

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS-UNIS/MG**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**FERNANDO VITOR MALAQUIAS RIBEIRO**

**ANÁLISE DE MÉTODOS E PROCESSOS DE SOLDA PARA MELHORAR O  
CONTROLE DE DEFORMAÇÃO**

**Varginha/MG**  
**2020**

**FERNANDO VITOR MALAQUIAS RIBEIRO**

**ANÁLISE DE MÉTODOS E PROCESSOS DE SOLDA PARA MELHORAR O  
CONTROLE DE DEFORMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS/MG, como requisito parcial para a Obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do prof. Sidnei Pereira.

**Varginha/MG  
2020**

**FERNANDO VITOR MALAQUIAS RIBEIRO**

**ANÁLISE DE MÉTODOS E PROCESSOS DE SOLDA PARA MELHORAR O  
CONTROLE DE DEFORMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS/MG, como requisito parcial para a Obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em:    /    /

---

(Professor)

---

(Professor)

---

(Professor)

OBS.:

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, pela oportunidade e por renovar a minha força e disposição a cada momento.

Aos meus familiares pela confiança, apoio, paciência e incentivo em todos os momentos, principalmente no período acadêmico, no qual não mediram esforços para que esse sonho se tornasse realidade.

Agradeço em especial ao meu orientador Sidnei, por todo conhecimento compartilhado, pelas cobranças, pela dedicação e paciência. Meu muito obrigado.

Dedico este trabalho a todos que contribuíram,  
para a realização desta grande conquista em  
minha vida.

“Grandes batalhas só são dadas a grandes guerreiros”.  
(Mahatma Gandhi)

## RESUMO

A temática do presente trabalho tratou-se da “análise de métodos e processos de solda para melhorar o controle de deformação”. O objetivo geral do trabalho foi analisar o custo-benefício dos diferentes métodos e processos de solda em aço de baixo carbono, atendendo o objetivo de controle de deformação. Através da pesquisa bibliográfica identificou-se os métodos e processos de soldas, o controle de distorção do produto gerada pela solda e a solda MIG/MAG. Apresentou-se um estudo de caso a fim de identificar o controle da deformação de um produto na zona termicamente afetada na solda de união de componentes de aço de baixo teor de carbono, avaliando diferentes métodos e processos. Pretendeu-se chegar à uma conclusão de qual solução promoverá uma melhor qualidade e controle. Por fim, foi analisado o custo-benefício de cada método e processo, levando em consideração, além dos fatores mencionados o tempo de payback em uma linha de produção de tanques de ar comprimido com aplicação em caminhões e toda linha pesada automotiva. Identificou-se que a solda MIG/MAG garante o melhor método e processo de solda apresentando o melhor desempenho e custo-benefício, garantido a qualidade e propriedades mecânica dos componentes soldados no produto. Conclui-se que os métodos, processos de solda e o estudo da sequência de soldagem, é de sua importância para redução e eliminação de distorções provocadas pelo processo do produto. Isto se deve à necessidade de melhorar a produtividade e a qualidade com redução de custos.

**Palavras-Chaves:** Soldagem. Redução de custos. Métodos e processos de solda. Controle de distorção. Produto.

## **ABSTRACT**

*The theme of this work was “analysis of welding methods and processes to improve deformation control”. The general objective of the work was to analyze the cost-benefit of the different welding methods and processes in low carbon steel meeting the objective of deformation control. Through bibliographic research, the welding methods and processes, the control of product distortion generated by the weld and the MIG / MAG weld were identified. A case study was presented in order to identify the control of the deformation of a product in the thermally affected zone in the weld joining of low carbon steel components, evaluating different methods and processes. It was intended to reach a conclusion of which solution will promote better quality and control. Finally, the cost-benefit of each method and process was analyzed, taking into account, in addition to the factors mentioned, the payback time in a production line of compressed air tanks with application in trucks and all heavy automotive lines. It was identified that MIG / MAG welding guarantees the best welding method and process, presenting the best performance and cost-benefit, guaranteeing the quality and mechanical properties of the components welded in the product. It is concluded that the methods, welding processes and the study of the welding sequence, is of its importance for reducing and eliminating distortions caused by the product process. This is due to the need to improve productivity and quality while reducing costs.*

**Keywords:** *Welding. Cost reduction. Welding methods and processes. Distortion control. Product.*



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Demonstração dos componentes.....  | 20 |
| Figura 2 – Dispositivo para solda automática de flange em calotas.....                      | 21 |
| Figura 3 – Imagem interna do dispositivo de solda automática.....                           | 22 |
| Figura 4 – Máquina de solda.....  | 23 |
| Figura 5 – Dispositivo de solda automática operando.....                                    | 23 |
| Figura 6 – Operação de repasse de rosca.....  | 24 |
| Figura 7 – Macho mais suporte para o repasse de rosca.....                                  | 24 |
| Figura 8 – Calibrador de rosca.....   | 25 |
| Figura 9 – Verificação da calibragem da rosca.....  | 25 |
| Figura 10 – Demonstração de rosca do flange calibrado antes da solda de união a calota..... | 26 |
| Figura 11 – Teste do calibrador em uma calota de linha sem mudança do projeto.....          | 27 |
| Figura 12 – Ensaio macrográfico da calota da figura 11.....                                 | 27 |
| Figura 13 – Amostra da melhor solda obtida na primeira etapa.....                           | 28 |
| Figura 14 – Ensaio macrográfico da calota da figura 13.....                                 | 29 |
| Figura 15 – Exemplo 1 de parâmetro de solda sem sucesso.....                                | 30 |
| Figura 16 – Vista interna da calota da figura 15.....                                       | 30 |
| Figura 17 – Exemplo 2 de parâmetro de solda sem sucesso.....                                | 31 |
| Figura 18 – Vista interna da calota da figura 17.....                                       | 31 |
| Figura 19 – Melhor solda obtida na segunda etapa.....                                       | 32 |
| Figura 20 – Vista interna da calota da figura 19.....                                       | 33 |
| Figura 21 – Ensaio macrográfico da calota da figura 19.....                                 | 33 |
| Figura 22 – Exemplo de calota soldada com o melhor parâmetro, porém reprovada.....          | 35 |
| Figura 23 – Ensaio macrográfico da calota da figura 22.....                                 | 35 |
| Figura 24 – Exemplo de calota soldada que atendeu o objetivo do projeto.....                | 36 |
| Figura 25 – Vista aproximada do flange, permitindo visualizar a rosca do mesmo.....         | 36 |
| Figura 26 – Ensaio macrográfico da calota da figura 24.....                                 | 37 |

