

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
IVAN CÍCERO DA SILVA CARDOSO**

**PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM
PARA CONTROLE DE DISTORÇÕES**

**Taubaté - SP
2020**

IVAN CÍCERO DA SILVA CARDOSO

**PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM
PARA CONTROLE DE DISTORÇÕES**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Prof. Me. José Carlos Sávio de Souza

**Taubaté – SP
2020**

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

C268p Cardoso, Ivan Cícero da Silva
Planejamento do processo de soldagem para controle de distorções /
Ivan Cícero da Silva Cardoso. -- 2020.
42 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Me. José Carlos Sávio de Souza, Departamento de
Engenharia Mecânica

1. Distorções. 2. Soldagem. 3. Planejamento. I. Graduação em
Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 671.56

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

IVAN CÍCERO DA SILVA CARDOSO

**PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM PARA CONTROLE DE
DISTORÇÕES**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.

DATA: 21/02/2020

RESULTADO: Aprovado

BANCA EXAMINADORA:

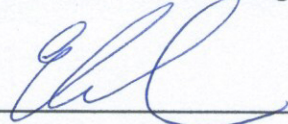
Prof. Me. José Carlos Sávio de Souza

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Profa. Ma. Eliane da Silveira Romagnolli de Araújo

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

21 de fevereiro de 2020

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial minha irmã Lívia, minha mãe Luzia e à Ingrid que sempre esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, e a todos os professores com quem tive o prazer de conhecer e absorver todos os conhecimentos passados.

Ao meu orientador, Prof. Me. José Carlos Sávio de Souza por todo o incentivo, paciência e motivação na orientação deste trabalho.

À minha mãe e a minha irmã que sempre me apoiaram e me ajudaram a chegar até aqui.

À Ingrid que sempre esteve comigo em todos os momentos e que sem dúvida foi a pessoa que mais me incentivou e motivou os meus estudos.

“Se eu não for por mim, quem o será? Mas se eu
for só por mim, que serei eu? Se não agora,
quando?”
(Hilel, o Ancião)

RESUMO

O processo de soldagem é considerado como um processo de união de uma ou mais peças, com ou sem deposição de material, de forma permanente para fabricação ou recuperação de estruturas e equipamentos. Os processos mais utilizados na indústria são MIG/MAG (GMAW), Eletrodo Revestido (SMAW), TIG (GTAW) e Solda Oxiacetilênica (OAW). Quando o metal é submetido à união através do arco elétrico, sua estrutura sofre distorções em algumas áreas devido à grande mudança de temperatura. As contrações do filete de solda durante a solidificação produzem tensões térmicas. Deste modo, o material sofrerá variações longitudinais e transversais resultantes do alívio dessas tensões. Como hoje a indústria visa a intercambialidade, a qualidade e o aumento na produtividade, o planejamento do processo de soldagem se torna uma ferramenta importante no controle de distorções dentre outros problemas de fabricação. O objetivo desse estudo é identificar problemas em juntas soldadas e garantir um controle desses problemas de forma eficaz buscando melhorar a produtividade e qualidade de equipamentos soldados através de melhorias na sequência de soldagem, utilização de dispositivos de fixação e ferramentas que possam ajudar no controle dessas deformações.

Palavras-chave: Distorções. Soldagem. Planejamento.

ABSTRACT

The welding process is considered as a process of joining one or more parts, with or without deposition of material, permanently for the manufacture or recovery of structures and equipment. The most used processes in the industry are MIG / MAG (GMAW), Coated Electrode (SMAW), TIG (GTAW) and Oxyacetylene Welding (OAW). When the metal is subjected to the union through the electric arc, its structure suffers distortions in some areas due to the great temperature change. The weld fillet contractions during solidification produce thermal stresses. In this way, the material will suffer longitudinal and transverse variations resulting from the relief of these stresses. As the industry today seeks interchangeability, quality and increased productivity, planning the welding process becomes an important tool in controlling distortions, among other manufacturing problems. The objective of this study is to identify problems in welded joints and ensure an effective control of these problems seeking to improve the productivity and quality of welded equipment through improvements in the welding sequence, use of fixing devices and tools that can help in controlling these deformations.

KEYWORDS: Distortions. Welding. Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de soldagem MIG/MAG.....	15
Figura 2 -Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG	16
Figura 3 - Tipos de juntas.....	17
Figura 4 - Tipos de chanfro	17
Figura 5 - Variação do limite de escoamento, do modo de elasticidade e do coeficiente de expansão térmica	19
Figura 6 - Distribuição de tensões residuais devidas a vínculos internos em juntas de topo	20
Figura 7 - Distribuição de tensões residuais devidas a vínculos externos em juntas de topo.	20
Figura 8 - Procedimentos para Reduzir ou Aliviar as Tensões Residuais	22
Figura 9 - Deflexão longitudinal de uma barra pelo calor de soldagem em relação ao tempo	23
Figura 10 - Ilustração dos seis tipos de distorções causadas pela soldagem	24
Figura 11 - Quantidade de solda para chanfros em V e X	25
Figura 12 - Soldagem intermitente	26
Figura 13 - Soldagem próxima a linha neutra.....	26
Figura 14 - Soldagem com passe a ré	27
Figura 15 - Montagem pré-tensionada de uma junta em “T”	27
Figura 16 - Métodos de remoção das distorções	28
Figura 17 - Desempeno por aquecimento localizado em pontos.....	29
Figura 18 - Desempeno por aquecimento em linha.....	29
Figura 19 - Desenho de conjunto da grade	31
Figura 20 - Sequência dos passes de solda	32
Figura 21 - Pré-encurvamento da grade	32
Figura 22 - Perfil do pré-encurvamento.....	33
Figura 23 - Grade soldada	33
Figura 24 - Verificação da planicidade	34
Figura 25 - Parâmetros usados para efetuar a soldagem	35
Figura 26 - Sequência de passes no para-choque.....	35
Figura 27 - Deflexão causada por tensões térmicas	36
Figura 28 – Deflexão máxima.....	36

Figura 29 - Para-choque sem distorções	37
Figura 30 – Comparação do tempo de fabricação entre os processos 1 e 2	38
Figura 31 - Comparação do tempo de fabricação entre os processos 3 e 4	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	American Welding Society
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
Kgf	Quilograma-força
mm ²	Milímetro quadrado
mm	Milímetro
α	Coefficiente de dilatação térmica
σ_y	Limite de escoamento
E	Módulo de elasticidade
V	Volt
A	Ampere
cm	Centímetro
min.	Minuto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	BREVE HISTÓRICO DAS TÉCNICAS DE SOLDAGEM	14
2.2	PROCESSO MIG/MAG	15
2.3	TERMINOLOGIA DA SOLDAGEM	17
2.4	METALURGIA DA SOLDAGEM	18
2.5	TENSÃO RESIDUAL	18
2.6	DISTORÇÕES NO PROCESSO DE SOLDAGEM	23
2.7	CONTROLE DAS DISTORÇÕES CAUSADAS PELA SOLDAGEM	25
2.7.1	Usar chanfros duplos	25
2.7.2	Usar soldas intermitentes	26
2.7.3	Soldagem próxima à linha neutra	26
2.7.4	Soldagem com passe a ré (“backstep welding”)	27
2.7.5	Utilizar a pré-deformação	27
2.7.6	Remoção das distorções residuais	28
3	METODOLOGIA	30
4	DESENVOLVIMENTO	31
4.1	ESTUDO DE CASO	31
4.2	CONJUNTO SOLDADO I	31
4.3	CONJUNTO SOLDADO II	34
4.4	GANHOS APRESENTADOS NA MUDANÇA DOS PROCESSOS	37
4.4.1	Conjunto soldado I	37
4.4.2	Conjunto soldado II	39
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

A indústria atual busca sempre aumento de produtividade, que seria a máxima produção com o menor custo de fabricação possível, que juntamente com a eficiência energética são os principais desafios técnicos da indústria moderna. Para se obter um aumento da produtividade nas soldagens são utilizados os processos com maior grau de automação e com as maiores taxas de deposição de material.

Já que o processo de soldagem utiliza o calor como principal fonte de energia e que normalmente estamos falando de processos liquido-liquido onde tanto o material de base quanto o material de adição se fundem, é necessária uma grande quantidade de calor para que o processo de soldagem ocorra.

O calor é, portanto, parte fundamental à realização das uniões, mas que pode, por outro lado, representar uma possível fonte de problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona de solda causando deformações indesejadas nas peças que estão sendo unidas em função das tensões internas que ocorrem nos materiais pós soldagem.

