

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

CURSO DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

João Elismar Batista dos Santos

Mauro da Silva Lacerda

Mauro Sérgio de Oliveira Silva

REDUÇÃO DA POROSIDADE NA SOLDA DE ALUMÍNIO

MAUÁ/SP

2024

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

REDUÇÃO DA POROSIDADE NA SOLDA DE ALUMÍNIO

Trabalho de Conclusão de Curso (*TCC*)
apresentado à FATEC Mauá, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Sérgio Scutto

MAUÁ/SP

2024

Catálogo-na-Publicação – Biblioteca Fatec Mauá

671.521

S237r Santos, João Elismar Batista dos.

Redução da porosidade na solda de alumínio / João Elismar
Batista dos Santos, Mauro da Silva Lacerda, Mauro Sérgio de
Oliveira Silva. – 2024.

58 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Me. Sérgio Scutto.

Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia
em Fabricação Mecânica) – Faculdade de Tecnologia de Mauá.

Referências: p. 58.

1. Soldagem. 2. Arco. 3. Eletrodo. 4. Tungstênio. 5. Gás. I.
Lacerda, Mauro da Silva. II. Silva, Mauro Sérgio de Oliveira. III.
Scutto, Sérgio. IV. Título.

CDD 23. : Soldagem elétrica 671.521
Elaborada por Tatiana Sambinelli CRB-8 SP-011003/O

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ

REDUÇÃO DA POROSIDADE NA SOLDA DE ALUMÍNIO

*Trabalho de conclusão de curso apresentado
à FATEC Mauá como parte dos requisitos
para obtenção do título de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica.*

Aprovação em:

Orientador: Prof. MSc Sérgio Scutto

FATEC Mauá

Avaliador: Prof. Dr. Mauro Araújo de Sousa

FATEC Mauá

Avaliador: Prof. MSc Sandro Oliveira dos Santos

FATEC Mauá

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente ao nosso Deus que é a fonte de nossas vidas, por nos conceder saúde e graça para concluir esse curso;

Agradecemos ao nosso orientador Prof. MSc. Sérgio Scuotto pela atenção, disposição e paciência;

Agradecemos a nossas queridas esposas e filhos pelo incentivo e compreender nossa ausência nos períodos de aula;

Agradecemos a nossas famílias que mesmo distante sempre torceram para o nosso sucesso;

Agradecemos a nossas queridas mães que sempre estiveram de joelhos dobrados diante do Senhor intercedendo por nós;

Aos amigos de turma que muitas vezes nos incentivaram a ir um pouco mais adiante, sem palavras para expressar tamanha gratidão; e todos que acreditam e torcem por nós.

RESUMO

O processo de soldagem por arco elétrico com gás de proteção denominado GTAW vem sendo usado cada vez mais em diversas operações industriais. Esse processo consiste em um arco elétrico que é estabelecido entre a peça e o eletrodo não consumível de tungstênio. O processo produz calor que funde a peça que vai ser soldada. Em seguida é adicionado o eletrodo vareta que é um consumível formando assim uma poça de fusão unindo os dois componentes por soldagem. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de gás inerte que não reage quimicamente com a poça de fusão. Esse trabalho apresenta um estudo do processo de soldagem GTAW em chapas de alumínio das ligas 1100 e 5052 estampadas para fabricação de curvas de 90°, destinadas à condução de produtos alimentícios. Foram soldados vários corpos de prova mudando os parâmetros de 180 amperes a 190 amperes e com essas mudanças de parâmetros não obtivemos resultados satisfatórios, ou seja, os poros continuavam aparecendo na geometria do cordão de solda. Após a mudança de posição de soldagem e diminuindo o número de passes, obteve-se um resultado parcialmente satisfatório. Ao soldar o componente em um único passe, aumentando o ângulo de ataque de 15° para 75°, constatou-se que o produto soldado era satisfatório, livre de poros e outras descontinuidades induzidas pelo processo de soldagem. Tal constatação foi feita realizando-se ensaios de raio x.