## **LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Parâmetros de máquina e dispositivo..... | 29 |
|---|----|

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>1.1Objetivos.....</b>   | <b>11</b> |
| 1.1.1 Objetivo Geral.....  | 11        |
| 1.1.2 Objetivos Específicos.....                                   | 11        |
| <b>1.2 Problema.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>1.3 Hipótese.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>1.4 Justificativa.....</b>                                      | <b>12</b> |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                | <b>13</b> |
| <b>2.1 Métodos e processos de soldas.....</b>                      | <b>13</b> |
| <b>2.2 Controle de distorção do produto gerada pela solda.....</b> | <b>14</b> |
| <b>2.3 Solda MIG/MAG.....</b>                                      | <b>15</b> |
| 2.3.1 Principais vantagens e desvantagens da solda MIG/MAG.....    | 16        |
| <b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                   | <b>18</b> |
| <b>3.1 Descrição da empresa.....</b>                               | <b>18</b> |
| <b>3.2 Descrição do objeto de estudo.....</b>                      | <b>19</b> |
| <b>3.3 Planejamento do processo.....</b>                           | <b>20</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                               | <b>21</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>39</b> |

## **1 INTRODUÇÃO**

O tema do presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), se trata da “análise de métodos e processos de solda para melhorar o controle de deformação”. Atualmente, com o desenvolvimento da globalização e com o avanço tecnológico, as indústrias são forçadas a serem cada vez mais competitivas. Seguindo essa lógica, a busca por redução dos custos de produção é constante nas empresas, uma vez que essa redução influencia no valor final das peças e, conseqüentemente, os produtos com custo final menor é mais aceito no mercado.

Este trabalho consistiu em realizar um estudo de caso na empresa X (Produtos metalúrgicos) no período de setembro de 2019 a março de 2020, a fim de identificar o controle da deformação de um produto na zona termicamente afetada na solda de união de componentes de aço de baixo teor de carbono, avaliando diferentes métodos e processos. Pretendeu-se chegar à uma conclusão de qual solução promoverá uma melhor qualidade e controle. Por fim, foi analisado o custo-benefício de cada método e processo, levando em consideração, além dos fatores mencionados o tempo de payback em uma linha de produção de tanques de ar comprimido com aplicação em caminhões e toda linha pesada automotiva.

### **1.1 Objetivos**

#### **1.1.1 Objetivo Geral**

Analisar o custo-benefício dos diferentes métodos e processos de solda em aço de baixo carbono atendendo o objetivo de controle de deformação.

#### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Realizar um estudo de caso, efetuando teste solda com métodos e processos de soldas diferentes em um determinado número de amostras;
- Analisar o custo, desempenho, controle de deformação, o tempo de operação, dentre outros parâmetros, a fim de que as roscas destes componentes soldados não necessitem da operação de repasse de rosca;
- Reunir os dados e analisar qual método e processo apresenta o melhor custo-benefício e um payback cuja empresa considere viável.

## **1.2 Problema**

Qual o método e processo de solda que apresentam o melhor desempenho e custo-benefício, garantido a qualidade e propriedades mecânica dos componentes soldados nos produtos?

## **1.3 Hipótese**

Pressupõe-se que no processo de solda MIG (Metal Inerte Gás) / MAG (Metal Active Gás) por modo de transferência arco pulsado, estima-se que a transferência de calor para a peça soldada seja menor, conseqüentemente diminuindo a zona termicamente afetada, uma vez que, obtendo essa condição poderá ser possível o controle de deformação do componente soldado ao produto final.

## **1.4 Justificativa**

No processo de fabricação de tanques de ar comprimido há a solda de união entre os flanges e o corpo do tanque, onde são conectados para alimentar todos os sistemas pneumáticos de um veículo linha pesada, principalmente os freios do mesmo, nesta união de componente atualmente feito pelo processo de solda MIG/MAG por modo de transferência curto circuito, cujo desencadeia em uma deformação significativa das rosca dos flanges, e conseqüentemente, gera o acréscimo de mais uma operação na linha de produção a fim de corrigir este problema, o repasse de rosca operação, essa que atualmente é manual, demanda uma considerável quantidade de operadores, e inclusive é o gargalo da linha fazendo com que eleve o preço de custo do produto e dita a quantidades de peças produzidas.

No âmbito produtivo, é de suma importância à solução para este problema através de um melhor método e processo de solda que controle melhor a deformação destes flanges soldados melhorando inclusive a qualidade do produto final.

A escolha do tema se justifica devido ser um assunto de suma importância tanto para os acadêmicos, quanto para os futuros profissionais da área, pois, abrange não só o processo de desenvolvimento de um produto, mas engloba o procedimento no geral.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Os tópicos a seguir abordarão os principais pontos relevantes da revisão de literatura pertinentes ao tema, onde serão expostos: Métodos e processos de soldas; Controle de distorção do produto gerada pela solda e Solda MIG/MAG.

### **2.1 Métodos e processos de soldas**

Atualmente as empresas tendem a investir em novas tecnologias que propiciassem a produção de bons produtos a preços mais adequados a nova realidade de mercado, sem perder a qualidade exigida pelos consumidores.

De acordo com Chiavenato (1999), para produzir um produto com eficiência e eficácia faz-se necessário escolher e definir um processo de produção que seja mais adequado ao produto que se pretende produzir. Para produzir é necessário planejar, dirigir e controlar. Para atender a requisitos de eficiência e de eficácia, a produção precisa repousar em um sistema de planejamento e controle confiável. Há muita atividade a ser planejada, organizada e coordenada para que a produção ocorra da melhor maneira possível. A complexidade do processo produtivo exige necessariamente um esquema de planejamento e controle.

É através do planejamento que se dispõe uma direção para a execução das metas e objetivos propostos. Planejar significa traçar propósitos, escolher qual caminho será seguido para o melhor funcionamento do que se propõe a fazer. Existem dois tipos de planejamento, o tradicional e o estratégico (BRIE, 2014),

Segundo Brie (2014), o planejamento tradicional é prescritivo e muitas vezes se perde com o tempo antes mesmo de ser concluído. Com uma forma de melhoria, surgiu o planejamento estratégico, sua aplicação é decidida no momento da ação, através da análise situacional de viabilidade da ação.

Nas empresas atualmente, é evidente a necessidade do desenvolvimento e implantação de novos métodos e processos que visam melhorar a fabricação de um produto com redução de custos, ampliando a margem de lucro e a capacidade de atender a demanda de mercado.

Para se obter o resultado desejado de um produto, o processo de fabricação deve ser executado com um bom planejamento e controle, a fim de eliminar os problemas intermediários, a partir de um procedimento específico para cada processo, isso inclui o processo de soldagem.

A soldagem é considerada como um processo de união e deposição de material, para construção e/ou recuperação de estruturas e equipamentos. Para a finalidade da solda ser alcançada, alguns recursos físicos e/ou metalúrgicos são necessários, como elevar a pressão e/ou o aquecimento até a fusão da junta a ser unida. A soldagem ocasiona um alto aquecimento localizado dos metais a serem unidos e a distribuição de temperatura não é uniforme (AWS, 2001).