Então este trabalho tem por objetivo apresentar as causas destas distorções e melhoria nos processos, ferramentas para minimizar estas deformidades, reduzindo os trabalhos para desempenhar as peças e conseqüentemente os custos de produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE HISTÓRICO DAS TÉCNICAS DE SOLDAGEM

A arte de unir dois ou mais materiais metálicos já era conhecida desde as eras pré-históricas. Um exemplo é a brasagem que utiliza ligas de ouro e cobre, ou então de chumbo e estanho, empregada desde os anos 3000 ou 4000 a.C. Logicamente, as únicas fontes de energia conhecidas naquela época restringiam-se à lenha ou ao carvão vegetal, de modo que esta limitação não permitiu um progresso maior das técnicas de união de metais. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

Foi somente depois da descoberta da energia elétrica que a soldagem teve o impulso necessário para atingir o estágio atual. Prova disso é que o processo de soldagem só se desenvolveu melhor, em sua maioria, no final do século XIX. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

O arco elétrico de soldagem foi empregado pela primeira vez em 1885, por Bernardos e Stanislav Olszewsky, esse processo foi baseado em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada. (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012)

Em 1892, Slavionoff utilizava pela primeira vez na história da soldagem um eletrodo metálico que se fundia diretamente na poça de fusão. Posteriormente, o sueco Oscar Kjellberg que um eletrodo metálico, revestido por um material formado de escória, melhorava sensivelmente a qualidade da junta soldada, dando assim, início a era dos eletrodos revestidos bastante difundido até os dias atuais. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

Outro marco no desenvolvimento da tecnologia de soldagem foi em 1886, Thompsom inventou o processo de soldagem por resistência elétrica; já em 1901, a chama oxiacetilênica foi empregada com grande sucesso na união de materiais metálicos, por Fouché e Piccard. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

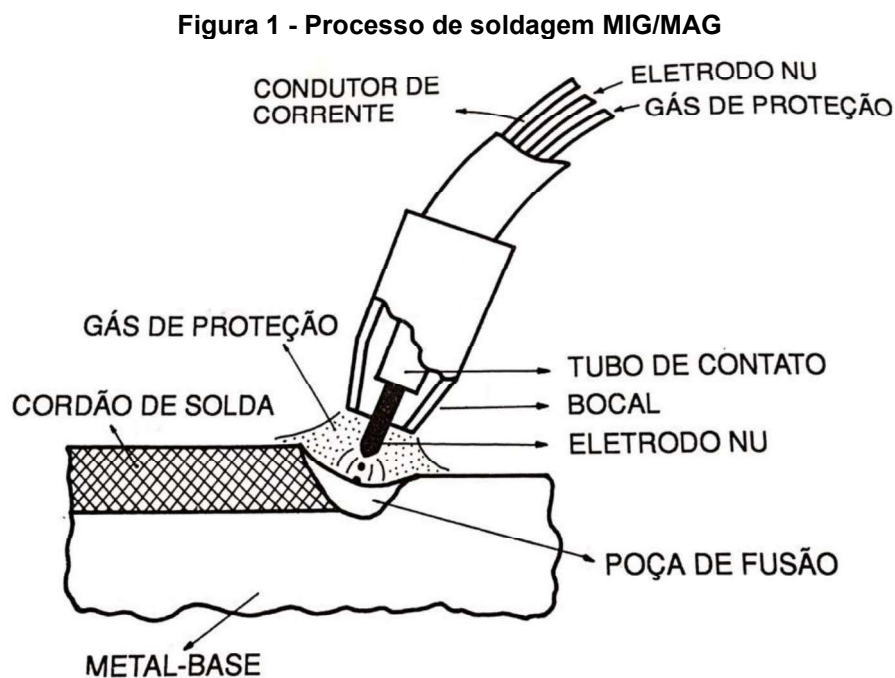
Após um intervalo de relativa estagnação, iniciou-se, em 1926, a segunda fase áurea da tecnologia de soldagem, cabendo a Lugumir desenvolver, naquele ano, o processo de soldagem por meio de hidrogênio atômico. Logo em seguida, Hobart e Denver patentearam o processo de soldagem em atmosfera de gás inerte,

cujo emprego é largamente difundido nos dias atuais. Em 1935, Kennedy divulgava seus trabalhos sobre um método automatizado de soldagem, e que deu origem ao processo de arco submerso. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

O rápido progresso da ciência e da tecnologia, a partir dos anos 50, proporcionaram um novo impulso à Engenharia de Soldagem, o que possibilitou o desenvolvimento de novas técnicas, desta vez muito mais sofisticadas e mais voltadas para aplicações específicas. Durante esta fase, vários processos foram patenteados, dentre os quais podem ser destacados os métodos de soldagem por pressão a frio, por atrito, em atmosfera de gás ativo ou Co_2 , a soldagem por eletroescória, a soldagem ultrassônica, por feixe de elétrons, a plasma, por laser e outros mais. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

2.2 PROCESSO MIG/MAG

De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), os processos MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas) utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e o metal de base. A proteção da poça de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (MIG) ou gás ativo (MAG). A Figura 1 mostra esquematicamente o processo.

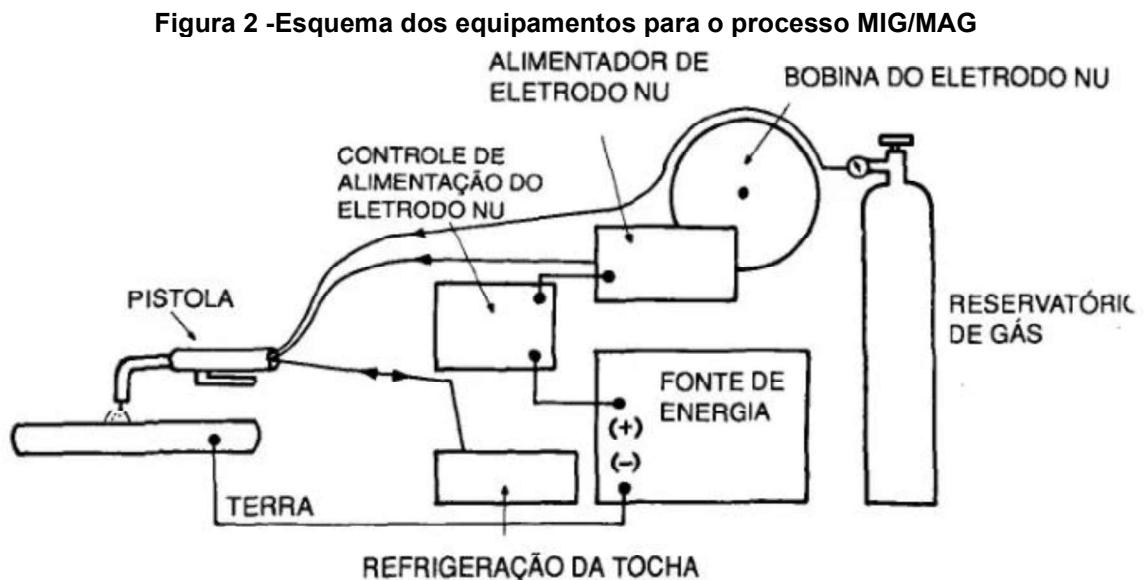


Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

A fonte de energia pode ser um retificador ou um gerador, ambos com características de potencial constante.

O alimentador do eletrodo é ligado a uma fonte de energia que possui controle da velocidade de alimentação; a velocidade mais a tensão selecionada na fonte, determinam o valor da corrente de soldagem. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

Os equipamentos básicos para soldagem MIG/MAG são mostrados na Figura 2.



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

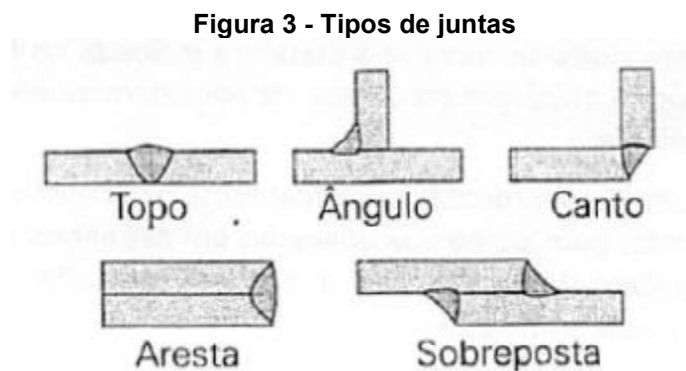
Dentre as principais vantagens do processo se destacam:

- a) A soldagem pode ser executada em todas as posições;
- b) A velocidade de soldagem é elevada, portanto, tem alta produtividade;
- c) Não há formação de escória e, conseqüentemente, não se perde tempo na sua remoção, nem se corre o risco de inclusão de escória na soldagem em vários passes;
- d) Facilidade de execução da soldagem;

2.3 TERMINOLOGIA DA SOLDAGEM

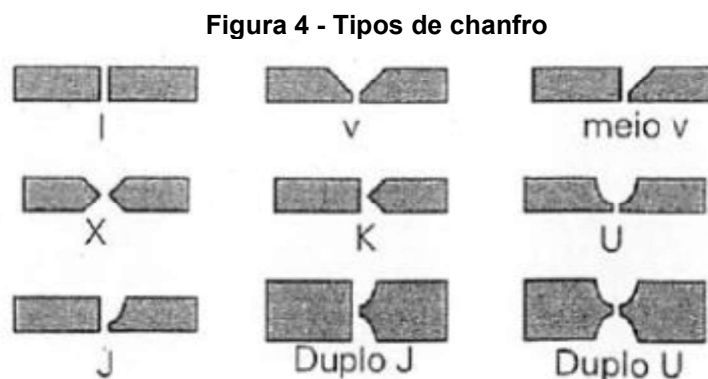
A soldagem é uma operação que tem como objetivo unir as peças, e a solda é o resultado final desta operação.

