.

Figura 16 – Peças pré-deformadas



Fonte: Cunha (2013)

Segundo Xu et al. (2009), a utilização da técnica de impacto eletromagnético sem contato pode reduzir a distorção por flambagem e a tensão residual. A técnica consiste na aplicação de um campo eletromagnético, gerado numa bobina, ao longo da direção de soldagem. A força eletromagnética, quando combinada com a tensão residual de soldagem, contribui para a redução da deformação plástica compressiva longitudinal na região próxima à solda.

Quando comparado com outros métodos de redução de distorções, o impacto eletromagnético apresenta as seguintes vantagens: sem contato com a soldagem e sem limitação de tamanho para as peças. (XU et al., 2009)

Miranda e Bracarense (2007) utilizaram o dióxido de carbono para resfriar a poça de fusão visando diminuir a distorção angular em chapas de aço carbono. A refrigeração foi aplicada num processo de solda de arame tubular contínuo e proteção gasosa (FCAW) *Flux Cored Arc Welding*. Utilizou-se um cilindro de dióxido de carbono conectado a uma mangueira flexível de aço inoxidável. A mangueira foi presa à tocha de soldagem e o bico injetor ficou a uma distância de 25 mm da tocha e a uma altura de 7 mm dos corpos de prova. Como resultado, obteve-se uma diminuição da distorção angular.

Khaybrakhmanov, Korobov e Bilenko (2019) utilizaram o *software* SYSWELD para calcular a deformação de uma chapa fina de aço de alta resistência. A diferença entre os cálculos e os dados experimentais foi de 11%. De acordo com os resultados de cálculo, uma diminuição de 45% nas deformações da placa foi obtida com a utilização de grampos com rigidez variável colocados próximo ao cordão de solda.

2.7 TESTES DE HIPÓTESES

Segundo Fávero e Belfiore (2017), testes de hipóteses são ferramentas estatísticas que tem como objetivo verificar a veracidade ou falsidade de determinada hipótese. Deve-se definir uma hipótese a ser testada, que é chamada de hipótese nula (H0), e uma hipótese alternativa (H1), caso H0 seja rejeitada.

Os testes de hipóteses se dividem em paramétricos e não paramétricos. Os paramétricos formulam hipóteses a partir de dados quantitativos para descrever a população. Já os não paramétricos, as hipóteses são formuladas sobre características qualitativas da população. (FÁVERO; BELFIORE, 2017)

2.7.1 Teste *t* de *student*

O teste *t* de *student* é um teste de hipótese paramétrico, que pode ser utilizado para comparar as médias populacionais de duas amostras aleatórias e independentes, na qual, a variância populacional é desconhecida. (FÁVERO; BELFIORE, 2017)

Duas amostras são consideradas independentes quando os valores amostrais de uma população não estão relacionados com os valores da outra população. (TRIOLA, 2017)

Para aplicação da hipótese, é necessário assumir que as amostras são resultantes de populações que apresentem distribuições normais. (TRIOLA, 2017)

Segundo Triola (2017), a estatística de teste é calculada por meio da Equação 6:

$$t = \frac{(X_1 - X_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (6)$$

onde: X_1 e X_2 são as médias amostrais;

s_1 e s_2 são os desvios padrões amostrais;

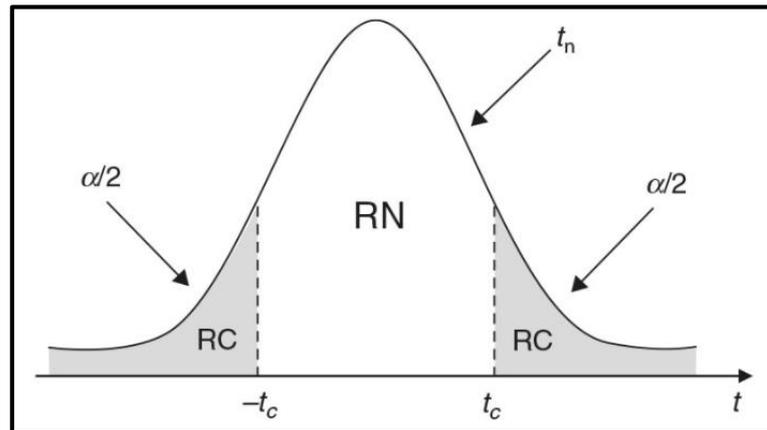
n_1 e n_2 são o número de elementos das amostras.

O resultado deve ser comparado com o valor tabelado da distribuição *t* de *student* (Anexo A). Para determinar o número de (gl) graus de liberdade, utiliza-se a Equação 7: (TRIOLA, 2017)

$$gl = \frac{[(s_1^2 / n_1) + (s_2^2 / n_2)]^2}{\frac{(s_1^2 / n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_2^2 / n_2)^2}{n_2 - 1}} \quad (7)$$

A Figura 17 ilustra a distribuição t de *student* para um teste bilateral. No centro da curva tem-se a (RN) região de não rejeição e nas laterais a (RC) região crítica. O valor crítico de t (t_c) é encontrado na tabela da distribuição t de *student* e α é o nível de significância. (FÁVERO; BELFIORE, 2017)

Figura 17 – Distribuição t de *student* para um teste bilateral



Fonte: Fávero e Belfiore (2017)

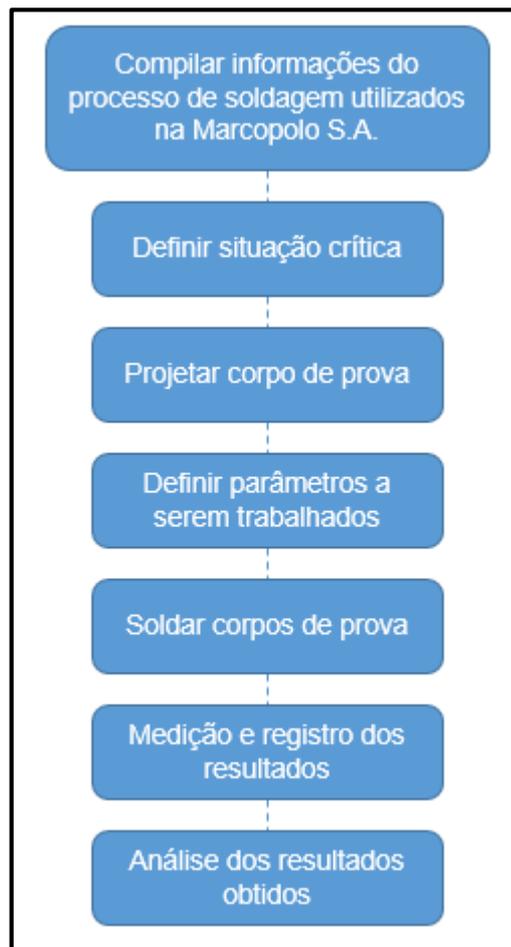
Conforme Fávero e Belfiore (2017), se o valor calculado para t pertencer à região crítica, ou seja, se $t < -t_c$ ou $t > t_c$, o teste oferece condições para rejeitar a hipótese nula. Entretanto se $-t_c \leq t \leq t_c$, não rejeitamos a hipótese nula.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como finalidade apresentar os materiais e métodos que foram utilizados na soldagem de corpos de provas, visando a análise das variações dimensionais resultantes da distorção causada pelo processo. O trabalho foi desenvolvido na área da engenharia da empresa Marcopolo S.A. juntamente com a equipe do protótipo.

O trabalho teve início com a especificação dos parâmetros de solda utilizados na empresa, seguida de uma pesquisa dos tubos mais consumidos na montagem estrutural. Com as informações obtidas, criou-se um corpo de prova representativo de uma região crítica, no qual foi aplicado o processo de solda. As variações que foram aplicadas no processo serão apresentadas no decorrer do capítulo, assim como a técnica para a medição dos resultados. A Figura 18 representa um fluxograma das atividades do trabalho.

Figura 18 – Fluxograma de trabalho



Fonte: O Autor (2020)

3.1 CASO DE ESTUDO

O processo de solda está presente em grande escala na montagem estrutural da carroceria dos ônibus, porém as distorções causadas pelo processo não são consideradas nos projetos. Devido ao grande volume de solda, alguns métodos que apresentem redução das distorções tendem a não ser utilizados devido ao custo de aplicação. Na Marcopolo, já foram estudados *softwares* que auxiliassem na busca de uma sequência de soldagem que apresentasse a menor distorção possível, porém a empresa optou por não comprar.

Um tubo que apresente distorção excessiva pode trazer consequências negativas para o fluxo de trabalho na linha de montagem. Após o processo de solda, quando o dimensional de um conjunto difere daquele que foi projetado, o montador tem que utilizar ferramentas para colocar o tubo na posição prevista. Todo esse trabalho extra traz um custo para a empresa.