Os métodos de união de metais podem ser divididos em duas categorias principais, isto é, aqueles baseados no aparecimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles baseados em forças microscópicas (interatômicas ou intermoleculares). No primeiro caso, do qual são exemplos a parafusagem e a rebitagem, a resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento do parafuso ou rebite, mais as forças de atrito entre as superfícies em contato. No segundo caso, a união é conseguida pela aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas, ou destas e um material intermediário, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações metálicas e de Van der Waals. Como exemplos desta categoria citam-se a soldagem (MARQUES, 2005).

Processos de soldagem provocam alterações micro estruturais, tensões e deformações residuais, nos quais desenvolvem um papel principal no comportamento do serviço ou na própria operação de soldagem. Tensões residuais e deformações térmicas são oriundas dos gradientes térmicos e transformações metalúrgicas que ocorrem durante o processo (MODENESI, 2007).

## **2.2 Controle de distorção do produto gerada pela solda**

A distorção é uma alteração de forma e dimensões que componentes soldados sofrem como resultado do movimento de material que ocorre em função das tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem. A distorção final de um componente soldado é sempre oposta e, em geral, da mesma ordem de grandeza do movimento de material que ocorre durante a soldagem (MODENESI, 2001).

A distorção na soldagem resulta da expansão e contração do metal de solda e de base durante o ciclo térmico do processo de soldagem. Durante o aquecimento e resfriamento, vários fatores influenciam as contrações do metal e causam a distorção, bem como alteram as propriedades físicas e mecânicas com o aporte de calor aplicado. Estas alterações afetam inclusive o fluxo e a uniformidade da distribuição de calor, sendo esta última a causa mais importante para a deformação durante a soldagem (MODENESI, 2001).

De acordo com Modenesi, (2001), os fatores que afetam a distorção são: grau de restrição; projeto da junta; procedimento de montagem; procedimento de soldagem; propriedades da metal base; energia de soldagem; tensões internas; sequência de soldagem.

Durante o processo de soldagem, a estrutura do metal gera distorção em algumas áreas devido à brusca mudança de temperatura. As contrações do cordão de solda durante o resfriamento após a soldagem produzem tensões térmicas. Deste modo, a peça sofrerá variações dimensionais resultantes do alívio destas tensões. É difícil garantir as tolerâncias dimensionais, como também a presença de tensões residuais que reduzirão a resistência mecânica (AWS, 1987). Portanto, é muito importante tentar reduzir e até eliminar estas tensões. Uma forma de solucionar esse problema é o estudo da sequência de soldagem.

Uma sequência de soldagem bem planejada envolve a distribuição do metal de solda em diferentes pontos da montagem de modo que a estrutura contraia em um ponto, se contrapondo às forças de contração da solda já realizada. Um exemplo é soldar alternadamente em ambos os lados do eixo neutro de uma junta de topo com chanfro em “X”. A ideia é balancear as contrações através da sequência dos passes para provocar a interação destas (AWS, 2001).

De acordo com Lucas (1998), as regras gerais para evitar a distorção são:

- Manter o cordão de solda (filete) com o menor volume possível;
- Balancear a soldagem em torno do eixo neutro;
- Restringir os movimentos da peça devido ao aporte de calor;
- Minimizar o tempo entre passes.

A sequência de soldagem sugere a utilização das tensões térmicas geradas durante o processo para provocar o efeito desejado. Por meio do balanceamento das tensões, a estrutura sofre menores consequências devido à compensação de esforços já alcançados, sem a necessidade de correção por métodos posteriores à conclusão da solda. Sendo assim, a sua utilização provê um resultado satisfatório mesmo quando não é possível resolver o problema só pela sequência e necessitar de recursos extras como dispositivos de fixação (LUCAS, 1998).

### **2.3 Solda MIG/MAG**

De acordo com Barra (2007), a solda MIG/MAG é um tipo de processo de soldagem que consiste na utilização de um consumível em forma de arame, protegido por um gás, para realizar a união de materiais metálicos por meio de aquecimento e fusão. As siglas são



abreviações do nome em inglês e se referem aos gases utilizados no processo de soldagem: MIG é a abreviação de “Metal Inerte Gás”, MAG significa “Metal Active Gás”.

A soldagem MIG/MAG, é um processo de solda por arco elétrico com gás de proteção, é muito bem difundida na indústria por conta de sua ampla utilização, podendo soldar materiais de várias espessuras, ferrosos ou não ferrosos, como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas, aços de alta resistência e aços inoxidáveis, em várias posições. Tem sido muito utilizada na indústria automobilística, automatizada ou não, na indústria ferroviária, na fabricação de pontes rolantes, vigas, escavadeiras, tratores. Seus elementos essenciais são compostos por: uma fonte de solda (máquina de solda); o arame (consumível); uma tocha; um cilindro de gás; garra negativa; alimentador de arame (BARRA, 2007).

A diferença entre MIG e MAG é que no caso da soldagem MIG, o gás utilizado é inerte, normalmente argônio ou gás hélio, sendo que por serem gases inertes eles não possuem nenhuma função para com a poça de fusão além da proteção. Isso já não acontece no processo MAG, que por sua vez utiliza um gás ativo que participa ativamente da poça de fusão, o que vai muito além de proteção, pois terá reflexos que vão desde alteração de compostos da poça até penetração dos metais ferrosos (BARRA, 2007).

### 2.3.1 Principais vantagens e desvantagens da solda MIG/MAG

As principais vantagens da soldagem MIG/MAG de acordo com Barra (2007), são:

- Soldar em qualquer posição;
- Não ter perdas de pontas (ou a necessidade de remoção de escória);
- Alta taxa de deposição do metal de solda;
- Altas velocidades de soldagem;
- Mecanização;
- Automatização;
- Robotização;
- Permite grande automatização;
- Produtividade alta em chapas finas;
- Boas taxas de rendimento;
- Pouquíssimos respingos;
- Pouca fumaça e quase nenhuma escória.

As desvantagens da solda MIG/MAG são muito poucas, o que torna este processo tão difundido em toda a indústria. Como primeiro ponto negativo, considera-se a necessidade de

realização do processo dentro de locais fechados sem corrente de ar, pois, o evento poderia dispersar o gás de proteção. Outro único ponto que deve ser considerado, é que, quando se utiliza arame sólido, pode ocorrer falta de fusão (BARRA, 2007).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para elaboração do presente trabalho, foi utilizada primeiramente a pesquisa bibliográfica, que segundo Gil (2008, p.50), “é desenvolvida a partir de um material já elaborado constituído principalmente de livros e artigos científicos”.