Junta é nome dado a região onde as peças serão unidas através da soldagem, os principais tipos de junta são mostrados na Figura 3. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), disposição das peças para união determina os vários tipos de junta. No entanto, muitas vezes as necessidades de projeto exigem uma preparação da peça para soldagem na forma de cortes ou conformação especial da junta. Estas aberturas ou sulcos na superfície da peça ou peças a serem unidas recebem o nome de chanfro. A Figura 4 mostra os principais tipos de chanfro.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

2.4 METALURGIA DA SOLDAGEM

De acordo com Modenesi, Marques e Santos (2012), a operação de soldagem causa alterações localizadas e bruscas de temperatura no material soldado. Estas alterações, por sua vez, provocam mudanças na estrutura e afetam as propriedades do material. Desta maneira, essas alterações aparecem na forma de degradação nas propriedades, o que pode acabar implicando na utilização desse material soldado no futuro. Existem duas maneiras de se melhorar esse problema. A primeira é melhorar a soldabilidade dos materiais, a segunda é controlar a operação de soldagem de modo a minimizar a degradação das propriedades da junta soldada.

Para Wainer, Brandi e Mello (1992), o calor é elemento essencial para execução de juntas soldadas, mas pode, por outro lado, representar fonte potencial de problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona de solda.

Esses efeitos são resultado dos ciclos térmicos e das temperaturas a que a zona de solda é submetida; o estudo desses tópicos é muito importante para o entendimento dos fenômenos térmicos que tem lugar durante a soldagem, bem como para o controle das variáveis que afetam o processo. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

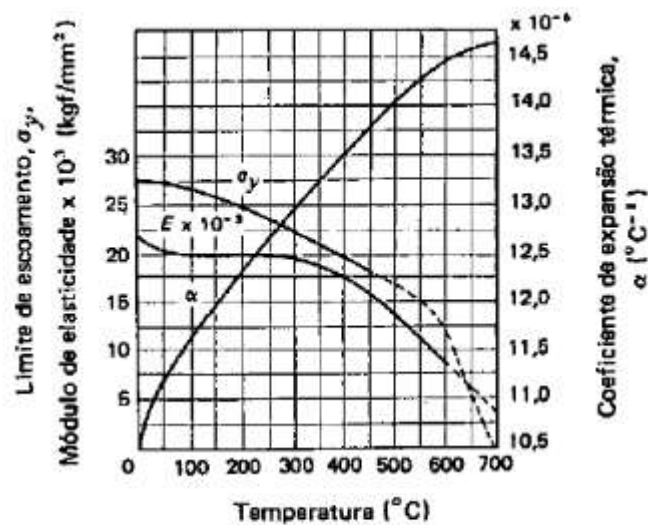
2.5 TENSÃO RESIDUAL

O processo de soldagem segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), é caracterizado pelo aquecimento localizado das peças, enquanto o restante permanece em temperaturas muito inferiores. O local aquecido tende a se dilatar, mas essa dilatação é restringida pelas partes adjacentes que estão a temperaturas inferiores, o que resulta em deformações elásticas e plásticas concentradas nas regiões aquecidas.

Por conta da deformação plástica localizada, ao final do processo de soldagem, tensões internas (tensões residuais) permanecem na junta soldada que ainda tende a apresentar mudanças permanentes de forma e de dimensões (distorções). (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)

Para Okumura e Taniguchi (1982), durante a soldagem, o metal é aquecido no local e resfriado, o que leva as expansões e contrações térmicas do material. Como esses efeitos são restringidos pelas zonas frias isso causa tensões de soldagem naquela região. No entanto, o limite de escoamento do metal baixa e as tensões de restrição aumentam, a altas temperaturas. Com isso o metal é deformado plasticamente na zona de soldagem conforme a Figura 5.

Figura 5 - Variação do limite de escoamento, do modo de elasticidade e do coeficiente de expansão térmica



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982)

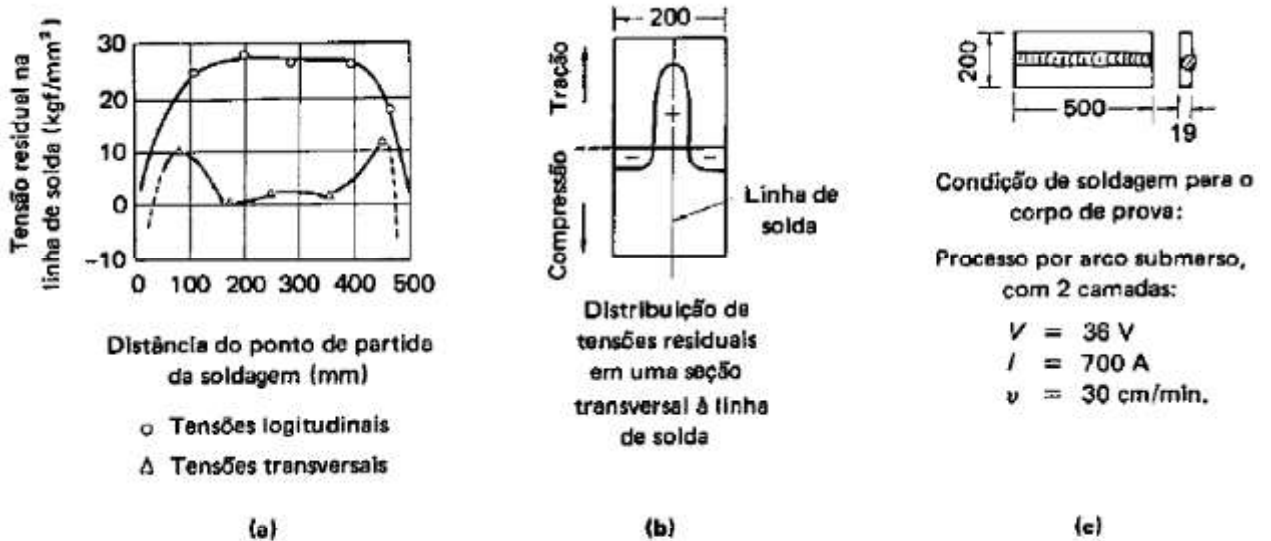
A deformação plástica continuará parcialmente, após a soldagem e entrará em equilíbrio elástico com a zona adjacente, produzindo-se então as tensões residuais.

As tensões residuais devidas à soldagem são, grosso modo, divididas em dois grupos:

- (a) Tensões residuais devidas a vínculos internos. São tensões auto-equilibradas, geradas pelo aquecimento e resfriamento local de um membro estrutural não vinculado externamente;
- (b) Tensões residuais devidas a vínculos externos. São tensões residuais geradas pela ação restritiva de vínculos externos (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

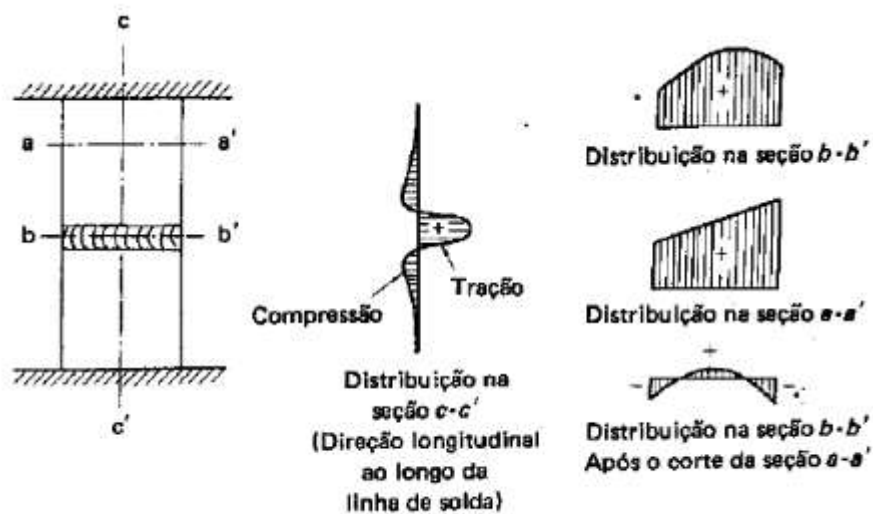
Exemplo são mostrados destes casos nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 - Distribuição de tensões residuais devidas a vínculos internos em juntas de topo



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982)

Figura 7 - Distribuição de tensões residuais devidas a vínculos externos em juntas de topo.



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982)

Distorções são percebidas de forma relativamente fácil, e por motivos evidentes, devem ser controladas na operação de soldagem. Porém, tensões residuais não são visíveis diretamente, mas afetam o comportamento da junta soldada em diferentes perspectivas como levando a formação de trincas e mudanças na resposta à fadiga, tendência à fratura frágil e à corrosão. Desta maneira, é indispensável o conhecimento das características e das medidas para sua prevenção e controle das tensões residuais como da distorção. Embora estas

distorções estejam relacionadas, é relevante analisar separadamente os dois fenômenos uma vez que cada um tem consequências e técnicas de controle próprias. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)

“Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas.” (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Para Okumura e Taniguchi (1982), tensões residuais tem como causa a deformação plástica de compressão, que se desenvolve em torno do cordão de solda, devido aos ciclos locais de aquecimento e resfriamento.

Após o término do processo de soldagem, as tensões residuais podem ser aliviadas em uma peça ou estrutura por métodos térmicos ou mecânicos de acordo com a Figura 8.