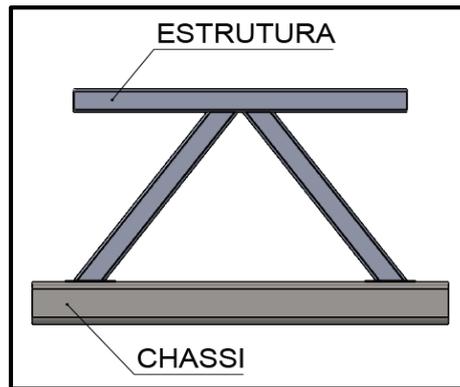
A região da carroceria estudada nesse trabalho é a estrutura que faz a sua união ao chassi. A Figura 19 é uma foto do processo de acoplamento, onde é possível visualizar os tubos da carroceria, em verde, indo de encontro ao chassi, em preto, onde, eles serão soldados. A estrutura desce verticalmente de encontro ao chassi. A foto foi tirada de dentro do bagageiro e o rodado visto na imagem é o rodado traseiro. Já a Figura 20 é uma ilustração simplificada dessa região.

Figura 19 – Acoplamento



Fonte: O Autor (2020)

Figura 20 – União da carroceria com o chassi



Fonte: O Autor (2020)

Na estrutura, existem tubos soldados em ângulo que fazem a ligação da carroceria com as longarinas do chassi. Devido à deformação causada pelo processo de solda, os tubos distorcem de forma que a posição de projeto difere da posição real. Essa distorção pode gerar um espaçamento entre a estrutura e o chassi, impossibilitando a soldagem dos mesmos, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Espaçamento entre a estrutura e o chassi



Fonte: O Autor (2020)

Para eliminar o espaçamento existente, o montador utiliza grampos que “puxam” os tubos para próximo do chassi, porém existem riscos de acidente de trabalho nessa situação. Um dos possíveis acidentes é quando o grampo é colocado de forma incorreta, podendo se soltar. Outra situação que deve ser evitada é quando o montador vai buscar o melhor local para o posicionamento dos grampos e tem que se posicionar entre a estrutura e o chassi, numa posição desconfortável, podendo pisar em falso ou escorregar.

3.2 MÉTODO PROPOSTO

3.2.1 Processo e parâmetros de soldagem

A Marcopolo utiliza o processo de soldagem GMAW na linha de montagem, portanto esse foi o processo adotado no trabalho. Os parâmetros usados como base foram retirados de uma (EPS) Especificação de Procedimento de Soldagem utilizada pela empresa e estão descritos na Tabela 1. O modo de transferência é o curto circuito e o gás de proteção utilizado é uma mistura composta de 82% de argônio e 18% de gás carbônico produzido pela empresa *White Martins*.

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem

Tipo de Corrente	Corrente Contínua
Amperagem	124 Amperes (99,2 a 148,8)
Tensão	18,7 Volts (14,9 a 22,5)

Fonte: Adaptado de Marcopolo (2020).

O metal de adição utilizado pela Marcopolo é fabricado pela Belgo Arames e tem como especificação (AWS) *American Welding Society* ER70S-6 com classificação A5.18. O diâmetro do arame é de 1,0 mm.

A máquina de solda utilizada é da marca *Lincoln Electric*, modelo *Speedtec 505sp*, e está ilustrada na Figura 22.

Figura 22 – Máquina de solda



Fonte: O Autor (2020)

3.2.2 Corpo de prova

A Tabela 2 detalha os tubos mais utilizados pela Marcopolo nos dez primeiros meses de 2020.

Tabela 2 – Lista de tubos

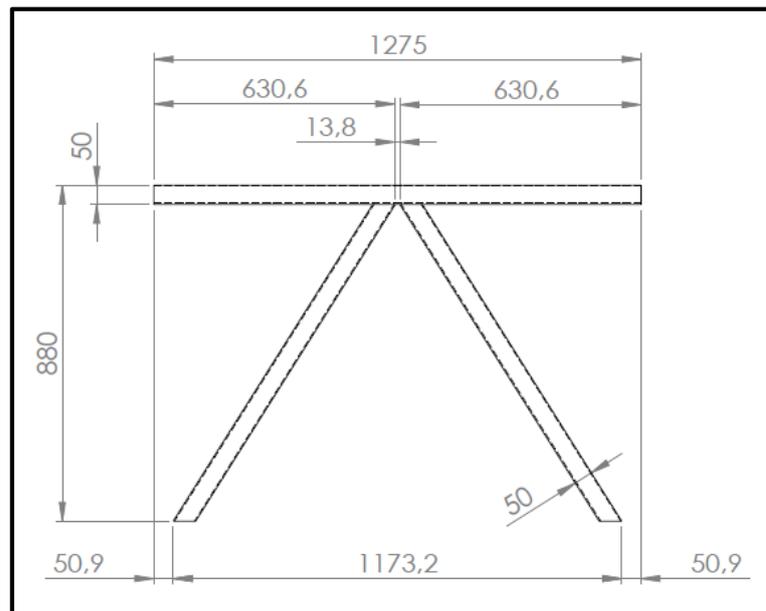
Espessura (mm)	Bitola (mm X mm)	Consumo (m)
2,7	40 X 60	138.761
1,55	30 X 30	127.150
2,7	40 X 80	92.554
2,7	40 X 50	87.881
1,95	40 X 40	78.146

Fonte: Adaptado de Marcopolo (2020).

O corpo de prova representa a estrutura que faz a união do casulo com o chassi. Nos projetos atuais, o tubo utilizado apresenta 50 mm de largura, 40 mm de altura e uma espessura de 2,7 mm. O fato do tubo utilizado na união estar entre os mais utilizados comprova que foi a escolha adequada para o corpo de prova de referência.

A Figura 23 representa o corpo de prova com o dimensional definido e as medidas apresentadas estão em milímetros.

Figura 23 – Corpo de prova



Fonte: O Autor (2020)

Devido à grande variação de modelos de chassis e modelos de carrocerias, as variações de altura de acoplamento são numerosas, dificultando a padronização das dimensões. Os valores escolhidos para o corpo de prova representam uma situação que vem apresentando retrabalho na linha de montagem.

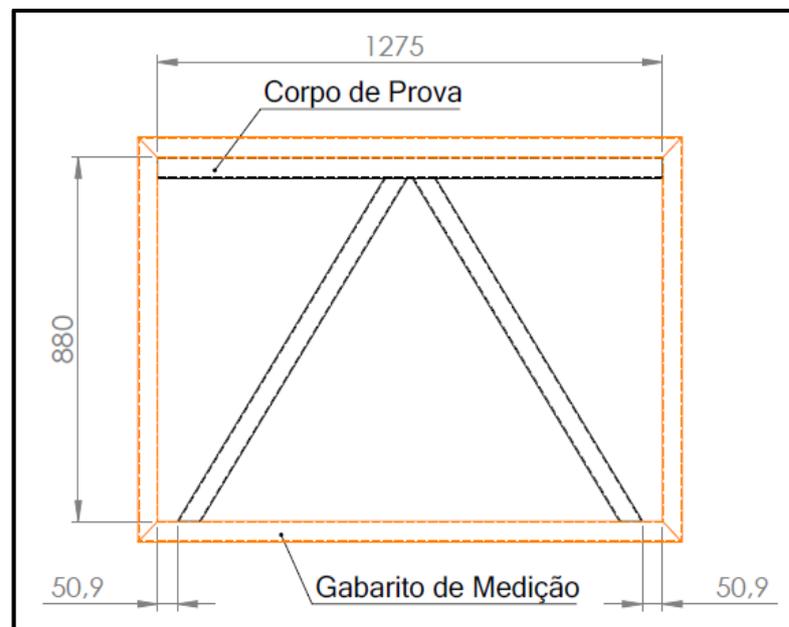
Para evitar variações dimensionais de um corpo de prova para outro, os mesmos foram cortados em uma máquina laser que apresenta uma precisão dimensional elevada comparada com o processo de corte na serra.

3.2.3 Metodologia

O objetivo do trabalho é obter, na prática, valores da alteração dimensional causada pelo processo de solda e, com a aplicação de técnicas descritas na revisão bibliográfica, reduzir essas distorções. Para auxiliar a montagem e a medição das distorções, um gabarito retangular tubular foi montado em cima de uma bancada metálica.

A Figura 24 mostra a montagem do corpo de prova sem distorção no gabarito. É possível observar no canto inferior esquerdo da imagem que existe um espaço de 50,9 mm entre o gabarito e o corpo de prova. A finalidade do espaçamento é permitir que o corpo de prova encaixe no gabarito após as distorções, sem interferência, e facilitar a medição.

Figura 24 – Montagem do corpo de prova no gabarito de medição

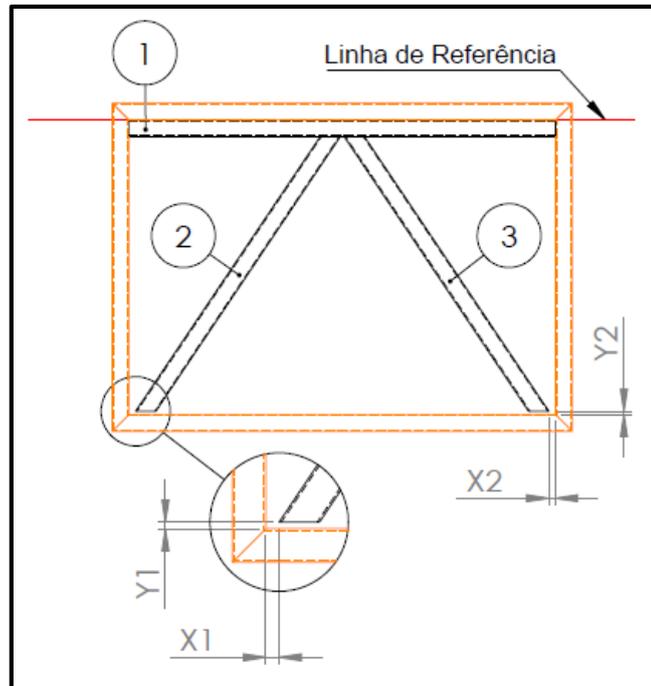


Fonte: O Autor (2020)

As dimensões que foram consideradas para avaliar os deslocamentos estão visíveis na Figura 25. As variáveis X1, X2, Y1 e Y2 indicam as medidas dos corpos de prova que foram

registradas após a soldagem. Também foi avaliada a distorção do item 1 em relação à linha de referência. O registro das medidas ocorreu no dia seguinte a realização da solda. Para fazer as medições, foi usado um paquímetro calibrado.