O método científico que foi adotado na pesquisa, foi o hipotético dedutivo que de acordo Popper (1976), consiste na adoção da seguinte linha de raciocínio: quando os conhecimentos disponíveis sobre determinado assunto são insuficientes para a explicação de um fenômeno, surge o problema. Para tentar explicar as dificuldades expressas no problema, são formuladas conjecturas ou hipóteses. Este intento foi conseguido a partir da revisão bibliográfica de cunho quantitativo, por meio de livros, revistas e artigos científicos.

Posteriormente, foi realizado um estudo de caso na empresa X (Produtos metalúrgicos), no período de setembro de 2019 a março de 2020, a fim de identificar o controle da deformação de um produto na zona termicamente afetada na solda de união de componentes de aço de baixo teor de carbono, avaliando diferentes métodos e processos em várias amostras de tanques com modelos, quantidades e dimensões de flanges diferentes, porém, com a mesma matéria prima, sendo a do corpo do tanque de aço SAE 1012 ou ARC-400 (compatível), e o flange de aço SAE 1015, utilizando o atual processo de solda MIG/MAG, onde foi feito a conversão de modo de transferência de curto circuito para arco pulsado, e além deste, a mudança para o processo de solda a laser.

Os testes foram feitos, analisados e quantificados mediante desempenho, resultado e nova vazão da linha de produção, assim, tendo parâmetro suficiente para definir a melhor opção custo-benefício, com garantia de qualidade, atendendo as normas e requisitos dos clientes.

#### 3.1 Descrição da empresa

A empresa X (Produtos metalúrgicos) atua no mercado com a fabricação de tanques de ar comprimido para veículos pesados.

A empresa é detentora das certificações pelas normas ABNT NBR ISO 9001:2015 – Sistema de Gestão da Qualidade - Requisitos (norma que regulamenta o Sistema de Gestão da Qualidade, desde 2010; Norma ISO 14001:2015 – Sistema de Gestão Ambiental desde 2015 e também é certificada pela norma IATF 16949:2016 – Sistema de Gestão de qualidade automotiva desde 2018. Sua excelência em qualidade produtiva e sua seriedade trouxe para a empresa marcos importantes em sua história.

### 3.2 Descrição do objeto de estudo

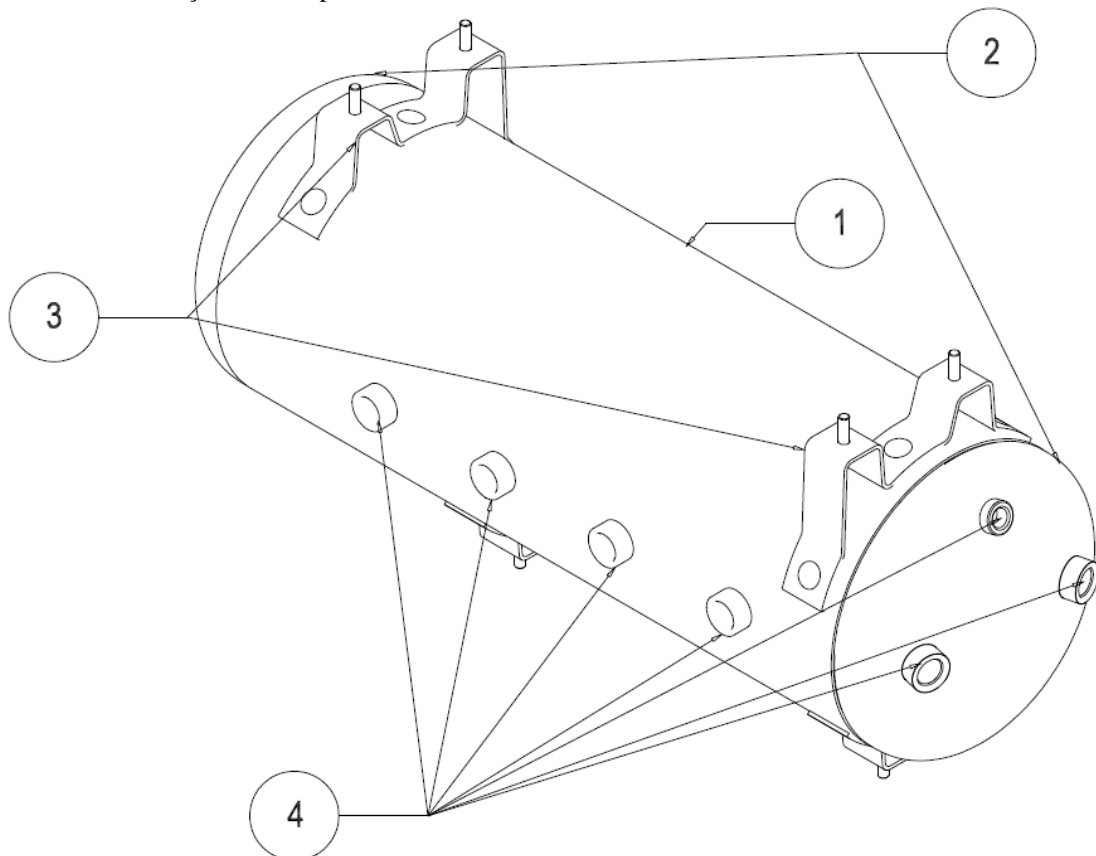
A empresa fabrica tanques de ar comprimido em aço de baixo teor de carbono para a alimentação de todo o sistema pneumático de automóveis da linha pesada, ônibus e caminhões, esses tanques de ar possuem diversas uniões roscadas (flanges), com o intuito de promover conexões para alimentação de diversos sistemas pneumáticos com o ar pressurizado contido dentro do reservatório.

Para que os tanques de ar obtenham essas uniões roscadas apropriadas para as conexões, o corpo cilíndrico e as calotas recebem furos para alojar flanges que serão soldados através do processo de solda MIG/MAG, cujas soldas precisam ser estanqueis e as uniões roscadas precisam ser livres de inclusões, calibradas, livres de imperfeições e estanqueis conforme exigido pelos requisitos dos clientes e pela norma EN 286-2 - Recipientes de pressão para frenagem a ar e sistemas auxiliares para veículos motorizados e seus reboques, características estas, que somente são atendidas mediante um retrabalho gerado no final da linha de repasse de roscas com auxílio de machos operados de forma manual, devido a contração gerada na rosca mediante o resfriamento rápido após o aporte térmico gerado no momento da soldagem, operação extra essa do repasse de rosca que o trabalho tem o objetivo de eliminar.

O produto descrito segue demonstrado na figura 01, os componentes foram enumerados sendo:

- 1 – Corpo intermediário cilíndrico, parte que recebe a maior parte da capacidade volumétrica do tanque de ar, onde monta-se o suporte e flanges;
- 2 - Calotas, parte côncava que recebe a menor parte da capacidade volumétrica do tanque de ar, onde monta-se flanges grava-se as informações técnicas do produto;
- 3 - Suportes, parte que recebe as fixações necessárias para unir o conjunto ao veículo sendo no tanque união soldada e no veículo por porcas, parafusos ou sintas;
- 4 – Flanges, parte que recebe todas as conexões roscadas que levaram o ar comprimido aos determinados sistemas pneumáticos.