Figura 8 - Procedimentos para Reduzir ou Aliviar as Tensões Residuais

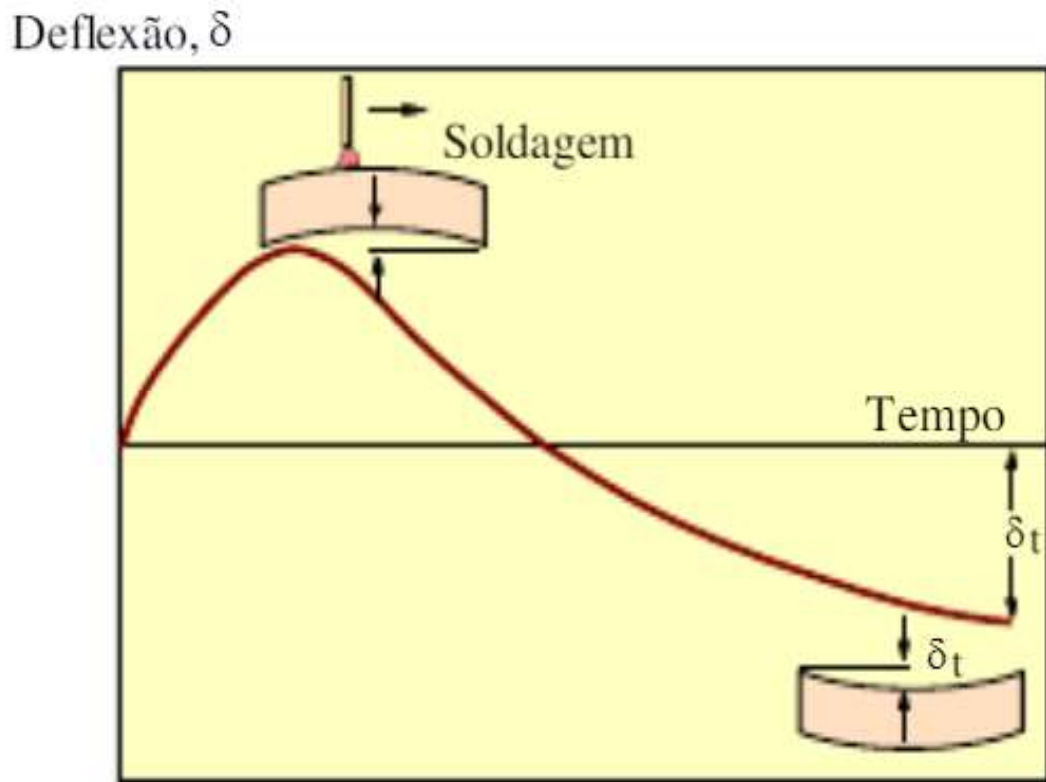
	<i>Procedimento</i>	<i>Descrição</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Processos mecânicos	Martelamento	Martelamento do metal depositado e de suas adjacências, durante ou após a soldagem.	Aplicável somente em materiais dúteis, como o aço doce, devido à simplicidade da operação; poderá haver um refinamento dos grãos.	Inadequado para materiais de baixa ductilidade.
	Encruamento	A junta soldada, submetida a tensões residuais, é deformada plasticamente pela aplicação de cargas de tração; quando as cargas são removidas, as tensões residuais são aliviadas.	Bastante eficiente em tanques esféricos, devido à sua geometria simples e à possibilidade de estimar as tensões atuantes; a pressão hidrostática é aplicada para encruar tanques esféricos.	Inadequado para estruturas de formas complicadas, uma vez que é impossível carregar uniformemente uma estrutura deste tipo.
	Vibração	Aplica-se vibração na estrutura, submetida a tensões residuais, causando uma ressonância de baixa frequência, o que ocasiona uma deformação plástica parcial na estrutura, e as tensões residuais são então aliviadas por essas deformações resultantes.	A operação é bastante simples.	Inadequado para chapas grossas ou estruturas de grandes dimensões; o efeito de alívio não é uniforme.
Processos térmicos	Recozimento para alívio de tensões	Aquecem-se as juntas soldadas de aços tipo ferrítico até 600 ou 700°C e as juntas de aços austeníticos até 900°C; após a uniformização de temperatura, resfria-se gradualmente, até a temperatura ambiente; o recozimento pode ser local ou total.	Muito utilizado e bastante eficiente.	O recozimento total é inaplicável a estruturas de grandes dimensões; o alívio de tensões, por meio de recozimento também é difícil de ser executado no campo.
	Recozimento a alta temperatura	Neste processo, as juntas soldadas são aquecidas até 900 a 950°C; após a uniformização da temperatura, procede-se ao resfriamento lento, para amaciar a zona que foi endurecida durante a soldagem ou a usinagem.	As tensões residuais poderão ser completamente aliviadas.	Neste processo, exige-se um aquecimento uniforme das juntas, e deve-se tomar as devidas precauções para não distorcer a estrutura.
	Alívio de tensões a baixas temperaturas	Aquecem-se ambos os lados da linha de solda até 150 a 200°C, em uma largura total de cerca de 60 a 130 mm; logo em seguida, a linha de solda é resfriada com água.	Adequado a estruturas de grandes dimensões que não permitem o alívio em fornos.	O efeito de alívio é baixo; o alívio uniforme de tensões é impraticável.

Fonte: Okumura e Taniguchi (1982)

2.6 DISTORÇÕES NO PROCESSO DE SOLDAGEM

Os materiais soldados sofrem distorções, de forma e de dimensão como efeito do movimento de material (deformação plástica) que ocorrem através do desenvolvimento das tensões térmicas durante o processo de soldagem. A distorção final de um material soldado é continuamente contrária e, em geral, da mesma ordem de grandeza do movimento de material que ocorre durante a soldagem conforme Figura 9. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

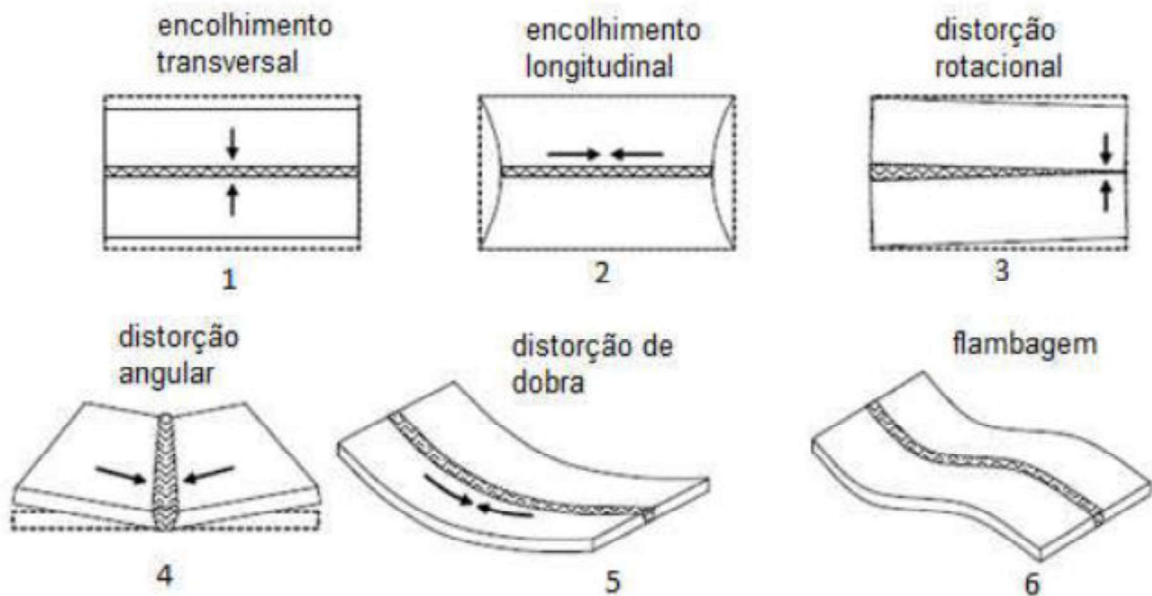
Figura 9 - Deflexão longitudinal de uma barra pelo calor de soldagem em relação ao tempo



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

Segundo Masubuchi (1991), o processo de soldagem especificamente resulta em alguns tipos de deformações como contrações transversais, longitudinais e distorções angulares, rotacionais e de flambagem ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Ilustração dos seis tipos de distorções causadas pela soldagem



Fonte: Masubuchi (1991)

De acordo com Okumura e Taniguchi (1982), há vários fatores que influenciam nas distorções residuais, que podem ser classificados em dois grupos:

Um relaciona o calor da soldagem e os seguintes itens pertencentes a este grupo:

- Insumo de calor (voltagem do arco, corrente de soldagem, velocidade de soldagem, diâmetro e tipo do eletrodo);
- Processo de soldagem;
- Temperatura de pré-aquecimento da chapa;
- Espessura da chapa e geometria da junta;
- Número de passes de solda e proporção do material removido na limpeza de raiz.

O outro grupo se relaciona ao grau de restrição da junta soldada e os seguintes itens são considerados:

- Sequência de soldagem e de deposição;
- Forma, dimensões e disposição dos elementos restritivos.

2.7 CONTROLE DAS DISTORÇÕES CAUSADAS PELA SOLDAGEM

Segundo Okumura e Taniguchi (1982), as distorções devidas à soldagem não só reduzem a precisão e a aparência externa de uma estrutura soldada, mas também diminuem a resistência dos membros estruturais. A remoção dessas distorções, geralmente, é bastante trabalhosa, tanto em termos de mão-de-obra, como em termos de tempo desperdiçado nesta operação. Por isso, é desejável que se adote um procedimento que previna as distorções devidas à soldagem, antes da execução.