Figura 25 – Dimensões avaliadas

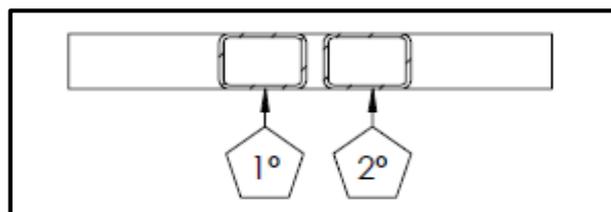


Fonte: O Autor (2020)

Antes de soldar os corpos de prova, os mesmos foram colocados no interior do gabarito para verificar seu dimensional. Antes de retirá-los do gabarito para a soldagem, pontos de solda foram feitos com o intuito de travar as medidas e evitar possíveis variações dimensionais na movimentação.

As medidas de referência, que replica a situação real, foram obtidas com a soldagem do corpo de prova livre em cima de uma bancada. A soldagem é iniciada na face indicada na Figura 26 e é executada no sentido horário. As quatro arestas do primeiro tubo são soldadas antes de iniciar a solda no segundo tubo, que também tem as suas quatro arestas soldadas.

Figura 26 – Ordem de soldagem dos tubos



Fonte: O Autor (2020)

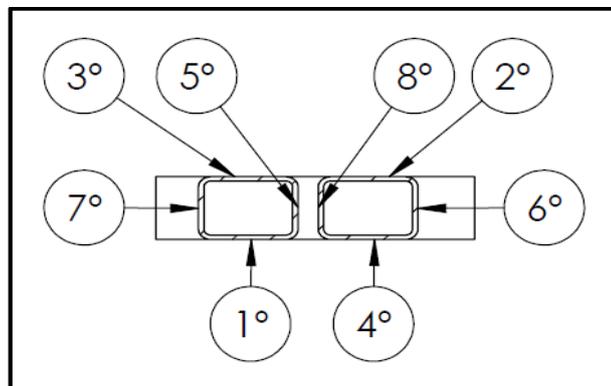
Com o registro das medidas de referência, foi dada sequência no trabalho com variações do processo que afetam as distorções, como foi visto na revisão bibliográfica.

A primeira metodologia proposta foi a montagem do componente em um gabarito. Para representar um gabarito de montagem frequentemente utilizado pela Marcopolo, tubos foram soldados no interior do gabarito de medição, servindo como batentes, impedindo a deformação momentânea. Pelo fato do corpo de prova estar montado em uma bancada, uma aresta do tubo ficou oculta, impedindo de soldar o contorno completo do tubo no gabarito. Sendo assim, a solda na aresta oculta, ocorreu após a retirada do componente do gabarito.

Foram estudadas duas situações na soldagem com gabarito. A primeira é quando o corpo de prova é retirado logo após a soldagem e na segunda, o corpo de prova permanece no gabarito até o resfriamento do cordão de solda. O objetivo foi verificar se o tempo de permanência no gabarito interfere nas distorções.

A segunda metodologia executada foi a alteração da sequência de soldagem. A Figura 27 indica a sequência de soldagem adotada, na qual, ocorre uma alternância dos tubos durante o processo de solda. Para a realização da solda, o corpo de prova encontrava-se livre, sem restrições de movimento.

Figura 27 – Sequência de soldagem



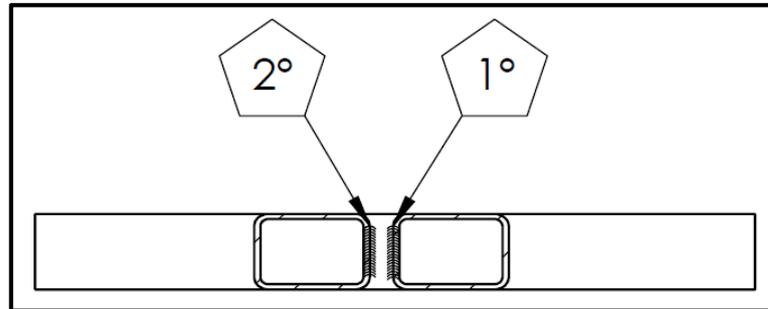
Fonte: O Autor (2020)

Para a terceira metodologia foi estudada a aplicação de volume de solda maior nas arestas indicadas na Figura 28. Portanto, após realizar a soldagem do corpo de prova, seguindo a ordem descrita para as amostras de referência, o soldador realizou um cordão extra nas arestas centrais, aumentando o volume de solda na região.

A última metodologia proposta foi a realização da soldagem com o corpo de prova travado no gabarito e um volume de solda maior nas arestas centrais. Seguindo o mesmo conceito de gabarito utilizado anteriormente, realizou-se a solda nas três arestas visíveis e na sequência, conforme indicando na Figura 28, o soldador executou mais um cordão de solda

em cada aresta indicada. Após um intervalo de 25 minutos, o corpo de prova foi retirado do gabarito e a soldagem da aresta oculta foi realizada.

Figura 28 – Arestas com maior volume de solda



Fonte: O Autor (2020)

Com os resultados registrados, o teste de hipótese *t* de *student* foi aplicada, sendo o primeiro grupo de amostras comparado individualmente com cada uma das metodologias testadas. O nível de significância utilizado foi de 5%.

Para a conclusão do trabalho, foi analisada a aplicação das metodologias na linha de montagem dos componentes estruturais da empresa Marcopolo. Vale destacar que uma técnica que apresente bons resultados pode não ser adotada pela empresa se o custo de aplicação for elevado.

O Quadro 1 apresenta um resumo com todas as técnicas de redução da distorção que foram adotadas no trabalho, assim como a numeração das amostras. Para cada estudo foram utilizados 3 corpos de prova.

Quadro 1 – Técnicas avaliadas

	Técnica de solda:	Amostras:
1 ^a	Soldagem com a utilização dos padrões atuais da Marcopolo	1, 2 e 3
2 ^a	Corpo de prova fixo em um gabarito, com a retirada logo após a soldagem	4, 5 e 6
3 ^a	Corpo de prova fixo em um gabarito, com a retirada após o resfriamento do cordão de solda	7, 8 e 9
4 ^a	Alteração da sequência de solda	10, 11 e 12
5 ^a	Maior volume de solda nas arestas centrais	13, 14 e 15
6 ^a	Corpo de prova fixo em um gabarito e um volume de solda maior nas arestas centrais	16, 17 e 18

Fonte: O Autor (2020).

4 RESULTADOS

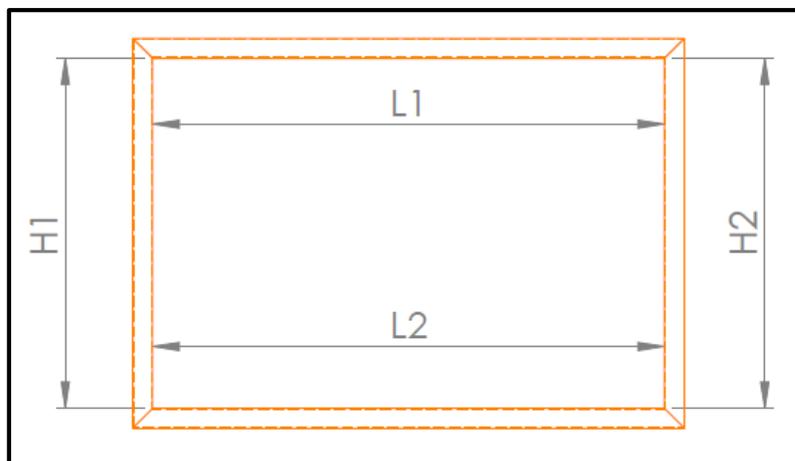
A primeira etapa do trabalho foi a montagem do gabarito retangular em cima de uma bancada metálica plana, conforme pode ser observado na Figura 29. O gabarito foi fixado na bancada e as medidas internas, indicadas na Figura 30, estão registradas na Tabela 3. A medida horizontal superior ficou 2 milímetros maior do que a medida inferior, facilitando a montagem do tubo horizontal com dimensional de 1275 mm, evitando possíveis interferências resultantes de uma pequena variação dimensional decorrente do processo de fabricação do corpo de prova.