Observamos que o processo GTAW (nomenclatura americana) também é conhecido por TIG (Tungsten Inert Gas) no Brasil e por WIG (Wolfranium Inert Gas) na Alemanha

Palavra-chave: Redução da porosidade na soldabilidade do alumínio.

ABSTRACT

The electric arc welding process with shielding gas called GTAW has been increasingly used in various industrial operations. This process consists of an electric arc that is established between the part and the non-consumable tungsten electrode. The process produces heat that melts the part to be welded. Then the rod electrode is added, which is a consumable, thus forming a melting pool joining the two components by welding. The weld metal is protected from the atmosphere by the inert gas flow that does not react chemically with the weld pool. This work presents a study of the GTAW welding process on aluminum sheets made from alloys 1100 and 5052 stamped for the manufacture of 90° curves, intended for conveying food products. Several test bodies were welded changing the parameters from 180 amps to 190 amps and with these parameter changes we did not obtain satisfactory results, that is, the pores continued to appear in the geometry of the weld bead. After changing the welding position and reducing the number of passes, a partially satisfactory result was obtained. When welding the component in a single pass, increasing the angle of attack from 15° to 75°, it was found that the welded product was satisfactory, free of pores and other discontinuities induced by the welding process. This finding was made by carrying out x-ray tests.

We note that the GTAW process (American nomenclature) is also known as TIG (Tungsten Inert Gas) in Brazil and WIG (Wolfranium Inert Gas) in Germany

Keyword: Reduction of porosity in the weldability of aluminum.

SUMÁRIO

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 Contextualização | 12 |
| 1.1.2 Documentação técnica de suporte..... | 13 |
| 1.1.3 O processo de soldagem TIG..... | 14 |
| 1.1.4 Fundamentos do processo TIG..... | 15 |
| 1.1.5 Equipamentos de soldagem TIG..... | 16 |
| 1.1.6 Tipos e funções dos consumíveis..... | 17 |
| 1.1.7 Características e aplicações da soldagem TIG..... | 18 |
| 1.1.8 Preparação e limpeza das juntas..... | 20 |
| 1.1.9 Defeitos mais comuns na soldagem..... | 20 |
| 1.1.9.1 Porosidade na solda de alumínio..... | 23 |
| 1.2 Objetivo | 28 |
| 1.3 Justificativa | 29 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 30 |
| 2.1 Breve histórico da soldagem | 30 |
| 2.1.1 Cronologia da soldagem..... | 30 |
| 2.1.2 Soldagem na era moderna..... | 33 |
| 2.1.3 A revolução industrial..... | 34 |
| 2.1.4 O surgimento do processo de soldagem TIG..... | 35 |
| 2.2 O alumínio e suas ligas | 36 |
| 2.2.1 Propriedades químicas do alumínio..... | 39 |
| 2.2.2 Propriedades mecânicas do alumínio e suas ligas..... | 43 |
| 2.2.3 Soldabilidade do alumínio e suas ligas..... | 43 |
| 2.2.4 Liga de alumínio 5052..... | 44 |
| 2.2.4.1 Propriedades da liga de alumínio 5052..... | 44 |
| 2.2.4.2 Aplicações da liga de alumínio 5052..... | 44 |
| 2.2.5 Propriedades da liga de alumínio 1100..... | 45 |
| 2.2.5.1 Aplicações da liga de alumínio 1100..... | 46 |
| 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE DADOS | 47 |