Existem várias causas que podem provocar as distorções nas uniões soldadas, e estas incluem deformações da matéria-prima, durante seu transporte ou manuseio, e deformações devidas ao corte a gás. Estas deformações iniciais devem ser eliminadas antes do início da soldagem (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

De acordo com a Petrus Consultoria em Controle da Qualidade (2020), deve-se evitar ao máximo a soldagem excessiva, pois quanto maior a quantidade de material depositado numa junta maiores serão as forças de contração. Os chanfros devem ter abertura e espaçamentos menores compatíveis com a penetração completa. Em chapas relativamente espessas o ângulo do chanfro pode ser diminuído se o espaçamento da raiz for aumentado.

2.7.1 Usar chanfros duplos

Uma junta com chanfro em X requer cerca de metade da quantidade de metal depositado que a necessária em uma junta com chanfro em V numa chapa de mesma espessura. Além disso, a solda e, ambos os lados possibilita o equilíbrio dos esforços de contração exemplificado na Figura 11 (PETRUS CONSULTORIA EM CONTROLE DA QUALIDADE, 2020).

Figura 11 - Quantidade de solda para chanfros em V e X



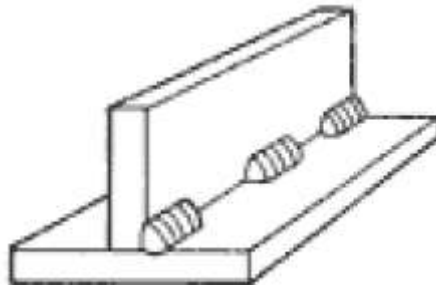
Fonte: Petrus Consultoria em Controle da Qualidade (2020)

2.7.2 Usar soldas intermitentes

Sempre que possível deve-se utilizar soldas intermitentes ao invés da solda contínua, pois as soldas intermitentes podem reduzir em 75% a quantidade de metal depositado, mantendo ainda a necessária resistência Figura 12 (PETRUS CONSULTORIA EM CONTROLE DA QUALIDADE, 2020).

A distorção, geralmente, pode ser atenuada pelo uso de sequências simétricas de soldagem, pois, desta forma, obtém-se um insumo balanceado de calor. Sequências alternadas são efetivas para prevenir a distorção rotacional e para reduzir a contração longitudinal de uma junta soldada (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

Figura 12 - Soldagem intermitente

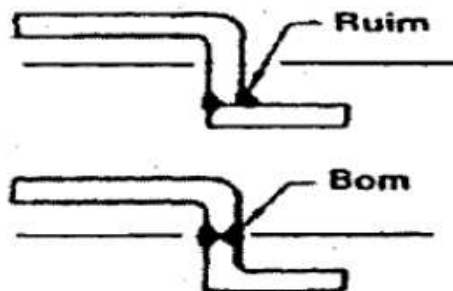


Fonte: AWS (2001)

2.7.3 Soldagem próxima à linha neutra

A deformação é minimizada quando se tem o menor braço de alavanca possível para as forças de contração puxar o perfil fora de seu alinhamento. A Figura 13 mostra essa situação. Tanto os projetos de solda quanto a sequência de soldagem podem efetivamente ser utilizado para controlar este tipo de deformação. (PETRUS CONSULTORIA EM CONTROLE DA QUALIDADE, 2020).

Figura 13 - Soldagem próxima a linha neutra

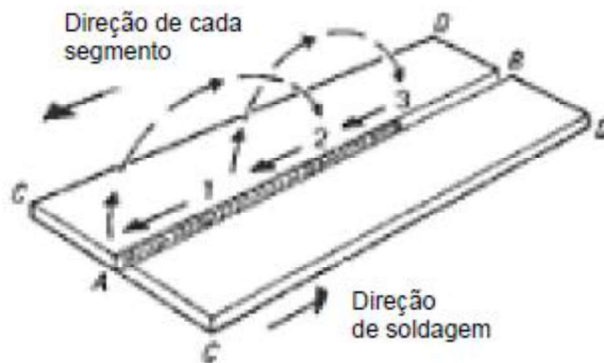


Fonte: Petrus Consultoria em Controle da Qualidade (2020)

2.7.4 Soldagem com passe a ré (“backstep welding”)

Na técnica de soldagem com passe a ré, a progressão geral da soldagem pode ser, por exemplo, da esquerda para direita, mas com o segmento do cordão depositado da direita para a esquerda conforme Figura 14 (PETRUS CONSULTORIA EM CONTROLE DA QUALIDADE, 2020).

Figura 14 - Soldagem com passe a ré

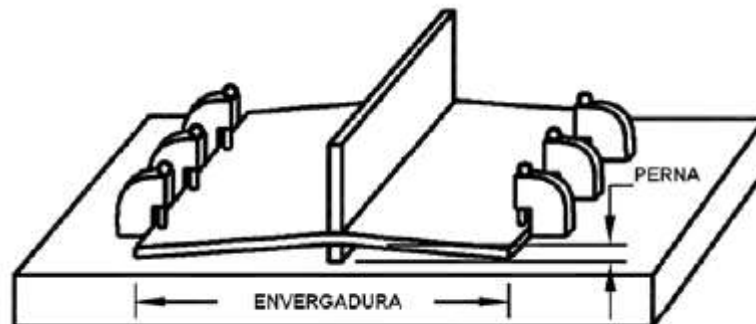


Fonte: AWS (2001)

2.7.5 Utilizar a pré-deformação

Colocar as partes a serem soldadas fora da disposição pode fazer com que a contração trabalhe de maneira construtiva. Diversos conjuntos, são pré-deformados desta maneira como mostra a Figura 15. A quantidade requerida da pré-deformação para que a contração puxe as chapas no alinhamento pode ser determinada à partir de poucas soldas experimentais (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

Figura 15 - Montagem pré-tensionada de uma junta em “T”

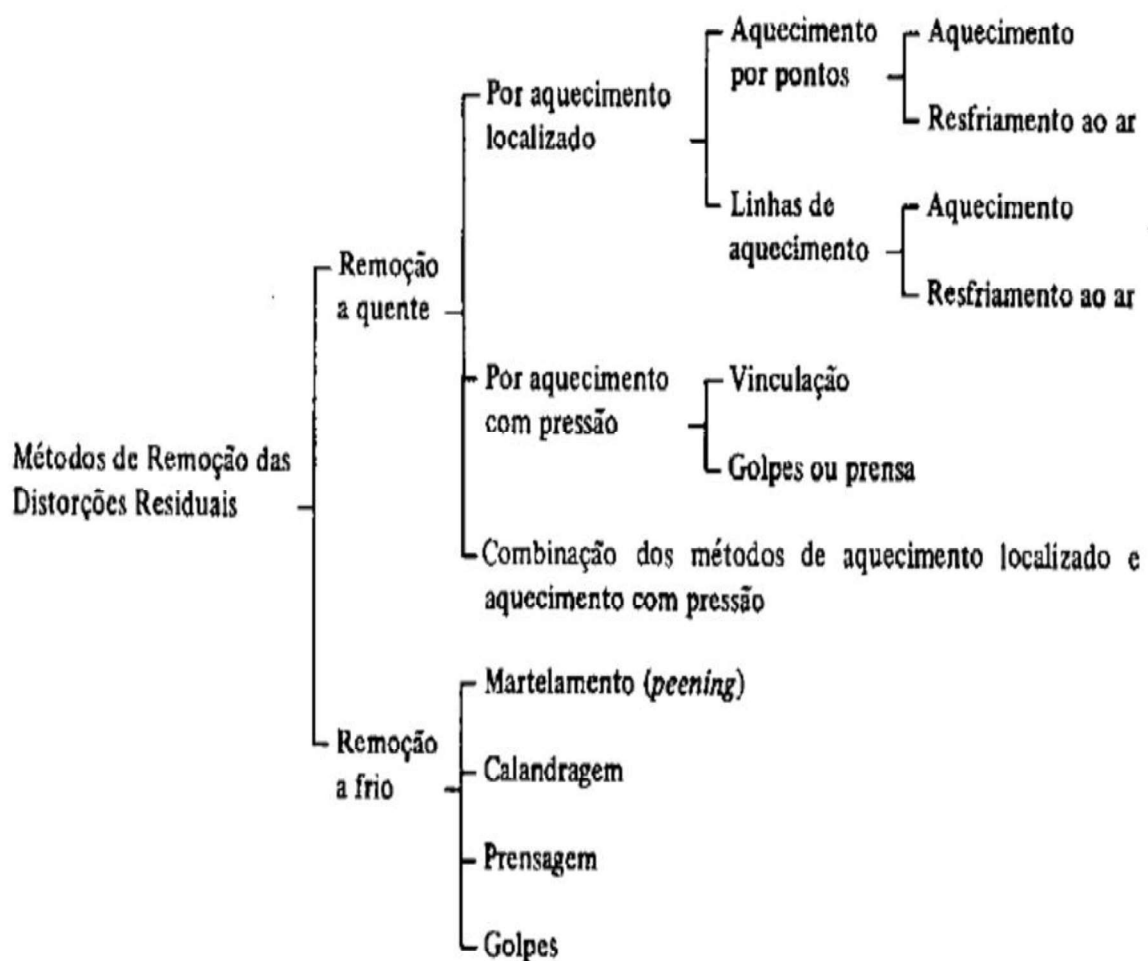


Fonte: Okumura e Taniguchi (1982)