Figura 29 – Gabarito de medição montado em uma bancada



Fonte: O Autor (2021)

Figura 30 – Medidas avaliadas no gabarito



Fonte: O Autor (2021).

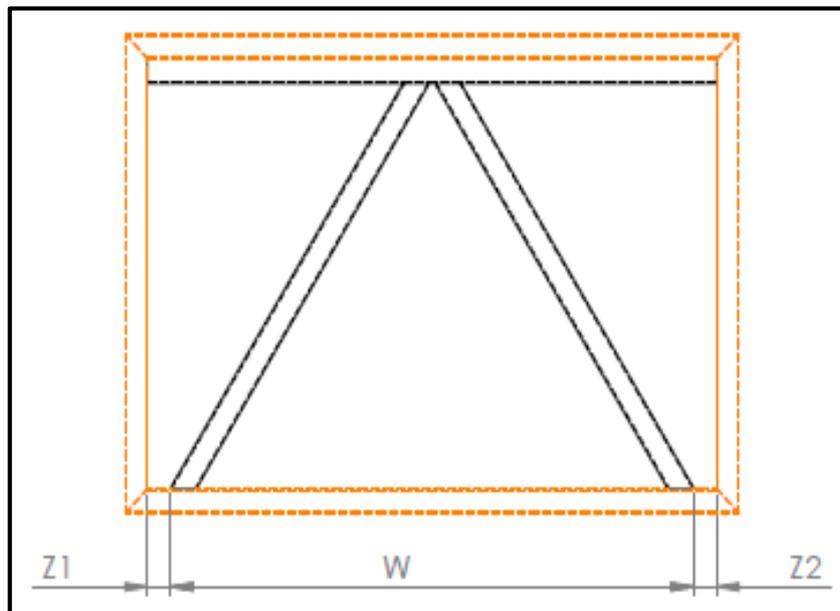
Tabela 3 – Medidas do gabarito

Variável	L1	L2	H1	H2
Dimensão (mm)	1277	1275	880	880

Fonte: O Autor (2021).

Com o gabarito fixo na bancada, deu-se início às montagens dos corpos de prova. Antes de aplicar as técnicas descritas no Capítulo 3, os tubos foram pré-montados no interior do gabarito e as medidas indicadas na Figura 31 foram registradas na Tabela 4. As medidas Z1 e Z2 foram obtidas com a utilização do paquímetro. Já a medida indicada com a variável W é resultante dos valores de Z1 e Z2, menos o valor encontrado para L2 na Tabela 3.

Figura 31 – Corpo de prova montado no gabarito antes da soldagem



Fonte: O Autor (2021).

Tabela 4 – Dimensões do conjunto antes do processo de solda

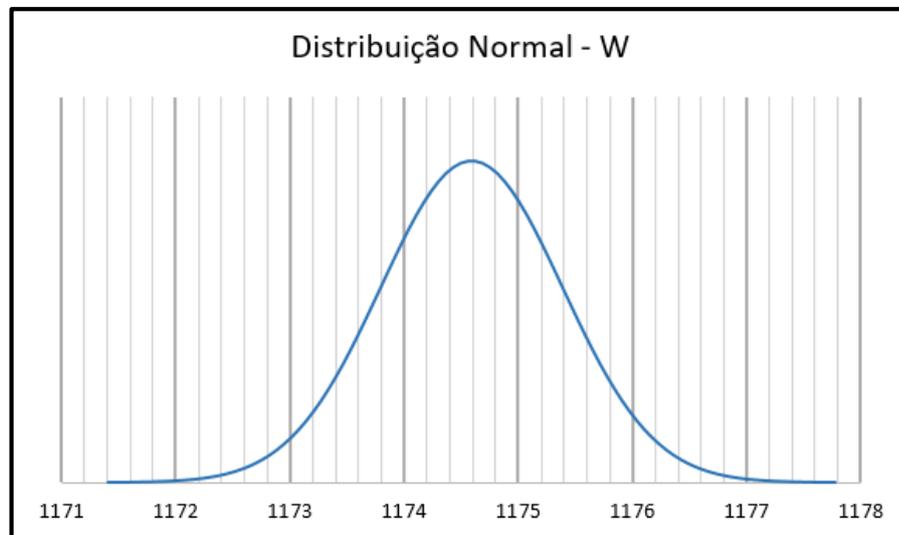
Amostra	(continua)		
	Z1 (mm)	Z2 (mm)	W (mm)
1	51,3	51	1172,7
2	50,7	50,3	1174
3	49,9	49,4	1175,7
4	51,2	49	1174,8
5	50,5	49,4	1175,1
6	51,2	49,2	1174,6
7	50,8	49,5	1174,7
8	50,9	49,3	1174,8

Amostra	Z1 (mm)	Z2 (mm)	(conclusão)
			W (mm)
9	51,6	49,1	1174,3
10	50,5	49,9	1174,6
11	50	51,5	1173,5
12	50,4	50,5	1174,1
13	50,25	50,4	1174,35
14	50,45	49,65	1174,9
15	50,6	50,5	1173,9
16	49,5	49,55	1175,95
17	50,25	49,15	1175,6
18	50,4	49,5	1175,1

Fonte: O Autor (2021).

O valor projetado para as medidas Z1 e Z2, conforme a Figura 24, é de 50,9 mm e para a medida W é de 1173,2 mm. A Figura 32 apresenta a distribuição normal dos valores obtidos para W e a Tabela 5 registra a média e o desvio padrão dos valores da Tabela 4.

Figura 32 – Distribuição normal para os valores de W



Fonte: O Autor (2021).

Tabela 5 – Média dos valores pré solda

Variável	Z1	Z2	W
Média (mm)	50,58	49,83	1174,59
Desvio Padrão	0,515	0,694	0,774

Fonte: O Autor (2021).

Comparando a média dos valores com o valor de projeto é possível perceber que a cota W , antes de ser realizada a solda, apresentou maiores valores. A diferença está relacionada com as variações dimensionais do processo de produção e da maneira que foi montado o corpo de prova.

Com o tubo horizontal posicionado dentro do gabarito de medição, os tubos em diagonal foram montados conforme as cotas 630,6 mm indicadas na Figura 23 e, na parte inferior, buscou-se o contato completo da face dos tubos com o gabarito. Uma pequena alteração no ângulo, afeta significativamente os valores de $Z1$ e $Z2$ e, por consequência, o valor de W .

4.1 SOLDAGEM UTILIZANDO OS PADRÕES DA MARCOPOLO

Com o corpo de prova livre sobre a bancada, o processo de solda, descrito no Capítulo 3, foi executado nas três primeiras amostras.

Ao colocar as amostras no gabarito, para realizar as medições, foi possível perceber o comportamento do tubo superior que, inicialmente reto, deformou-se, criando um espaçamento entre o corpo de prova e o gabarito nas duas extremidades. Já a região central manteve-se em contato no gabarito. O espaçamento na extremidade pode ser visualizado na Figura 33.

Figura 33 – Espaçamento entre o corpo de prova e o gabarito



Fonte: O Autor (2021).

Com o intuito de padronizar as medições indicadas na Figura 25, fazendo com que o tubo horizontal ficasse em contato com o gabarito em sua totalidade, grampos foram utilizados nas extremidades do tubo superior, como pode ser visto na Figura 34. Essa ação foi realizada em todas as amostras de estudo.

Figura 34 – Medição do corpo de prova



Fonte: O Autor (2021).

A Figura 35 ilustra o espaçamento entre o corpo de prova e o gabarito de medição causado pelo processo de solda.

Figura 35 – Registro dos valores de distorções



Fonte: O Autor (2021).

A Tabela 6 reúne os valores encontrados para a primeira proposta de soldagem e que foram usados como referência em análises posteriores.

Tabela 6 – Medições do corpo de prova para o primeiro processo de soldagem

Amostra	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	W (mm)
1	50,3	3	50,55	2	1174,15
2	52,7	1,7	49	2,5	1173,3
3	49,25	3,55	50,6	2,3	1175,15

Fonte: O Autor (2021).

Comparando os valores teóricos antes do processo de soldagem com os valores finais, é possível perceber o comportamento do corpo de prova. Os espaços indicados pelas variáveis Y1 e Y2 não existiam inicialmente e são esses valores que o trabalho pretende reduzir. Considerando que o corpo de prova é simétrico dos dois lados, foram considerados os 6 valores de Y1 e Y2 para obter a média da distorção no eixo Y, que teve como resultado final 2,508 mm.

Observando a cota de abertura dos tubos (W), percebe-se que, quanto maior a distorção do corpo de prova em relação ao eixo y, maior o valor encontrado para a abertura dos tubos, ou seja, o ângulo dos tubos na diagonal diminui em relação à linha horizontal.

4.2 SOLDAGEM NO GABARITO COM A RETIRADA NA SEQUÊNCIA

A Figura 36 ilustra o conceito de gabarito utilizado para as técnicas 2, 3 e 6 na qual tem-se tubos soldados junto à bancada, impedindo a movimentação do corpo de prova durante o processo de soldagem. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos na medição dos corpos de prova após a aplicação da segunda técnica de solda:

Figura 36 – Corpo de prova com restrição de movimento



Fonte: O Autor (2021).