Considerações finais.....57

REFERÊNCIAS58

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Processo TIG..... | 15 |
| Figura 2 - Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas..... | 16 |
| Figura 3 - Porosidade em solda de alumínio..... | 17 |
| Figura 4 - Preparação e limpeza das juntas..... | 20 |
| Figura 5 – Falta de fusão | 21 |
| Figura 6 – Falta de penetração..... | 21 |
| Figura 7 - Mordedura..... | 22 |
| Figura 8 – Mordedura raiz..... | 22 |
| Figura 9 - Porosidade..... | 23 |
| Figura 10 – Efeitos da porosidade nas propriedades mecânicas..... | 24 |
| Figura 11 – Porosidade em solda de alumínio..... | 25 |
| Figura 12 – Corpo de prova posicionado para teste de raio x..... | 48 |
| Figura 13 – Parâmetros de teste de raio x..... | 49 |
| Figura 14 – Parâmetros de teste de raio x..... | 49 |
| Figura 15 – Parâmetros de teste de raio x..... | 50 |
| Figura 16 – Modelo do aparelho de raio x utilizado..... | 50 |
| Figura 17 – Imagem da peça após carga de 100 kV. Verificou-se que não há poros...51 | |
| Figura 18 – Imagem da peça após carga de 100 kV. Verificou-se que não há poros...52 | |
| Figura 19 – Imagem da peça após carga de 100 kV. Verificou-se que não há poros...53 | |
| Figura 20 – Imagem da peça após carga de 100 kV. Verificou-se que não há poros...54 | |
| Figura 21 – Qualidade das peças soldadas..... | 55 |
| Figura 22 – Qualidade das peças soldadas..... | 56 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- I.A.C.S.-** Norma Internacional de Cobre Recozido; *International Annealed Copper Standard*
- AWS-** Sociedade Americana de Soldagem; *American Welding Society*
- EWth-** Eletrodo de Soldagem de Tungstênio Toriado; *Tungsten Welding Electrode with Thorium*
- EWzr-** Eletrodo de Soldagem Zirconado; *Zirconia Welding Electrode*
- GTAW-** Solda a arco elétrico com gás e tungstênio; *Gas Tungsten Arc Welding*
- GMAW-** Solda a arco elétrico com gás e metal; *Gas Metal Arc Welding*
- MIG-** Metal Inerte Gás; *Inert Metal Gas*
- MAG-** Metal Ativo Gás; *Active Metal Gas*
- TIG-** Tungstênio Inerte Gás; *Tungsten Inert Gas*
- EWP-** Eletrodo de Tungstênio Puro; *Pure Tungsten Electrode*
- IP-** Instrução de Processo
- PC-** Plano de Corte
- PS-** Plano de Soldagem
- EPS-** Especificação do Procedimento de Soldagem
- RQPS-** Registro de Qualificação de Procedimentos de Soldagem
- APS-** Acompanhamento do Procedimento de Soldagem
- CE-** Certificado de Ensaios
- RNC-** Registro de Não Conformidade
- CDS-** Controle de Desempenho do Soldador
- RQS-** Registro de Qualificação do Soldador
- IEIS-** Instrução de Execução e Inspeção de Soldagem
- PPM-** Partícula Por Milhão
- LPM-** Litro Por Minuto
- WIG-** Wolfrânio Inerte Gás; *Wolfranium Inert Gas*
- CFC-** Cúbico de Face Centrada
- SG-A-** Gás de Proteção; *Shielding Gas*
- MgZn₂**- Magnésio e Zircônio
- ABNT-** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- NBR-** Norma Brasileira

ISO- Organização Internacional de Padronização; *International Organization for Standardization*

1.INTRODUÇÃO

A soldagem visa a união localizada de materiais, similares ou não, de forma permanente, baseada na ação de forças em escala atômica semelhantes às existentes no interior dos materiais. É a forma mais importante de união permanente de peças usada na indústria.

1.1 Contextualização

Os processos de soldagem são empregados nas indústrias de modo geral a fim de unir um subconjunto a um único conjunto dando-lhe a forma de um equipamento funcional. A soldagem é um processo que requer métodos de controle antes, durante e depois da fabricação do componente soldado.

O objetivo principal deste estudo é solucionar o problema de porosidade no processo de soldagem das ligas de alumínio 5052 e 1100 utilizando o processo TIG em uma empresa do segmento de conexões situada no bairro de Vila Alpina na cidade de São Paulo.