Figura 1 – Demonstração dos componentes



Fonte: O autor.

### 3.3 Planejamento do processo

Primeira etapa, setembro de 2019 a novembro de 2019, foram testadas variações relacionadas a mistura do gás e ao arame utilizado.

Segunda etapa, dezembro de 2019 a janeiro de 2020, foram testadas variações relacionadas a parâmetros de corrente, voltagem, velocidade e stickout, a fim de se obter o melhor perfil de solda, bem como se obter a menor deformação possível gerada pela contração.

Terceira etapa, fevereiro de 2020 a março de 2020, chegando aos ajustes finais, utilizando todas as mudanças cujas mostraram-se promissoras e ajustando o modo de transferência para arco pulsado, foram realizados a última bateria de testes.

Como descrito o planejamento do processo foi obtido de acordo com um estudo de viabilidade, sendo analisadas quais características da solda mudadas poderiam ser aceitas, a fim de minimizar as deformações sem que houvesse uma perda significativa de qualidade e ou segurança do produto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram levantados através dos ensaios de estanqueidade, macrografia, e aferições realizadas com os calibradores.

Cada etapa listada acima fora realizada na sequência descrita, e verificadas perante os resultados registrados a partir dos ensaios e medições, cada foto representa o aspecto visual de cada soldagem obtida, deixando todas as notas observadas em cada mudança que foi proporcionada, seja ela positiva ou negativa.

Na figura abaixo, está representado o dispositivo de solda automática cujo todos os ensaios foram realizados, a fim de ter uma repetitividade confiável para análise dos resultados sem que o fator humano interferisse.

Figura 2 – Dispositivo para solda automática de flange em calotas



Fonte: o autor.

Nas próximas figuras é possível visualizar tanto a parte interna do dispositivo quanto o dispositivo em pleno funcionamento, onde se encontra a base giratória e compensatória em caso de modelos de calotas que possuem flanges em locais determinados da calota, que exigem uma solda elíptica ou deslocada, também onde se encontra o cabeçote, com avanço pneumático e eletrônico que além de ser o suporte para a tocha da máquina de solda, também é o responsável por aproximar e recuar da peça a ser soldada possibilitando a regulagem do stickout.

Figura 3 – Imagem interna do dispositivo de solda automática



Fonte: o autor.

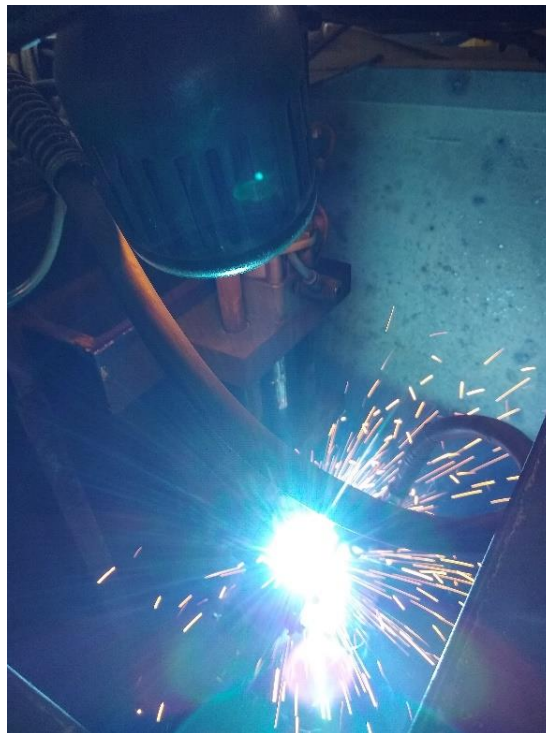
A máquina de solda utilizada no dispositivo descrito acima é uma inversora que utiliza o protocolo digital Arclink para comunicação com os alimentadores, permitindo recursos avançados e maior controle do processo de soldagem. Uma excelente máquina, que permitiu inúmeras mudanças de parâmetros de soldagem, transitando do modo de transferência padrão curto-circuito ao arco pulsado com muita estabilidade e qualidade.

Figura 4 – Máquina de solda



Fonte: o autor.

Figura 5 – Dispositivo de solda automática operando



Fonte: o autor.



Todo o projeto tem como objetivo eliminar a operação de repasse de rosca, assim como já citado no decorrer do trabalho e demonstrado a partir da figura 6. Como os modelos de tanques de ar possuem uma grande variedade de modelos de calotas e flanges, variando diâmetro, rosca e posicionamento, é necessário soldar o macho para repasse em um suporte assim como o demonstrado na figura 7. Após a operação de repasse de rosca realizada, e feito a inspeção da mesma através da verificação com calibradores, como podemos ver nas figuras 8 e 9.

Figura 6 – Operação de repasse de rosca



Fonte: o autor.

Figura 7 – Macho mais suporte para o repasse de rosca



Fonte: o autor.

Figura 8 – Calibrador de rosca



Fonte: o autor.

Figura 9 – Verificação da calibragem da rosca



Fonte: o autor.

Em todas as etapas dos testes houve um grande volume de produção na fábrica, onde a mesma trabalhou em três turnos durante os sete dias da semana, devido a esse fator, não foi possível que uma das linhas se dedicasse totalmente ao projeto, fazendo com que a cada bateria de testes fosse realizada com um modelo diferente de tanque de ar, contudo, foi tomado o cuidado de sempre realizar os testes em tanques fabricados com o mesmo aço SAE1012, de mesma espessura de chapa 2,00 mm e com o uso do flange de rosca M22 X 1,5 mm, o mais comum utilizado.

Na primeira etapa dos testes, foram realizados testes no processo realizando algumas mudanças, focando principalmente no arame utilizado e na mistura do gás.

Apenas para fim de demonstração, na figura 10 é possível verificar que o flange antes de ser soldado, o calibrador consegue entrar com facilidade, já na figura 11 uma calota de linha antes mesmo de qualquer alteração realizada pelo projeto é possível verificar que o calibrador apenas consegue adentrar a rosca em aproximadamente dois filetes. O processo antes do projeto usa um arame AWS ER 70S-6 de 1,20 mm de diâmetro, utilizando o gás nas seguintes proporções 50% de Ar e 50% de CO<sub>2</sub>. Na figura 12 é possível notar o ensaio macrográfico que os parâmetros citados de arame e mistura do gás, promovem um perfil de solda bastante robusto, superdimensionado e com uma notável penetração da peça, cuja deformação gerada pela contração do resfriamento rápido era acometida.