Tabela 7 – Medições do corpo de prova para o segundo processo de soldagem

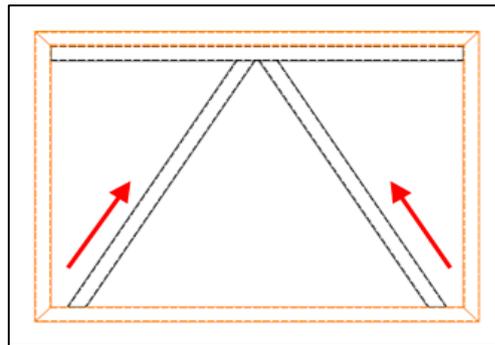
Amostra	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	W (mm)
4	51,5	2,2	51,9	1,6	1171,6
5	51,6	1,85	52,8	1,2	1170,6
6	50,7	2,2	53,7	1,25	1170,6

Fonte: O Autor (2021).

Comparando com a metodologia de referência, as distorções registradas em Y1 e Y2 são menores. Enquanto a média da distorção em Y para o primeiro caso de estudo foi de 2,508 mm, a segunda proposta de soldagem apresentou uma média de distorção em Y de 1,717 mm, correspondendo a uma redução de 31,54%.

Observando a dimensão W, é possível perceber que o valor diminuiu quando comparado ao valor de projeto que era de 1173,2 mm. A Figura 37 ilustra o comportamento do corpo de prova.

Figura 37 – Comportamento do corpo de prova



Fonte: O Autor (2021).

Utilizando as fórmulas do teste de hipótese t de *student* para comparar os valores de distorção obtidos nas duas primeiras técnicas de soldagem, obtém-se um valor de 2,629 para t. O t crítico, retirado da tabela, para um grau de liberdade igual a 5, é de 2,571, ou seja, existem diferenças significativas entre os dois conjuntos de valores analisados. O registro dos cálculos está no Apêndice A.

4.3 SOLDAGEM NO GABARITO COM A RETIRADA APÓS O RESFRIAMENTO

A soldagem das amostras da terceira proposta de trabalho utiliza o mesmo conceito desenvolvido na proposta de número dois. A diferença está no tempo que o corpo de prova permanece no gabarito antes de ser retirado para a solda da aresta oculta. As amostras ficaram 15 minutos ou mais no interior do gabarito antes de serem retiradas. A Tabela 8 reúne os valores encontrados para a terceira proposta de soldagem.

O valor médio para a distorção em Y foi de 1,767 mm, um valor mais elevado quando comparado com a proposta dois e menor em relação às distorções de referência.

Aplicando o teste de hipótese, o valor encontrado para t, quando comparada a primeira técnica com a terceira, é de 2,669. O t crítico, retirado da tabela, para um grau de liberdade igual a 5, é de 2,571, ou seja, existem diferenças significativas entre os dois conjuntos de valores analisados. O registro dos cálculos está no Apêndice A.

Tabela 8 – Medições do corpo de prova para o terceiro processo de soldagem

Amostra	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	W (mm)
7	50,15	1,95	53	1,45	1171,85
8	51,7	2,1	51,3	1,5	1172
9	52,1	2,1	51,05	1,5	1171,85

Fonte: O Autor (2021).

4.4 ALTERAÇÃO NA SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM

Com o corpo de prova livre, a solda foi realizada seguindo a sequência de soldagem descrita no capítulo 3. A Tabela 9 reúne os valores encontrados para a quarta proposta.

Tabela 9 – Medições do corpo de prova para o quarto processo de soldagem

Amostra	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	W (mm)
10	51,7	2,8	48,95	1,15	1174,35
11	52,1	1,65	47,45	3,75	1175,45
12	51,8	1,7	47,6	3,7	1175,6

Fonte: O Autor (2021).

Observando os valores medidos em Y1 e Y2, percebe-se uma disparidade entre os valores de Y1 com os de Y2, sendo que nas três amostras soldadas, um dos lados afastou-se nitidamente mais que o outro, aumentando o valor obtido para a média da distorção.

A média da distorção em Y foi de 2,458 mm, próximo do valor da técnica de referência. Portanto, o comportamento da distorção encontrado para essa proposta não apresentou a redução esperada com relação aos padrões de referência.

Utilizando o teste de hipótese, o valor encontrado para t é de 0,103 quando comparado com a primeira técnica. O t crítico, retirado da tabela, para um grau de liberdade igual a 5, é de 2,571, ou seja, não existem diferenças significativas entre os dois conjuntos de valores analisados. O baixo valor de t é resultante do valor das médias dos dois conjuntos serem próximas. O registro dos cálculos está no Apêndice A.

4.5 SOLDAGEM COM MAIOR VOLUME APLICADO NAS ARESTAS CENTRAIS

Para o quinto teste de soldagem, o corpo de prova foi soldado da mesma forma do primeiro teste, porém, após finalizar a solda, um cordão adicional de solda foi realizado conforme descrito no capítulo 3. A Tabela 10 mostra os valores registrados.

Tabela 10 - Medições do corpo de prova para o quinto processo de soldagem

Amostra	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	W (mm)
13	54,5	0	49,65	2,45	1170,85
14	53,45	0	48,75	2,7	1172,8
15	54,7	0	51,2	2,25	1169,1

Fonte: O Autor (2021).

Conforme indicado na Figura 28, o cordão adicional de solda no lado direito foi realizado por primeiro e, posteriormente, no lado esquerdo. Nas três amostras, o tubo na diagonal do lado esquerdo ficou em contato com o gabarito. Observa-se que, quanto menor o valor de Y, maior o valor X. Isso significa que, quanto menor a distorção no eixo Y, maior a distorção no X.

O valor médio para a distorção em Y foi de 1,233 mm, uma redução de 50,84% quando comparado com o processo de solda de referência.

Quando aplicado o teste de hipótese, o valor encontrado para t é de 2,255 quando comparado com a primeira técnica. O t crítico, retirado da tabela, para um grau de liberdade igual a 5, é de 2,571, ou seja, não existem diferenças significativas entre os dois conjuntos de valores analisados. Apesar do valor médio de distorção estar abaixo do valor médio do primeiro conjunto, o valor do desvio padrão para os valores de distorção encontrado foi alto, fazendo com que o valor de t calculado ficasse abaixo do valor de t crítico. O registro dos cálculos está no Apêndice A.

4.6 SOLDAGEM NO GABARITO COM MAIOR VOLUME DE SOLDA

A soldagem dos últimos corpos de prova seguiu a metodologia descrita no capítulo 3 e os resultados das medições estão registrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Medições do corpo de prova para o sexto processo de soldagem

Amostra	X1 (mm)	Y1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	W (mm)
16	52,25	1,15	53,4	1	1169,35
17	54,1	0	49,8	2,25	1171,1
18	53,3	0	52,3	1,6	1169,4

Fonte: O Autor (2021).

Em duas amostras, um dos tubos ficou em contato com o gabarito após a solda. A média da distorção no eixo Y foi 1,00 mm, a menor média encontrada entre as metodologias

propostas. Quando comparado aos valores de referência, 2,508 mm, a redução da distorção foi de 60,13%.

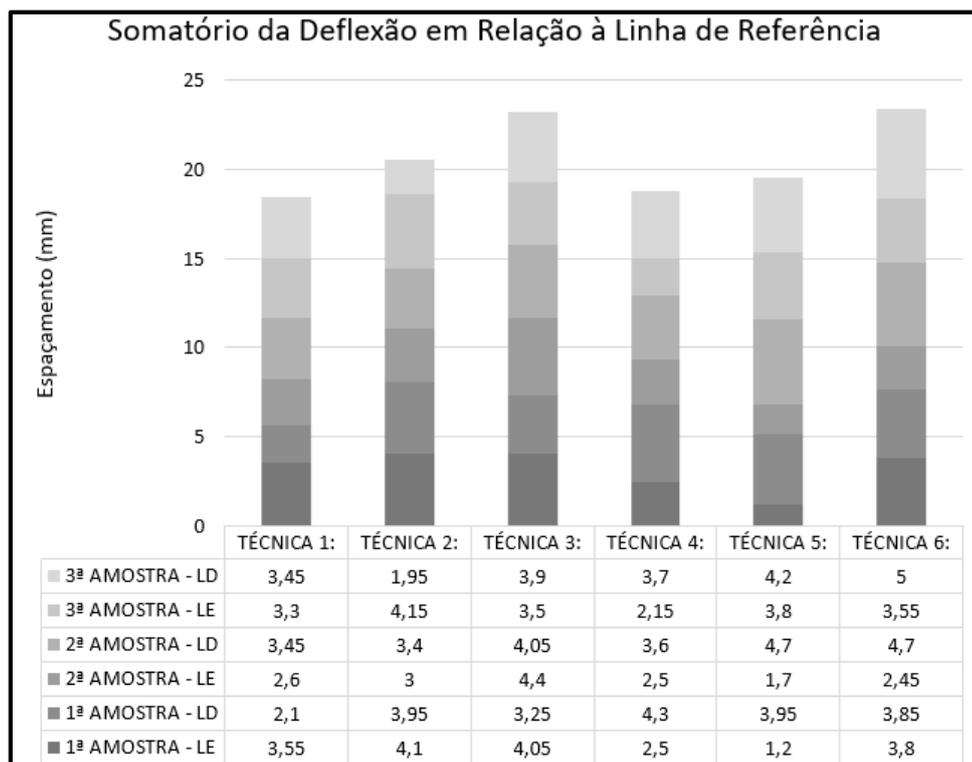
O comportamento da distorção no eixo X segue o mesmo conceito do quinto teste de soldagem, no qual o valor de X é maior para menores valores de Y. Pelos baixos valores de distorção em Y, os valores encontrados para a medida W foram os menores dentre todas as metodologias testadas.