O processo de soldagem TIG será detalhado oportunamente.

Esta pesquisa é de natureza exploratória e foi desenvolvida por meio de longo período de observação em chão de fábrica. A empresa fornece aos segmentos de produtos alimentícios, gasodutos e oleodutos.

A pesquisa verificou que os conjuntos produzidos apresentavam o problema de porosidade na solda. Tais conjuntos eram compostos de peças fabricadas em ligas de alumínio: 5052 e 1100.

Foi observado, também, que o conhecimento técnico dos colaboradores que acompanhavam o processo de soldagem era insuficiente. Além disso, a gestão de qualidade da empresa não manifestava interesse em propor melhorias para aquele processo, que reduziriam custos e melhorariam a qualidade, pois o retrabalho ficaria muito reduzido.

Assim, consideramos que esta pesquisa contribuiu para solucionar os problemas relacionados à porosidade na soldagem de peças de alumínio 5052 e 1100.

1.1.2 Documentação técnica de suporte

Na elaboração do projeto de montagem, visando atender as especificações e garantir a qualidade dos serviços, são usados alguns documentos técnicos que darão suporte a essas operações. São eles:

- Instrução de Processo (IP)

Detalha as operações complexas.

Instrui como montar subconjuntos.

Pormenoriza sequências de fabricação de difícil execução.

- Plano de Corte (PC)

Define o aproveitamento da matéria prima.

- Plano de Soldagem (PS)

Contém as informações necessárias para a execução de soldas em processo de produção industrial.

- Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)

Documento elaborado em obediência as normas, códigos e especificações do equipamento. Suas informações alimentam o plano de soldagem.

- Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem (RQPS)

Comprova que uma dada especificação do PS atende às exigências das normas aplicáveis.

- Acompanhamento do Procedimento de Soldagem (APS)

Detalha todos os parâmetros empregados no RQPS.

- Certificado de Ensaios (CE)

Registra todos os dados obtidos nos ensaios.

- Relatório de Não Conformidade (RNC)

Registra qualquer irregularidade observada no processo. Tem como principal função evitar o procedimento de desvio de conformidade, reforçando ações corretivas que assegurem a normalidade na fabricação.

- Controle de Desempenho do Soldador (CDS)

Mapa que controla o nível de qualidade do soldador, registrando os defeitos provocados pelo profissional.

- Registro de Qualificação do Soldador (RQS)

Atesta a capacidade do soldador de executar soldas de acordo com faixas de qualificação impostas por normas.

Para tanto, são feitos testes e ensaios realizados em corpo de prova.

- Instrução de Execução e Inspeção de Soldagem (IEIS)

Detalha todas as etapas de execução da soldagem, desde a preparação do processo até o teste final.