Figura 10 – Demonstração de rosca do flange calibrado antes da solda de união a calota



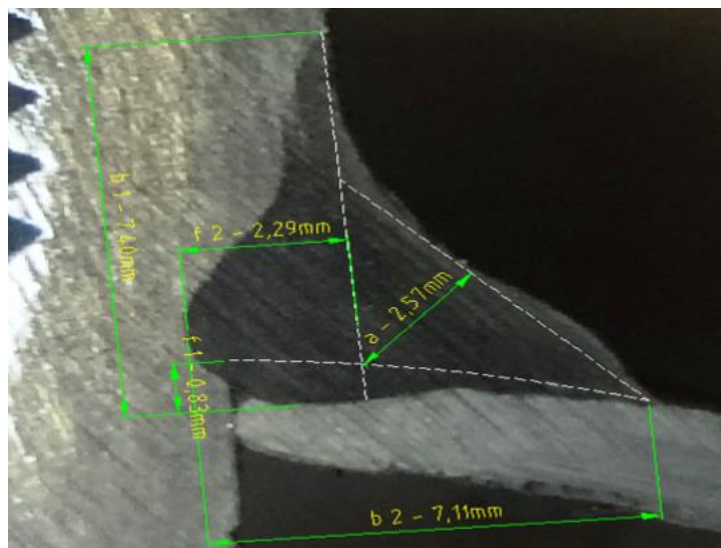
Fonte: o autor.

Figura 11 – Teste do calibrador em uma calota de linha sem mudança do projeto



Fonte: o autor.

Figura 12 – Ensaio macrográfico da calota da figura 11



Fonte: o autor.

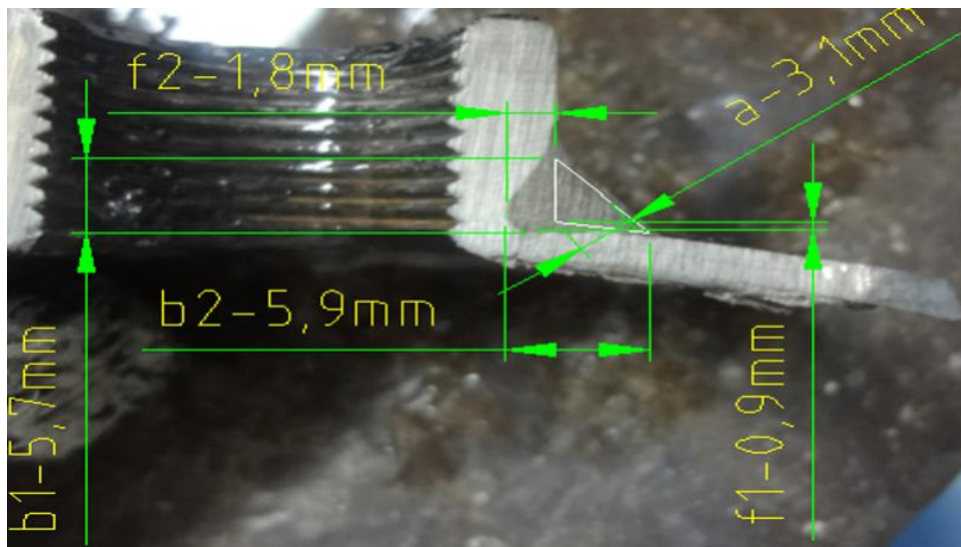
Então, realizando diversas variações de gás onde gradativamente foi sendo aumentando a parte do argônio na mistura, levando em consideração o princípio de que o  $\text{CO}_2$  é um gás ativo nas temperaturas de soldagem, devido sua alta condutividade térmica responsável por uma alta transferência de calor para o metal de base, e claramente tendo um padrão de penetração mais largo e profundo, portanto, chegando nas seguintes proporções de 85% de argônio e 15% de  $\text{CO}_2$ . Partindo então para o arame tendo como objetivo reduzir a quantidade de material depositado, sem aumentar a velocidade de giro do dispositivo de solda automática foi trocado para 0,80 mm de diâmetro. O melhor resultado encontrado obtido foi o das figuras 13 e 14, lembrando que ainda não havia sido alterado nenhum parâmetro da máquina de solda e nem do dispositivo de solda automática. Mesmo ainda não resolvendo o problema por completo, é possível notar um melhor aspecto visual, um cordão mais uniforme, com uma penetração mais rasa e mais estreita, onde acredito que seja o caminho para que o resfriamento aconteça de forma homogênea, e de maneira menos agressiva na rosca do flange, por estar distanciando a zona termicamente afeta da mesma.

Figura 13 – Amostra da melhor solda obtida na primeira etapa



Fonte: o autor.

Figura 14 – Ensaio macrográfico da calota da figura 13



Fonte: o autor.

Na segunda etapa dos testes, foram realizados testes no processo, realizando algumas mudanças, focando principalmente nos parâmetros de máquina e dispositivo, conforme tabela a seguir:

Tabela 1 - Parâmetros de máquina e dispositivo

| PARAMETRO                         | VARIAÇÃO             |
|-----------------------------------|----------------------|
| CORRENTE                          | 70A a 250 A          |
| TENSÃO DE SOLDAGEM                | 15 V a 30 V          |
| VELOCIDADE DO ARAME               | 2 M/min. a 5 M/min.  |
| VELOCIDADE DE GIRO DO DISPOSITIVO | Posição de 18 a 25 * |
| STICKOUT                          | 10 m a 20 mm         |

Fonte: \*Unidade adimensional, realizada pelos controladores do dispositivo.

Esta etapa foi a mais difícil, principalmente por ter que lidar com tantas variáveis, e fazer com que elas se equalizem, e o natural foram os inúmeros defeitos de soldas devido aos parâmetros que não deram certo, os erros mais expressáveis devido uma corrente incompatível com a velocidade programada seja do arame ou do giro do dispositivo foi o mais frequente, como pode ser visto nas figuras 15, 16, 17 e 18. Outra característica que ficou bastante evidente com esse tipo de erro é o grande aquecimento gerado na peça, onde resultou em carepas, e deformação visível dos flanges, piorando ainda mais o problema já existente.

Figura 15 – Exemplo 1 de parâmetro de solda sem sucesso



Fonte: o autor.

Figura 16 – Vista interna da calota da figura 15



Fonte: o autor.

Figura 17 – Exemplo 2 de parâmetro de solda sem sucesso



Fonte: o autor.

Figura 18 – Vista interna da calota da figura 17



Fonte: o autor.



Após a realização de diversos testes de parâmetro, o que tornou o mais promissor foi com a seguinte configuração com o modo de transferência curto-circuito, corrente de 90 A, tensão de soldagem de 15 V, velocidade do arame de 4 M/min., com a base do dispositivo girando à uma velocidade emitida pela posição 22 do controlador, e stickout de 15 mm, promovendo uma solda com a penetração rasa, menos larga, uma massa menor transferida, e que por muito pouco cumpre com o objetivo final do trabalho representada na figura 19, inclusive no aspecto visual da figura 20, já é possível verificar que não houve aquecimento extremo da peça, não gerando aparição de carepas, e sim apenas o fosfato queimado que advém do processo anterior deste processo de solda, a decapagem e fosfatização. No ensaio macrográfico representado na figura 21 nota-se que a raiz da solda ainda penetra até a região da rosca, fato esse que tornou inevitável a deformação da mesma, se tornando o principal aspecto a ser na terceira etapa.