Aplicando o teste de hipótese, comparado com o primeiro conjunto de amostras, o valor t é de 3,627. O t crítico, retirado da tabela, para um grau de liberdade igual a 5, é de 2,571, ou seja, existem diferenças significativas entre os dois conjuntos de valores analisados, diferente do que ocorreu na metodologia de solda, na qual foi aplicada somente a metodologia de volume de solda nas arestas centrais. O registro dos cálculos está no Apêndice A.

4.7 DEFLEXÃO EM RELAÇÃO À LINHA DE REFERÊNCIA

O processo de solda fez com que o tubo horizontal do corpo de prova, que estava inicialmente em contato com o gabarito por completo, se deformasse, criando espaçamentos nas extremidades do tubo, como foi registrado na Figura 33. A Figura 38 registra na parte inferior, em milímetros, os valores medidos em ambos os lados para as três amostras nas seis metodologias.

Figura 38 – Somatório da deflexão em relação à linha de referência



Fonte: O Autor (2021).

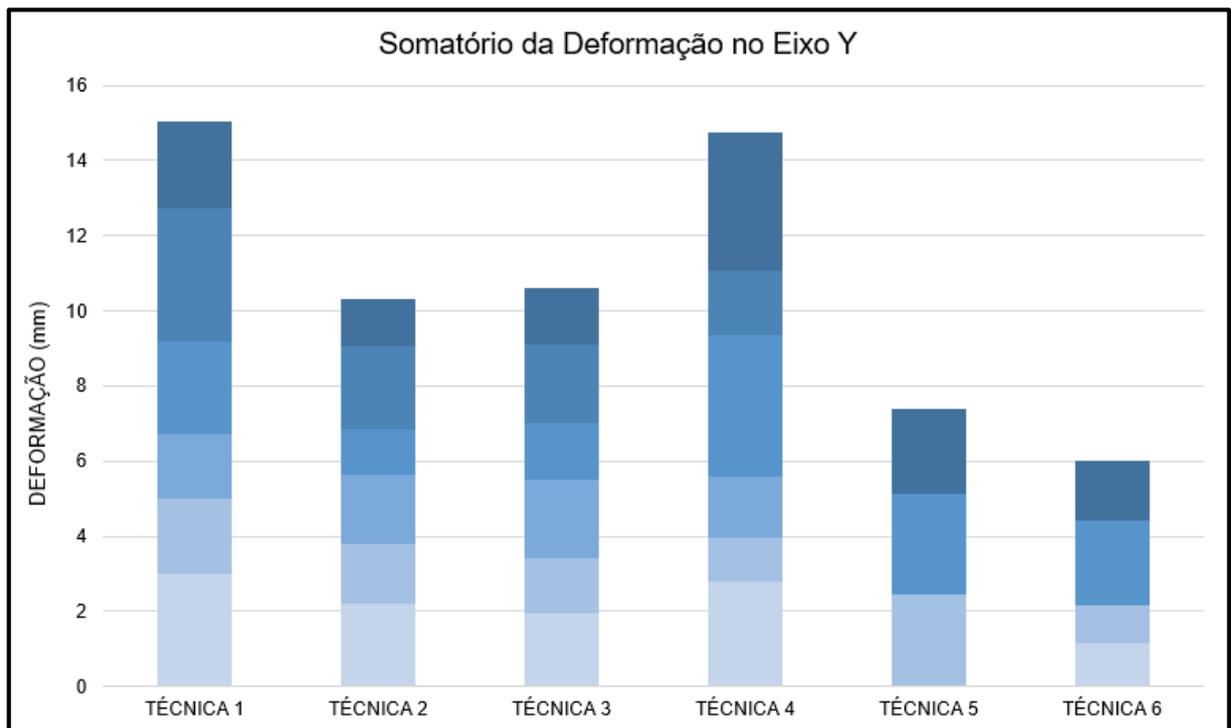
Percebe-se que as metodologias que utilizaram gabarito no processo de solda tiveram um somatório maior da deflexão quando comparado com as outras metodologias. Portanto, os limitadores de movimento não foram eficientes para a redução da deflexão do tubo horizontal em relação a linha de referência.

Os menores valores de deflexão foram registrados nas metodologias que apresentaram os maiores valores de distorção em relação ao eixo y (técnicas 1 e 4).

4.8 ANÁLISE GRÁFICA

A Figura 39 ilustra, de forma gráfica, o somatório da deformação em cada processo de solda realizado, para Y1 e Y2 nos três corpos de prova. Vale destacar que o valor teórico de projeto para Y nos corpos de prova é 0.

Figura 39 – Somatório da deformação em Y



Fonte: O Autor (2021).

As amostras que foram usadas como referência (Técnica 1) apresentaram o somatório de deformação no eixo y maior em comparação com os outros processos propostos. As técnicas 2 e 3 tiveram resultados próximos, inferindo numa interpretação de que o tempo de espera para o resfriamento do cordão de solda antes da retirada do corpo de prova do gabarito não influenciou nos resultados obtidos para o experimento proposto. Já a técnica 4 gerou distorções no eixo y próximas à técnica de referência.

Araújo (2012), em sua tese de doutorado, estudou as distorções causadas pela soldagem com o uso de técnicas numéricas e de otimização. Dentre os tópicos, foi estudada a influência das restrições de movimento nas distorções na soldagem de juntas tipo “T”. Dentre os cinco casos propostos pelo autor, aquele que apresentou o menor nível de distorção, pelo método dos elementos finitos, foi a condição de maior nível de restrição da junta até a temperatura ambiente.

Indo ao encontro dos resultados obtidos por Araújo (2012), o corpo de prova soldado com restrição de movimento, ou seja, soldado no interior de um gabarito com batentes que limitavam os movimentos dos tubos, teve deformação no eixo y menor quando comparado com o corpo de prova totalmente livre.

Ao observar o somatório de deformação no eixo y para os últimos dois conjuntos de corpos de prova, técnicas 5 e 6, percebe-se uma significativa redução da deformação quando em comparação com as outras metodologias. E, dentre essas duas técnicas, a que apresentou o menor valor foi o último conjunto, tendo como resultado final uma redução relevante.

A Tabela 12 traz a diferença entre os valores Z1 e Z2, registrados na Tabela 4, e os valores de X1 e X2, registrados nas Tabelas 6, 7, 8, 9, 10 e 11. Uma diferença positiva representa que o valor inicial é maior que o valor final, ou seja, que o tubo em diagonal do corpo de prova se aproximou da lateral do gabarito de medição após o processo de soldagem. Já diferenças negativas representam o comportamento oposto. Para facilitar a visualização do comportamento dos 18 corpos de prova, criou-se a Figura 40 que ilustra, de forma gráfica, os valores representados na Tabela 12.

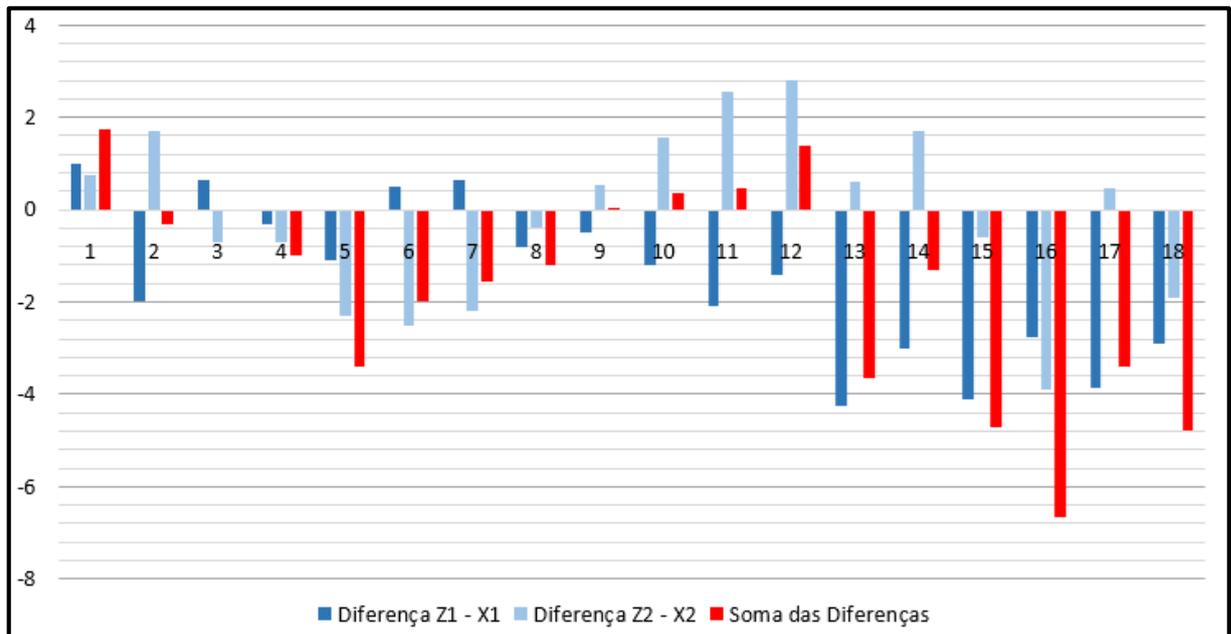
Tabela 12 – Deformação no eixo x para todas amostras