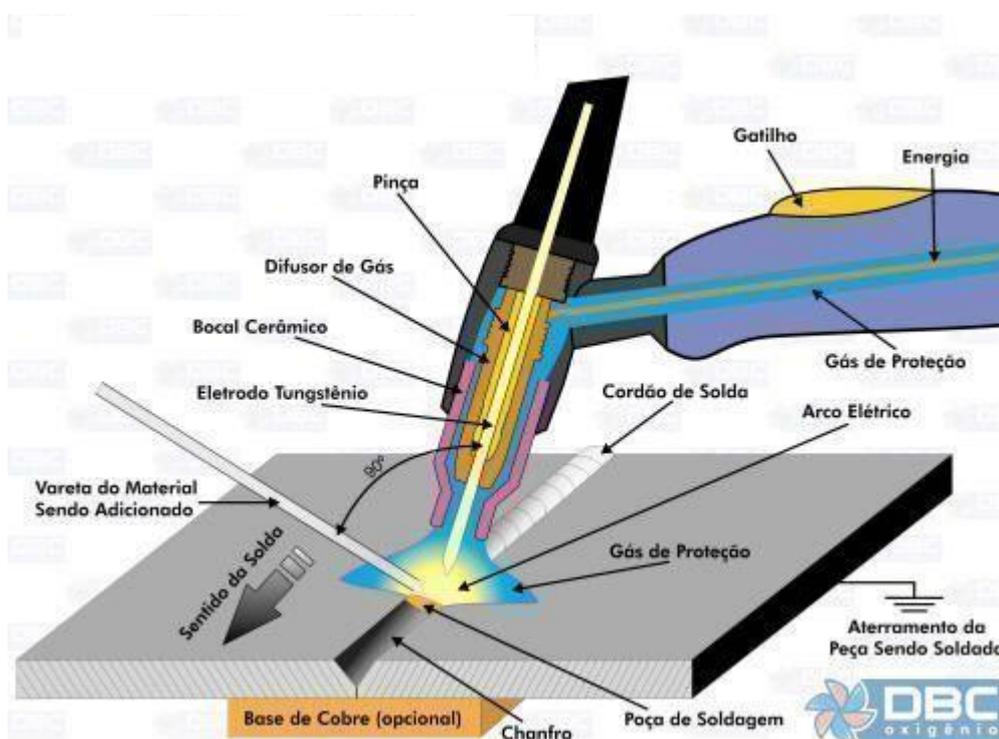
1.1.3 O processo de soldagem TIG

Atualmente TIG é a denominação dada ao processo de soldagem (fig. 1.1.3) que utiliza eletrodo de tungstênio em atmosfera de gás inerte (TIG = Tungstênio + Gás Inerte). Na Alemanha, o processo é conhecido por WIG, iniciais de “Wolfranium Inert Gas”, pois wolfrânio é outra designação para tungstênio. Embora chamados de eletrodos permanentes, os de tungstênio gastam. Em condições normais, esses eletrodos, com comprimentos mais comuns de 150 a 170mm, duram 30 horas de arco

aberto. Trata-se de um processo na maioria das vezes manual, em que uma das mãos conduz a tocha e a outra a vareta de metal de adição, analogamente à soldagem oxiacetilênica. É a vareta e não o eletrodo que se funde, transformando-se em material que integrará a solda. Na figura 1 tem-se um esquema do processo TIG.

Embora não seja tão comum, esse processo pode ser semiautomático ou totalmente automatizado. Além disso, o processo pode ser empregado com ou sem metal de adição. Neste caso, por não se usar a vareta, a solda será composta apenas pelo material de base que fundir.

Figura 1: Processo TIG



Fonte: DBC Oxigênio

1.1.4 Fundamentos do processo TIG

Soldagem TIG é a união de metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça.

A proteção durante a soldagem é conseguida com um gás inerte ou mistura de gases inertes, que também tem a função de transmitir a corrente elétrica quando ionizado durante o processo. A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição. O eletrodo que conduz a corrente é um arame de tungstênio puro ou liga deste metal.

A área do arco é protegida da contaminação atmosférica pelo gás protetor, que flui do bico da pistola. O gás remove o ar, eliminando nitrogênio, oxigênio e hidrogênio de contato com o metal fundido e com o eletrodo de tungstênio aquecido. Há um pouco ou nenhum salpico e fumaça. A camada da solda é suave e uniforme, requerendo pouco ou nenhum acabamento posterior.

A soldagem TIG pode ser usada para executar soldas de alta qualidade na maioria dos metais e ligas. Não há nenhuma escória e o processo pode ser usado em todas as posições. Este processo é o mais lento dos processos manuais.

1.1.5 Equipamento de soldagem TIG

Figura 2



Fonte: Autores

A soldagem TIG é usualmente um processo manual, mas pode ser mecanizado ou até mesmo automatizado. O equipamento necessita ter:

1) Um porta eletrodo com passagem de gás e um bico para direcionar o gás protetor ao redor do arco e um mecanismo de garra para energizar e conter o tungstênio; Esse conjunto recebe o nome de tocha;

- 2) Um suprimento de gás protetor;
- 3) Um fluxímetro e um regulador de pressão do gás;
- 4) Uma fonte de energia elétrica;
- 5) Um suprimento de água de refrigeração, se a tocha é refrigerada a água.