Figura 19 – Melhor solda obtida na segunda etapa



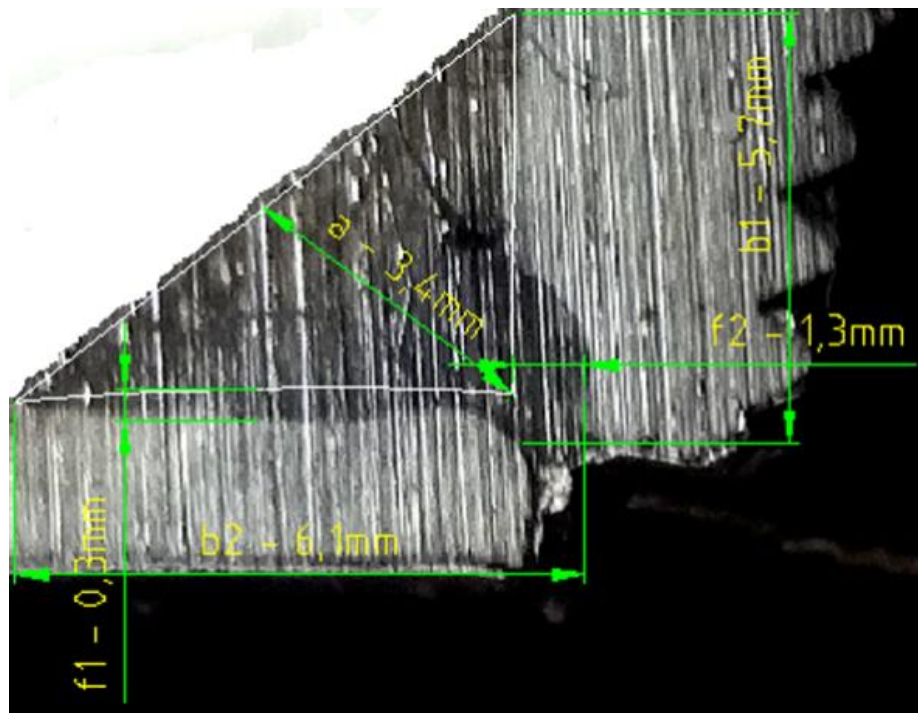
Fonte: o autor.

Figura 20 – Vista interna da calota da figura 19



Fonte: o autor.

Figura 21 – Ensaio macrográfico da calota da figura 19



Fonte: o autor.

Na terceira etapa dos testes, foi percebido que os parâmetros utilizados no modo de transferência por curto-circuito já haviam sido esgotados, e mesmo assim não havia proporcionado a condição ideal para a conclusão do projeto, e a alternativa foi mudar a estratégia para o modo de transferência arco pulsado, com o objetivo de controlar a entrada de calor, diminuindo assim a distorção. Tal feito resultou em uma revisão geral em tudo que havia sido acertado até o momento, a mistura do gás sofreu um novo ajuste para 92% Ar e 8% CO<sub>2</sub>, o arame mais uma vez alterado também para AWS ER 70S-6 de 1,00 mm de diâmetro, e após mais uma bateria de ensaios e pesquisas, finalmente foi obtido parâmetros de máquina que mostram resultados dentro da realidade esperada, mesmo não sanando o problema em 100% das peças, os parâmetros foram corrente de 150 A, tensão de soldagem de 20 V, velocidade do arame de 6 M/min., com a base do dispositivo girando a uma velocidade emitida pela posição 25 do controlador, e stickout de 10 mm.

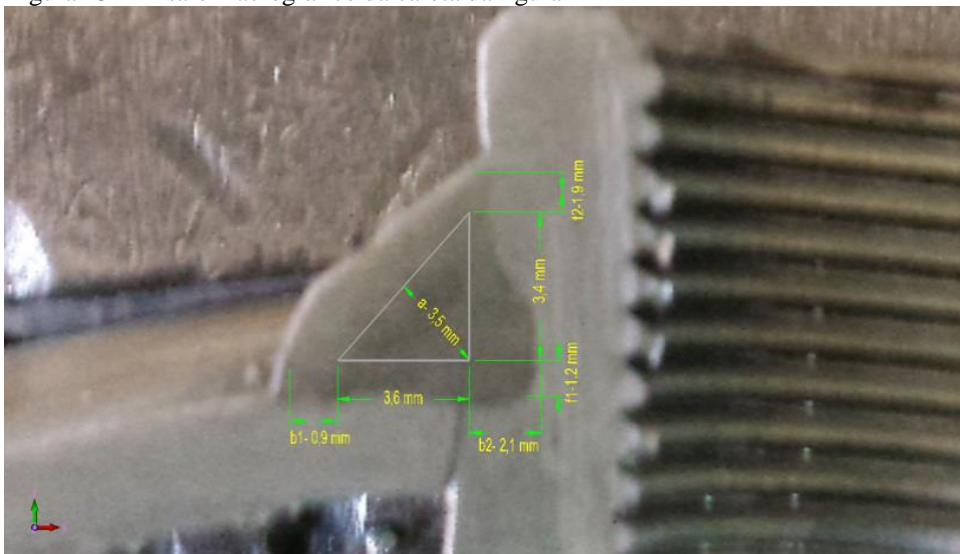
O resultado foi parcialmente positivo, houve calotas como na figura 22 cujas tiveram uma redução na contração da rosca de forma mediana, onde o calibrador entra com facilidade no começo, e a medida que se aproxima do cordão da solda é impedido de prosseguir devido a deformação, na figura 23 no ensaio macrográfico deixa uma interpretação visual clara, o cordão de solda avançou no sentido da rosca do flange o suficiente para gerar a deformação já conhecida, houve também calotas como na figura 24 cujo calibrador consegue ir até o final da rosca sem problemas, ficando bem claro pela figura 25 e 26 que a rosca não obteve alteração nenhuma do seu aspecto visual após a solda, o perfil da solda é bem estável e afastado o suficiente da rosca do flange, sem indícios de imperfeições como por exemplo: poros ou falta de fusão, e apesar de aparentemente parecer uma solda mais frágil devido a baixa penetração em relação aos cordões anteriores. Esta peça antes de passar pelo corte do ensaio macrográfico, foi aprovada pelo ensaio de estanqueidade à uma pressão pneumática de 16 bar, atendendo todos os requisitos de segurança e performance da norma EN 286-2.