2.7.6 Remoção das distorções residuais

O princípio básico para remover as distorções residuais de soldagem consiste em alongar as regiões contraídas e contrair as regiões alongadas. De modo geral, é costume subdividir os procedimentos de remoção em dois grandes grupos: mecânicos e térmicos conforme Figura 16. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

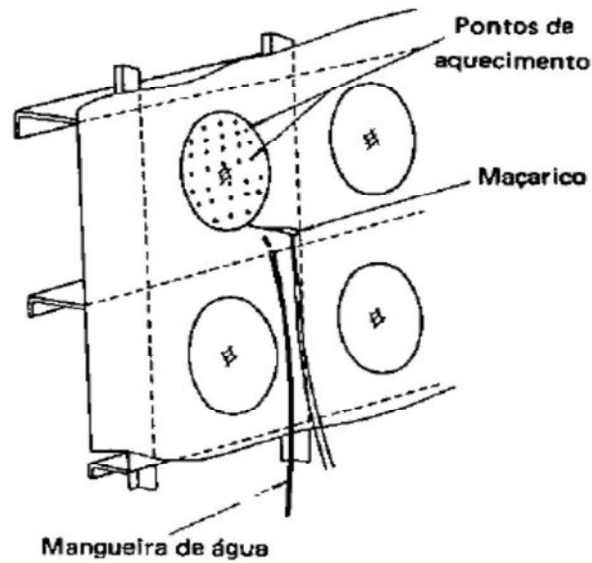
Figura 16 - Métodos de remoção das distorções



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982)

O método de aquecimento por pontos, geralmente, é utilizado em painéis reforçados ilustrado na Figura 17. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

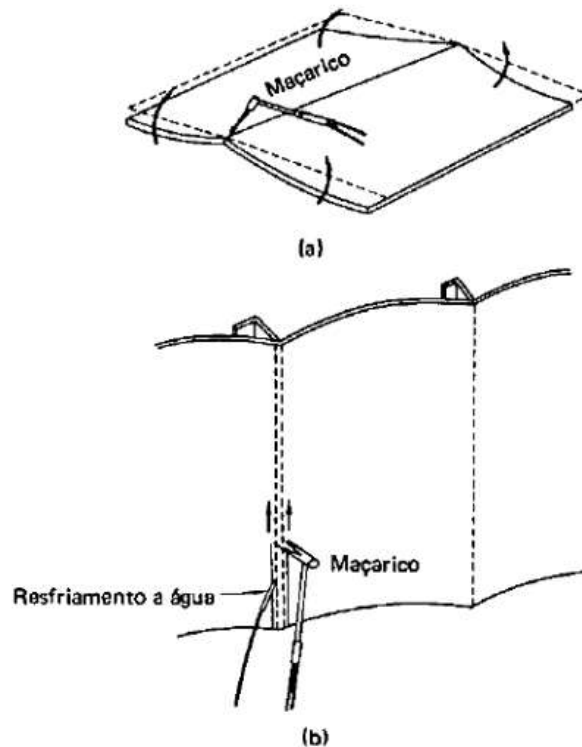
Figura 17 - Desempeno por aquecimento localizado em pontos



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982)

O aquecimento em linhas é empregado, via de regra, para endireitar distorções angulares em juntas de topo ou filete. A zona é aquecida em linha, como mostra a Figura 18. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

Figura 18 - Desempeno por aquecimento em linha



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982)

3 METODOLOGIA

Conforme descrito no livro “Como elaborar projetos de pesquisa”, Gil (1991), a pesquisa pode ser definida como um método lógico e sistêmico que tem como finalidade propiciar soluções aos problemas que precisam ser resolvidos. É necessária a realização da pesquisa para se buscar informações ainda não obtidas, ou organizar informações já disponíveis tornando possível a análise da mesma, com a finalidade de solucionar os problemas apresentados.

A pesquisa é desenvolvida por meio de um processo que envolve diversas fases, tendo início na descrição adequada do problema a ser investigado e que só é finalizado apresentação de resultados. (SILVA; MENEZES, 2005)

Dentro de diversas formas de classificar as pesquisas o presente trabalho pode ser classificado como pesquisa aplicada, que tem a finalidade de buscar o entendimento da situação investigada, para serem aplicadas à solução de problemas, no caso os Processos de Soldagem. Referente a abordagem do problema, pode-se considerar a pesquisa como quantitativa, em que os problemas podem ser mensuráveis para a análise e busca de soluções, fazendo a utilização de técnicas estatísticas e ferramentas da qualidade (SILVA; MENEZES, 2005). O objetivo é realizar uma pesquisa exploratória, com acompanhamento no chão de fábrica para analisar detalhadamente o problema apresentado, buscando soluções ou aperfeiçoamento das mesmas.

Segundo Yin (2003), o estudo de caso é mais indicado em situações em que os comportamentos relevantes não podem ser manipulados, mas onde é possível lidar com uma variedade de evidências. Por meio do método técnico “estudo de caso” é possível identificar durante o processo novas situações, que não estavam propostas inicialmente. Essas novas situações podem ser mais importantes na resolução de problemas, que as situações sugeridas no início da pesquisa, alterando o foco da investigação. Verifica-se o estudo total dos fatores envolvidos no problema. (GIL, 1991)

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 ESTUDO DE CASO

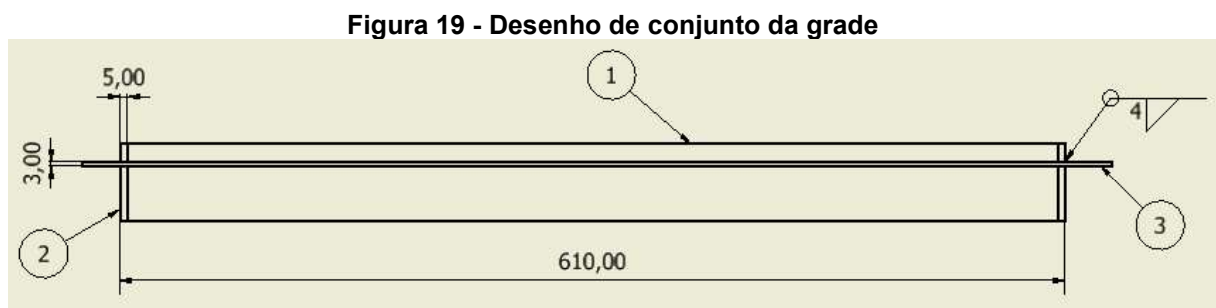
O trabalho em estudo foi realizado com o principal objetivo de apresentar aplicação de soluções pesquisadas no processo visando redução na deformação de peças soldadas. Então foram fabricados dois conjuntos soldados buscando sempre utilizar as técnicas e conhecimentos obtidos através da pesquisa bibliográfica para posterior análise dos resultados.

4.2 CONJUNTO SOLDADO I

No primeiro conjunto soldado foi utilizado o projeto de uma grade onde foi dado foco na soldagem mais crítica com relação a distorção.

Os materiais da grade são, no caso dos itens 1 e 2, chapas de aço de alta resistência e o item 3 é um aço 1020.

O tipo de soldagem realizada é uma solda de filete, com 4mm de perna e em todo o contorno da peça conforme simbologia de solda especificado pelo desenho do projeto mostrado na Figura 19.

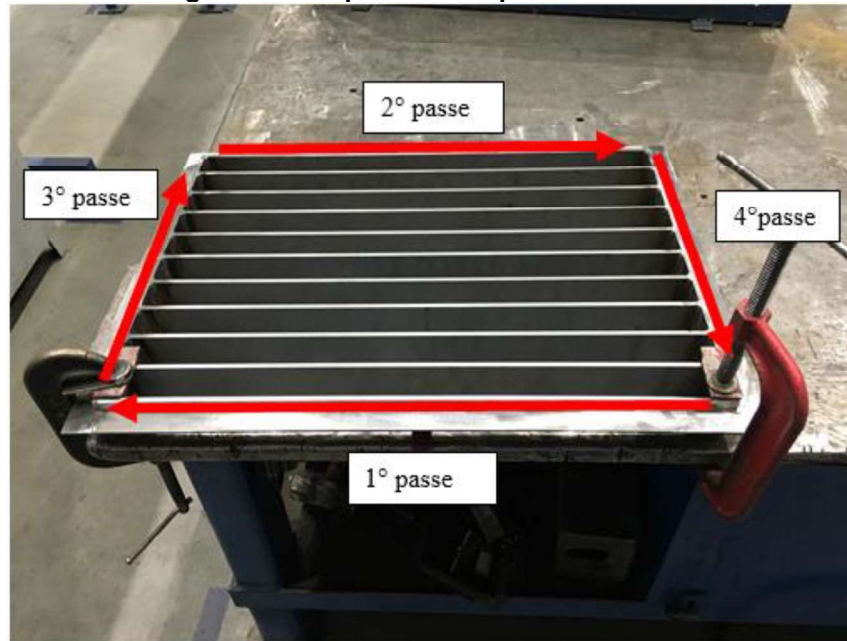


Fonte: O autor (2020)

O processo de solda utilizado foi o MIG e os parâmetros usados foram: corrente de 110A e tensão de 17,9V.