(continua)			
Amostra	Diferença Z1 - X1 (mm)	Diferença Z2 - X2 (mm)	Soma das Diferenças
1	1	0,75	1,75
2	-2	1,7	-0,3
3	0,65	-0,7	-0,05
4	-0,3	-0,7	-1
5	-1,1	-2,3	-3,4
6	0,5	-2,5	-2
7	0,65	-2,2	-1,55
8	-0,8	-0,4	-1,2
9	-0,5	0,55	0,05
10	-1,2	1,55	0,35
11	-2,1	2,55	0,45

			(conclusão)
12	-1,4	2,8	1,4
13	-4,25	0,6	-3,65
14	-3	1,7	-1,3
15	-4,1	-0,6	-4,7
16	-2,75	-3,9	-6,65
17	-3,85	0,45	-3,4
18	-2,9	-1,9	-4,8

Fonte: O Autor (2021).

Figura 40 – Deformação no eixo x para todas as amostras



Fonte: O Autor (2021).

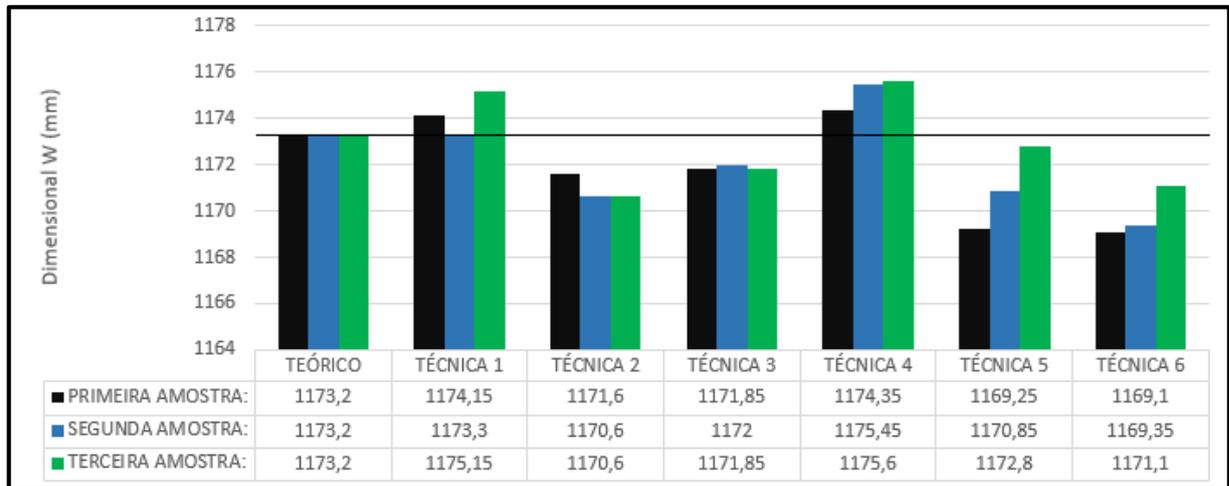
Interpretando os valores da Tabela 12, conclui-se que a utilização de gabaritos não conteve as deformações no eixo x, sendo o somatório dessas deformações negativo, com exceção da amostra 9. Isso representa que o tubo em diagonal do corpo de prova se afastou da lateral do gabarito. A aplicação de um cordão extra de solda também aumentou a deformação no eixo x e, quando combinada com a soldagem no gabarito, apresentou os maiores valores de deformação entre as metodologias aplicadas.

Ainda observando a Tabela 12, nota-se que alternar a sequência de soldagem foi a única metodologia que resultou em uma soma das diferenças positiva para as três amostras.

Os valores encontrados para W são consequências dos valores de distorção no eixo x. A Figura 41 reúne todos esses valores. Percebe-se que as técnicas que produziram os maiores valores de distorção no eixo y (1 e 4) tiveram valores para W maior que o valor teórico.

Em contrapartida, as técnicas em que a distorção no eixo y foi menor, resultaram em menores valores para W. Portanto, uma redução da distorção em y aumentou a distorção em x.

Figura 41 – Valores encontrados para W



Fonte: O Autor (2021).

O objetivo, ao aplicar as técnicas que adicionaram um cordão extra de solda, era aumentar o calor na região, forçando um aumento das tensões residuais e das distorções. Em teoria, em virtude de o cordão de solda extra estar localizado próximo à linha de centro vertical do corpo de prova, o cordão de solda forçaria uma contração maior no tubo, em comparação às amostras nas quais não foi aplicada essa técnica. Pelo fato do tubo apresentar um ângulo de montagem, a contração deveria forçar um aumento do ângulo.

Após as medições das técnicas 5 e 6, observa-se que a prática foi ao encontro da teoria. A distorção em y para essas técnicas foram menores quando comparado com as outras. Em contrapartida, os valores indicados em W destoaram do valor teórico de projeto, mostrando que ao diminuir a distorção no eixo y, a distorção no eixo x foi ampliada.

4.9 TESTE DE HIPÓTESE

A Figura 42 reúne todos os testes de hipótese calculados anteriormente para a distorção em y. O valor de t crítico foi obtido através da tabela (Anexo A). O grau de liberdade calculado pela fórmula 7 é 5 e o nível de significância é de 5%. Por ser um teste bilateral, o t crítico assume valores positivo e negativo.

As metodologias que tiveram o t de *student* calculado entre os valores críticos (4^a e 5^a) representam conjuntos de valores sem diferença significativa quando comparados ao processo de soldagem utilizando os padrões atuais da empresa. Já a 2^a, 3^a e 6^a metodologias apresentaram valores de distorção com diferença significativa.

Figura 42 – Teste de hipótese



Fonte: O Autor (2021).

4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As distorções podem ser amenizadas pelo uso de sequências simétricas de soldagem, pois, desta forma, ao alternar cordões de solda em diferentes regiões do componente, o calor se distribui de forma mais uniforme ao longo da área soldada. (OKUMURA; TANIGUSHI, 1982)

Métodos de elementos finitos estão sendo utilizados para obter a melhor sequência de soldagem a partir do modelamento do componente a ser soldado e a indicação da região a ser solda.

Diferente do que a bibliografia apresenta, alterar a sequência de solda não trouxe resultados positivos para o caso de estudo. A sequência de solda escolhida para o corpo de prova de estudo não foi eficaz. Com o intuito de aplicar essa técnica de redução, uma simulação com auxílio de um *software* de elementos finitos pode ser utilizada.

Dois pontos podem justificar o insucesso em relação à redução das distorções. O primeiro é que, devido à baixa quantidade de cordões de solda, a sequência de soldagem escolhida se aproxima da soldagem que foi utilizada como referência para obtenção dos valores de distorção. Já o segundo é que a região de solda representa uma área pequena em relação ao dimensional do componente, concentrando a região de calor aplicado, não importando a alternância dos cordões.

Devido ao fato dos tubos soldados estarem próximos, as distorções, resultantes do processo de solda realizado no tubo que é soldado por primeiro, pode influenciar nas variações dimensionais do tubo que é soldado por últimos. Observando os valores de Y1 e Y2 para as seis técnicas de soldagem desenvolvidas, percebe-se que aquelas que não utilizaram o gabarito, tiveram uma disparidade entre os valores. A técnica que teve a maior disparidade foi a técnica que alternou a sequência de solda, influenciando nos valores finais de distorção em Y.

Soldar os corpos de prova com o auxílio de um gabarito que restringiu os movimentos causados pela distorção apresentou valores finais distorção menores quando comparados à soldagem livre, sem a utilização do mesmo. Nas amostras soldadas no interior do gabarito, o tempo de espera para a retirada do corpo de prova não influenciou nos resultados obtidos. A

aplicação de um cordão extra de solda também apresentou menores valores de distorção no eixo y quando comparados com a técnica de referência.

Com o propósito de obter os menores valores de distorção em y, dentre as metodologias aplicadas, aquela que trouxe os melhores resultados foi a combinação da soldagem com auxílio de gabarito com a aplicação de um cordão extra nas arestas próximas ao centro do corpo de prova.

Observando os resultados da distorção no eixo x, os corpos de prova apresentaram valores maior e menor dependendo da metodologia aplicada. As técnicas com menores valores de distorção em y resultaram em um aumento das medidas para X1 e X2 quando comparados aos valores de projeto. Para esses processos, percebe-se que, quanto mais próximo de 0 o valor da distorção em y, maior a diferença dos valores de X1 e X2 em comparação ao projetado.