Figura 22 – Exemplo de calota soldada com o melhor parâmetro, porém reprovada



Fonte: o autor.

Figura 23 – Ensaio macrográfico da calota da figura 22



Fonte: o autor.

Figura 24 – Exemplo de calota soldada que atendeu o objetivo do projeto



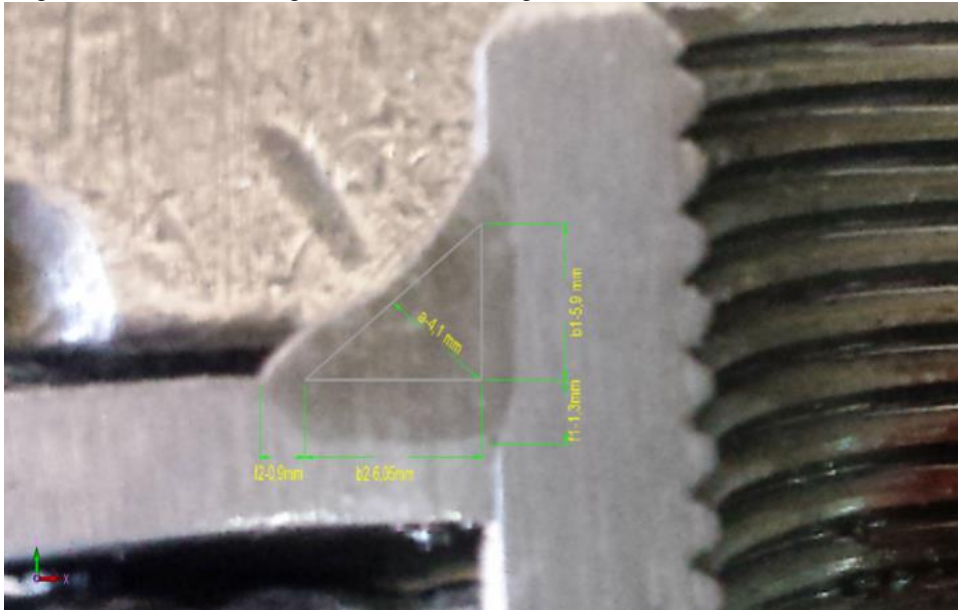
Fonte: o autor.

Figura 25 – Vista aproximada do flange, permitindo visualizar a rosca do mesmo



Fonte: o autor.

Figura 26 – Ensaio macrográfico da calota da figura 24



Fonte: o autor.

Com a finalização do projeto, conclui-se que o resultado foi positivo, pois apesar de não ter eliminado 100% das deformações, reduziu-se consideravelmente, onde ficou notável que antes das alterações, precisava de praticamente refazer as roscas, tendo dificuldades inclusive para iniciar a mesma, havendo uma possibilidade maior de geração de refugo de um produto completo, que já havia passado por todas as etapas que agregam valor no processo, devido a possível rosca torta realizada. Já após a alteração tornou-se um repasse leve com a impressão de apenas estar “limpando” a rosca.

Tal resultado impacta de várias maneiras positivas no processo, como a redução do número de roscas repassadas na produção, desgaste menor dos machos utilizados, aumentando assim a vida útil dos mesmos, fadiga menor dos operadores, e um aumento de produtividade de 30%. Além é claro de possibilitar a automação da operação, já que agora a operação se tornou menos “bruta” e minimalista.

A empresa agora aguarda a próxima fase do projeto, que para melhoria definitiva da operação se torne automática, e deixe de ser a parte do processo com a maior quantidade de mão de obra.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como tema central: “Análise de métodos e processos de solda para melhorar o controle de deformação”. Apresentou um estudo de caso na empresa X (Produtos metalúrgicos), a fim de identificar o controle da deformação de um produto na zona termicamente afetada na solda de união de componentes de aço de baixo teor de carbono, avaliando diferentes métodos e processos.

Com a finalização do estudo de caso, concluiu-se que o resultado foi positivo, pois embora não tenha eliminado 100% das deformações, reduziu-se consideravelmente, onde ficou notável que antes das alterações, precisava praticamente refazer as rosca, tendo dificuldades inclusive para iniciar a mesma, havendo uma possibilidade maior de geração de refugo de um produto completo, que já havia passado por todas as etapas que agregam valor no processo, devido a possível rosca torta realizada. Já após a alteração, tornou-se um repasse leve com a impressão de apenas estar “limpando” a rosca.

Identificou-se que a solda MIG/MAG por modo de transferência arco pulsado, garante que a transferência de calor para a peça soldada seja menor, portanto, diminuindo a zona termicamente afetada, uma vez que, obtendo essa condição poderá ser possível o controle de deformação do componente soldado ao produto final, garantindo o melhor método e processo de solda apresentando o melhor desempenho e custo-benefício, garantido a qualidade e propriedades mecânica dos componentes soldados no produto.

Conclui-se que os métodos, processos de solda e o estudo da sequência de soldagem, é de sua importância para redução e eliminação de distorções provocadas pelo processo do produto. Isto se deve à necessidade de melhorar a produtividade e a qualidade com redução de custos, de forma a ampliar a margem de lucro e a capacidade em atender a demanda de mercado.

No meio acadêmico e aos profissionais Engenheiros Mecânicos, o estudo apresenta informações relevantes capazes de suscitar novos meios de aperfeiçoamento de soldagem e novas maneiras de reduzir custos e otimizar a produção do produto.

## REFERÊNCIAS

- AWS. **Welding Handbook**. Welding technology. Miami: American Welding Society, 8° ed. V.1: p. 223 – 264, 1987.
- AWS. **Prevention and control of weld distortion**. Welding Journal 80 (10): p. 97 – 100, out. 2001.
- BARRA, Sérgio. **Os efeitos da pulsação térmica na soldagem MIG/MAG**. São Paulo, SP: Congresso Corte e Conformação de Metais. 2007.
- BRIE, Santiago. **Análise: planejamento situacional versus planejamento tradicional**. [2014]. Disponível em: <https://blogs.funiber.org/pt/arquitetura-e-desenho/2014/02/28/planejamento-situacional-versus-planejamento-tradicional>. Acesso em: 20 out. 2020.
- CHIAVENATO, Idalberto. **Administração nos Novos Tempos**. São Paulo: Atlas, 1999.
- GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa**. 6ª Ed. São Paulo: Atlas, 2008. 200p.
- LUCAS, B. **Distorção: Prevenção pelas técnicas de fabricação**. Soldagem & Inspeção, ABS, São Paulo, 4 (8): p. 21 – 23, ago. 1998.
- MARQUES, P.V. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. UFMG, 2005.
- MODENESI, P. J. “**Efeitos mecânicos do ciclo térmico**”, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, 2001.
- MODENESI, P. J. “**Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**”, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007, 2ª edição.
- POPPER, Karl R. **The logic of scientific discovery**. Londres: Hutchinson, 1976.