A Figura 20 mostra a sequência de soldagem utilizada para a fabricação da grade.

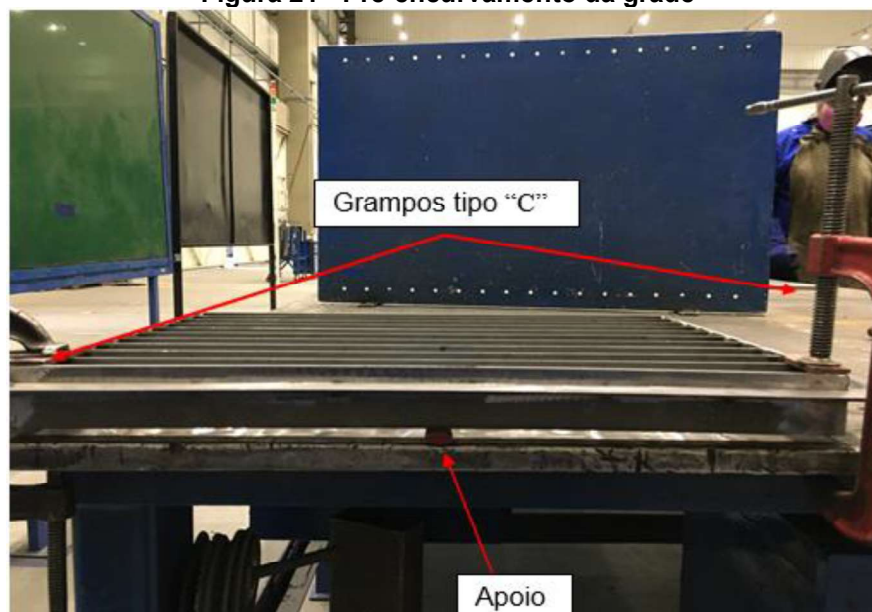
Figura 20 - Sequência dos passes de solda



Fonte: O autor (2020)

Observou-se que devido ao comprimento da peça a ser soldada e a baixa espessura a melhor técnica a ser aplicada para evitar a distorções seria o pré-encurvamento mostrada nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Pré-encurvamento da grade



Fonte: O autor (2020)

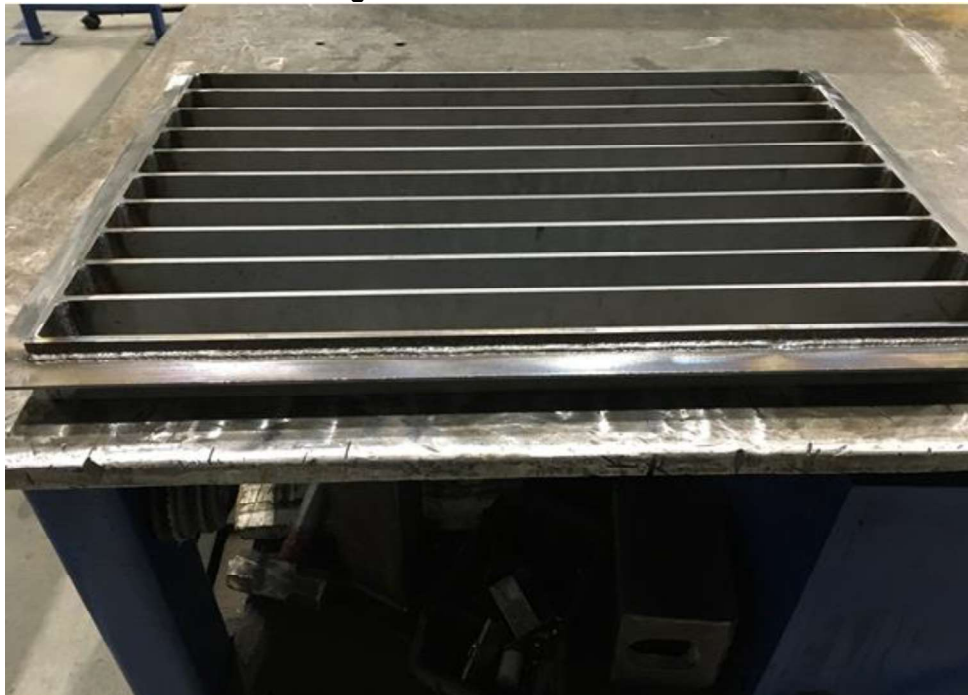
Figura 22 - Perfil do pré-encurvamento



Fonte: O autor (2020)

A mesma técnica foi utilizada para todos os passes da grade. A Figura 23 mostra a grade após finalizada todas as soldas.

Figura 23 - Grade soldada



Fonte: O autor (2020)

Após o resfriamento da grade foi verificado com o auxílio de uma régua de alumínio a planicidade da peça após a soldagem mostrada na Figura 24.

Figura 24 - Verificação da planicidade



Fonte: O autor (2020)

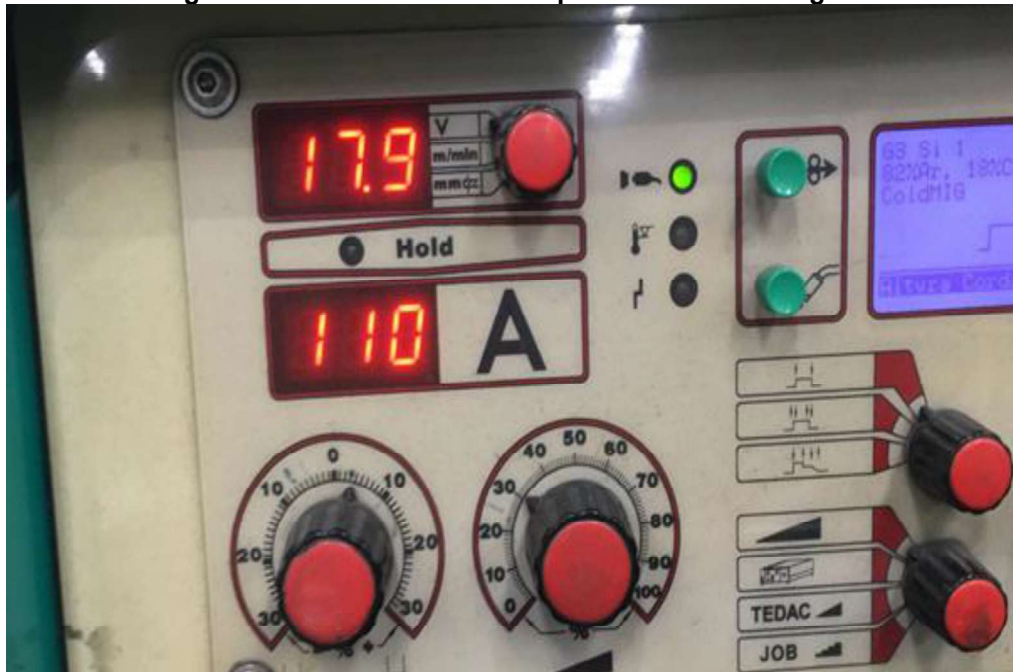
4.3 CONJUNTO SOLDADO II

No segundo conjunto soldado foi utilizado um projeto de um para-choque onde também foi dado foco apenas na solda mais crítica com relação a distorção.

Os materiais do para-choque são chapas de aço carbono de alta resistência com 5mm de espessura.

O tipo de soldagem realizada no para-choque são duas soldas de filete com 5mm de perna e os parâmetros de soldagem de acordo com a Figura 25.

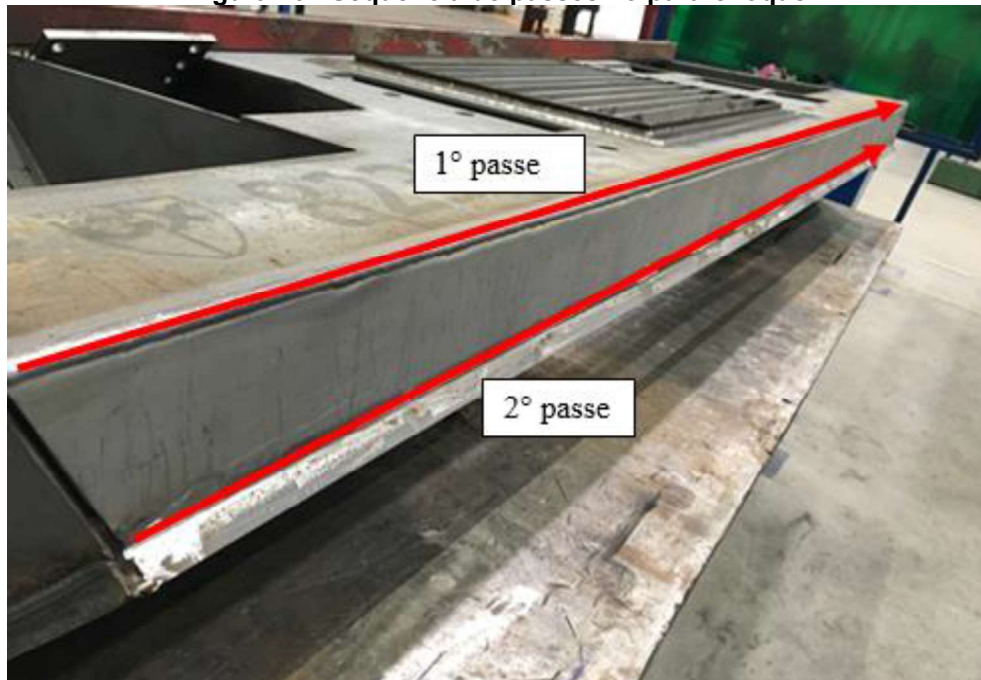
Figura 25 - Parâmetros usados para efetuar a soldagem



Fonte: O autor (2020)

A Figura 26 mostra a sequência de soldagem usada para fabricação do para-choque.