O objetivo do trabalho era eliminar os espaços entre carroceria e chassi, como pôde ser observado na Figura 21. Verifica-se que, junto ao chassi, são colocadas chapas que apresentam dimensões maiores do que o tubo que é soldado nela. A justificativa da chapa ser maior é que ela pode absorver possíveis variações de montagem, porém não consegue absorver variações da distorção de altura, que é a distorção que consideramos no eixo y. Portanto, para a metodologia de redução ser efetiva na sua aplicação em linha de montagem, a metodologia deve ser eficiente na redução das distorções em y.

Todas as metodologias propostas ao longo do trabalho podem ser aplicadas numa linha de montagem. As que utilizam gabarito requerem um maior investimento inicial, porém a utilização do mesmo pode trazer maior precisão de montagem em linha, o que representa um ganho na qualidade do produto e velocidade de eficiência de produção.

5 CONCLUSÃO

Indo ao encontro da situação observada em linha de montagem, o processo de solda causou distorções e, por consequência, alterou as dimensões de todos os corpos de prova estudados. A alteração das dimensões criou um espaço entre o gabarito de medição e os corpos de prova, porém com diferença de valores dependendo da forma que foram soldados.

Alterar a sequência de soldagem não apresentou valores de distorções menores quando equiparado com os valores utilizando a metodologia de referência. Portanto, a sua aplicação na linha de montagem não traria benefícios para a empresa, sendo descartada a sua execução.

A utilização de gabarito de montagem apresentou valores menores de distorção em comparação com metodologias semelhantes que não o empregavam. Dentro dos processos que utilizaram o gabarito, aquele que manteve o corpo de prova no seu interior até o resfriamento do cordão, não apresentou valores de distorções significativamente diferentes dos processos que retiraram o corpo de prova logo após a solda.

Aplicar um cordão de solda extra, forçando um aumento das tensões residuais e fazendo com que a angulação dos tubos aumente em relação a horizontal, obteve resultados satisfatórios para a diminuição dos valores de distorção no eixo y.

Dentre as metodologias estudadas, aquela que alcançou os menores valores do espaço criado entre o gabarito de medição e o corpo de prova foi a metodologia que aplicou dois conceitos: a utilização de um gabarito de montagem, juntamente com o cordão extra de soldagem, tendo como resultado uma redução de 60,13% quando comparado com os valores de referência. Utilizar gabaritos e soldar uma aresta duplamente podem ser aplicados na linha de produção de uma carroceria para ônibus.

Registra-se que, ao reduzir as distorções no eixo y, tem-se um aumento da variação dimensional no eixo x. Entretanto, a variação no eixo x, na situação estudada, pode ser absorvida pelos componentes soldados junto ao chassi que fazem a preparação para receber a estrutura da carroceira.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dado os resultados obtidos, são sugeridos os seguintes tópicos que podem dar sequência ao trabalho:

- a) Avaliar a qualidade da solda, quando aplicados grandes volumes, verificando a metalografia do cordão e as propriedades mecânicas;
- b) Buscar uma sequência de soldagem adequada com o auxílio de softwares de elementos finitos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Welding Handbook: Welding Technology**, 8th ed. Miami: AWS, v.1, 1987.

ARAÚJO, Douglas Bezerra de. **Estudo de Distorções em Soldagem com Uso de Técnicas Numéricas e de Otimização**. 2012. 240 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.04.018>.

CUNHA, Lelis José G. da. **Solda: como, quando e por quê**. 3. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2013. 366 p. ISBN 9788579673263.

FÁVERO, Luiz Paulo Lopes; BELFIORE, Patrícia Prado. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com excel, SPSS e stata**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FERREIRA, Miguel Luiz Ribeiro. **Martelamento Como Método de Alívio de Tensões em Juntas Soldadas**. 1984. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1984.

GARCIA, Fernando Casanova; SALDARRIAGA, Duván Henao; ARENAS, Fernando Franco. Control dimensional de uniones soldadas utilizando tratamiento de alivio de tensiones mediante vibraciones. **Revista Ingeniería e Investigación**. Bogotá. v. 28, n. 1, p. 22-25, Apr. 2008.

KHAYBRAKHMANTOV, R u; KOROBOV, Yu s; BILENKO, G a. Reducing the distortion in thin-sheet structures made from high-strength steel based on CAE-welded joint analysis. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 681, 012023, 21 nov. 2019. IOP Publishing. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/681/1/012023>.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2. ed. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc, 2003. 461p.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996. x, 477 p.

MAIA, Thiago de Menezes; COSTA, Hector Reynaldo Meneses; FONSECA, Maria Cidra; CHUVAS, Tatiane de Campos. Influência da composição do gás de proteção nas tensões residuais de juntas de aço DP600 soldadas pelo processo GMAW. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, e12447, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0763>.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.

MENDES, Catarina Esposito; CARDOSO, Francisco Ilo Bezerra; SANGUINETTI, Ricardo Artur. Efeito da velocidade de soldagem e anisotropia no cálculo de tensões residuais em chapas soldadas pelo processo GMAW. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, v. 3, n. 1, p. 163-171, 26 dez. 2016. Trimestral.

MIRANDA, Leonardo Horta; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Redução das distorções angulares em cordões de solda sobre chapa de aço de baixo carbono com a utilização da

refrigeração forçada da poça de fusão. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 17-20, 2007. Editora Cubo. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00402004>.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

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

PEREIRA, Jonathas Henrique; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Análise de Distorções na Soldagem de Juntas em “X” e “V” em Modelos Reduzidos em Escala de Anéis Segmentados Utilizando o Monitoramento Contínuo com Sensores a Laser. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, v. 21, n. 1, p. 44-58, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2101.05>.

PODDER, Debabrata; KENNO, Sara; DAS, Sreekanta; MANDAL, Nisith Ranjan. Numerical Investigation on Interruption in the Welding Process Used in Shipbuilding. **Journal Of Ship Production And Design**. Vol. 31. 1-10. fev. 2015.

QUITES, Almir Monteiro. **Introdução à soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002. 352 p. ISBN 8589445011.

TRIOLA, Mario F. **Introdução à Estatística**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (Coord.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: E. Blücher, 1992. 494 p.

XU, D.; LIU, X. S.; YANG, J. G.; FANG, H.Y.. New technique to control welding buckling distortion and residual stress with non-contact electromagnetic impact. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [S.L.], v. 14, n. 8, p. 753-759, nov. 2009. Informa UK Limited. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/136217109x12505932584736>.

**APÊNDICE A – TESTE DE HIPÓTESE COMPARANDO A METODOLOGIA DE
REFERÊNCIA COM AS OUTRAS PROPOSTAS**

		TÉCNICA 1:	TÉCNICA 2:	TÉCNICA 3:	TÉCNICA 4:	TÉCNICA 5:	TÉCNICA 6:
CORPO DE PROVA	Y1: (mm)	3	2,2	1,95	2,8	0	1,15
	Y2: (mm)	2	1,6	1,45	1,15	2,45	1
CORPO DE PROVA	Y1: (mm)	1,7	1,85	2,1	1,65	0	0
	Y2: (mm)	2,5	1,2	1,5	3,75	2,7	2,25
CORPO DE PROVA	Y1: (mm)	3,55	2,2	2,1	1,7	0	0
	Y2: (mm)	2,3	1,25	1,5	3,7	2,25	1,6

MÉDIA (MM):	2,508	1,717	1,767	2,458	1,233	1,000
REDUÇÃO (%):		31,561	29,568	1,993	50,831	60,133
DP:	0,617	0,405	0,288	1,022	1,240	0,811
VARIÂNCIA:	0,380	0,164	0,083	1,045	1,538	0,658

t-student (calculado)	2ª	2,6285988
	3ª	2,6687327
	4ª	0,1026028
	5ª	2,2548409
	6ª	3,6266550

Nº de Amostras:	6
GL:	5

SIGMA:	0,05	95%
t crítico bi caudal (tabelado)	2,571	
	-2,571	

ANEXO A – TABELA T DE STUDENT

Graus de Liberdade	Área em Uma Cauda				
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,10
Graus de Liberdade	Área em Duas Caudas				
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20
1	63,657	31,821	12,706	6,314	3,078
2	9,925	6,965	4,303	2,920	1,886
3	5,841	4,541	3,182	2,353	1,638
4	4,604	3,747	2,776	2,132	1,533
5	4,032	3,365	2,571	2,015	1,476
6	3,707	3,143	2,447	1,943	1,440
7	3,499	2,998	2,365	1,895	1,415
8	3,355	2,896	2,306	1,860	1,397
9	3,250	2,821	2,262	1,833	1,383
10	3,169	2,764	2,228	1,812	1,372
11	3,106	2,718	2,201	1,796	1,363
12	3,055	2,681	2,179	1,782	1,356
13	3,012	2,650	2,160	1,771	1,350
14	2,977	2,624	2,145	1,761	1,345
15	2,947	2,602	2,131	1,753	1,341
16	2,921	2,583	2,120	1,746	1,337
17	2,898	2,567	2,110	1,740	1,333
18	2,878	2,552	2,101	1,734	1,330
19	2,861	2,539	2,093	1,729	1,328
20	2,845	2,528	2,086	1,725	1,325
21	2,831	2,518	2,080	1,721	1,323
22	2,819	2,508	2,074	1,717	1,321
23	2,807	2,500	2,069	1,714	1,319
24	2,797	2,492	2,064	1,711	1,318
25	2,787	2,485	2,060	1,708	1,316