Figura 26 - Sequência de passes no para-choque



Fonte: O autor (2020)

Após o primeiro passe é possível visualizar as tensões térmicas causando uma deflexão longitudinal na área soldada conforme Figura 27.

Figura 27 - Deflexão causada por tensões térmicas



Fonte: O autor (2020)

Com o auxílio de uma régua de alumínio e uma trena é possível medir o ponto de maior deflexão que nesse caso foi de 8mm conforme Figura 28.

Figura 28 – Deflexão máxima



Fonte: O autor (2020)

No caso desse projeto não foi necessário nenhum tipo de dispositivo para tentar corrigir essa distorção pois, o segundo passe irá contrabalancear todo esse aporte térmico fazendo com que a peça retorne ao seu estado inicial como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 - Para-choque sem distorções



Fonte: O autor (2020)

Como é possível observar, as forças de contração do segundo passe fizeram com que a peça retornasse ao seu estado inicial fazendo assim um contrabalanceamento das tensões térmicas.

4.4 GANHOS APRESENTADOS NA MUDANÇA DOS PROCESSOS

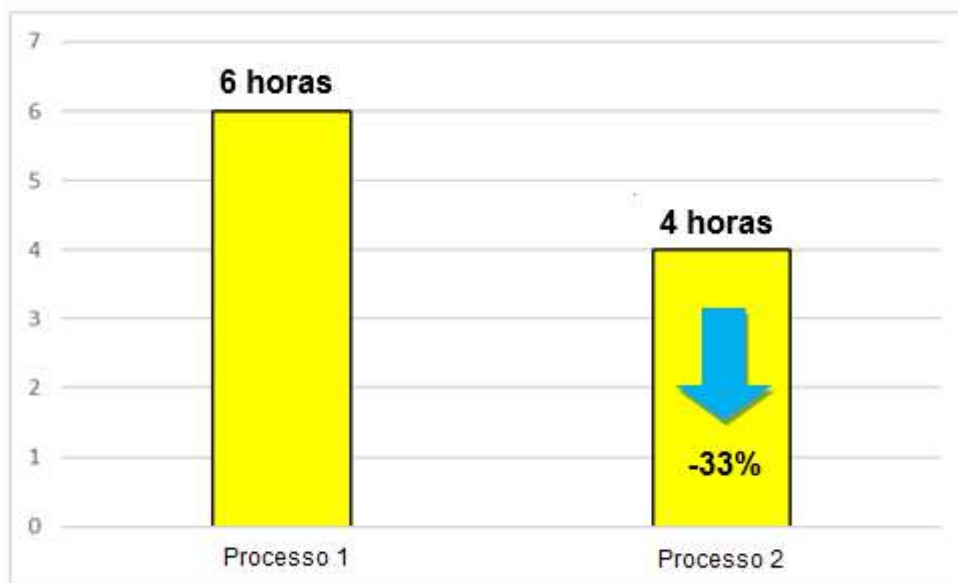
4.4.1 Conjunto soldado I

No Conjunto Soldado I é possível observar, que com a utilização da técnica do pré-encurvamento foi possível obter ganhos tanto na qualidade final da peça com relação as distorções quanto na diminuição do tempo total de fabricação.

Antes de serem aplicadas essas técnicas a peça sofria com problemas de distorções pois o volume de solda aplicada é muito grande com relação a sua espessura e com isso como o projeto não permite nenhum tipo de alteração dimensional era necessária uma mão-de-obra especializada para fazer o desempenho da peça. Isso tudo fazia com a peça tivesse um aumento muito alto no tempo total de fabricação além dos custos adicionais de mão-de-obra.

A Figura 30 mostra em um gráfico a comparação do tempo total de fabricação com o uso da técnica do pré-encurvamento chamado neste gráfico de processo 2 e sem o uso de algum tipo de técnica para se prevenir as distorções chamada de processo 1.

Figura 30 – Comparação do tempo de fabricação entre os processos 1 e 2



Processo 1 - sem o uso da técnica

Processo 2 - com o uso da técnica

Fonte: O autor (2020)

Como é possível observar com a utilização do processo 2 o Conjunto Soldado I teve um ganho significativo no tempo total gasto para fabricação, uma redução de 33% em comparação ao processo 1.

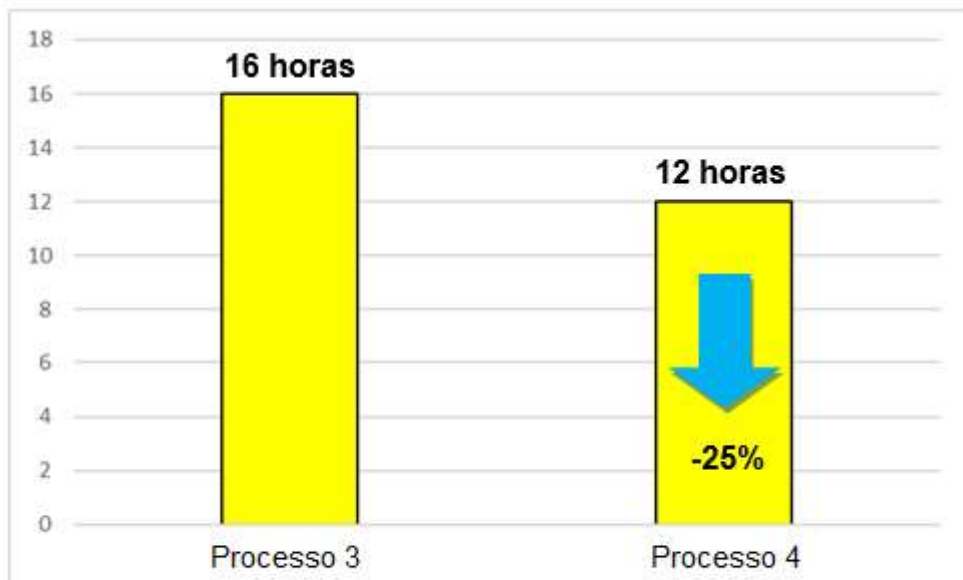
4.4.2 Conjunto soldado II

No Conjunto Soldado II é possível observar que apenas com o contrabalanceamento das tensões é possível obter ganhos principalmente com relação ao tempo pois, não é necessário posicionar nenhum tipo de dispositivo auxiliar de travamento, o que torna a execução do trabalho mais simples, mas com qualidade.

Antes da implementação desse processo a peça sofria grandes problemas com as tensões térmicas, que causavam uma grande deflexão na junta soldada, alterando as dimensões da peça o que acabava acarretando a necessidade de calibração da peça através de mão-de-obra especializada. Com isso além do aumento no tempo total de fabricação se tem um custo de fabricação mais elevado.

A Figura 31 mostra em um gráfico a comparação entre o tempo total de fabricação com o balanceamento térmico nesse caso chamado de processo 4 e sem o balanceamento térmico chamado de processo 3.

Figura 31 - Comparação do tempo de fabricação entre os processos 3 e 4



Processo 3 - sem o uso da técnica de balanceamento térmico

Processo 4 - com o uso da técnica de balanceamento térmico

Fonte: O autor (2020)

Como é possível observar com a utilização do processo 4 o Conjunto Soldado II teve um ganho de 25% no tempo total de fabricação em relação ao processo 3.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu a melhoria do processo de soldagem de dois conjuntos soldados e os resultados puderam ser observados na prática através da aplicação desses processos.

Os problemas causados pelas tensões térmicas foram eliminados através da implementação de novos processos de soldagem utilizando como base os conhecimentos adquiridos através da pesquisa bibliográfica.

Os conjuntos soldados apresentados nesse trabalho obtiveram melhora não só no tempo total de fabricação como demonstrado, mas também na qualidade de fabricação pois a linha de produção se torna mais fluida sem a necessidade de retrabalhar a peça após a soldagem. Com isso, o custo de fabricação se torna mais barato e a qualidade final do produto aumenta.

Enfim, o planejamento do processo de soldagem é essencial para se obter melhores resultados com relação as distorções causadas pelas tensões térmicas, pois quando o mesmo é feito de maneira correta os resultados obtidos são muito mais eficazes.

REFERÊNCIAS

- AWS. **Prevention and control of weld distortion**. Welding Journal 80 (10): p. 97 – 100, out. 2001.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2011.
- MASUBUCHI, K. “Research activities examine residual stresses, distortion in welded structures”, Welding Journal: p. 41 – 47, Dec. 1991.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/lista/40782739-solda/arquivo/37775242-livro-metalurgia-da-soldagem>>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: Ltc, 1982.
- PETRUS CONSULTORIA EM CONTROLE DA QUALIDADE. **Curso inspetor de soldagem nível 1**. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/lista/40782739-solda/arquivo/38514045-apostila-fbts-de-soldagem>>. Acesso em: 19 fev. 2020.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: Ufsc, 2005.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgar Blücher, 1992.
- YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.