As variáveis que mais afetam este processo são as variáveis elétricas (corrente, tensão e características da fonte de energia). Elas afetam na quantidade, distribuição e no controle de calor produzido pelo arco e desempenham um papel importante na estabilidade do arco e na remoção do óxido refratário da superfície de alguns metais.

Os eletrodos de tungstênio usados na soldagem TIG são de várias classificações e os requisitos destes são dados pela norma da AWS.

- 1) Tungstênio puro (EWP).
- 2) Tungstênio com 1,0 ou 2,0 % de tório (EWTh.1, EWTh.2).
- 3) Tungstênio com 0,15 a 0,4 % de Zircônio (EWZr).
- 4) Tungstênio com 3% de tório (EWTh.3).

A adição de tório ou zircônio ao tungstênio permite a este emitir elétrons mais facilmente quando aquecido. A figura 1 ilustra o equipamento necessário para o processo TIG.

1.1.6 Tipos e funções de consumíveis: metais de adição

Figura 3



Fonte: Autores

Uma ampla variedade de metais e ligas estão disponíveis para utilização como metais de adição no processo de soldagem TIG.

Os metais de adição, se utilizados, normalmente são similares ao metal que está sendo soldado.

Os gases de proteção mais comumente usados para a soldagem TIG são argônio, hélio ou uma mistura desses dois gases. O argônio é muitas vezes preferido em relação ao hélio porque apresenta várias vantagens:

- 1) Ação do arco mais suave e sem turbulências.
- 2) Menor tensão no arco para uma dada corrente e comprimento de arco.
- 3) Maior ação de limpeza na soldagem de materiais como alumínio e magnésio em corrente alternada.
- 4) Maior custo e maior disponibilidade.
- 5) Menor vazão de gás para uma boa proteção.
- 6) Melhor resistência a correntes de ar transversal.
- 7) Maior facilidade para a iniciação do arco.

Por outro lado, o hélio usado como gás protetor, resulta em tensão de arco mais alto para um dado comprimento de arco e corrente em relação ao argônio, produzindo mais calor e assim é mais efetivo para soldagem de materiais espessos (especialmente metais de alta condutividade, como alumínio). Entretanto, visto que a densidade do hélio é menor que a do argônio, usualmente são necessárias maiores vazões de gás para se obter um bom arco e uma proteção adequada da poça de fusão.

1.1.7 Características e aplicações da soldagem TIG

A soldagem TIG é um processo bastante adequado para espessuras finas dado o excelente controle da fonte de calor. A fonte de calor e o metal de adição são controlados separadamente. O processo pode ser aplicado em locais que não necessitam de metal de adição.

Este processo também pode unir paredes espessas de chapas e tubos de aço e ligas metálicas. É usado tanto para soldar tubos de metais ferrosos como de não ferrosos. Os passes de raiz de tubulações de aço carbono e aço inoxidável, especialmente aquelas de aplicações críticas são frequentemente feitos pelo processo TIG.

Embora a soldagem TIG tenha um alto custo inicial e baixa produtividade, esses são compensados pela possibilidade de se soldar muitos tipos de metais, de espessuras e em

posições não possíveis por outros processos, bem como pela obtenção de soldas de alta qualidade e resistência.

A soldagem TIG prontamente possibilita soldar alumínio, magnésio, titânio, cobre e aços inoxidáveis, como também metais de soldagem difícil e outros de soldagem relativamente fácil como os aços carbono.

Alguns metais podem ser soldados em todas as posições, dependendo da corrente de soldagem e da habilidade do soldador.

A corrente usada com a solda TIG pode ser alternada ou contínua. Com a corrente contínua pode-se usar polaridade direta ou inversa. Entretanto, visto que a polaridade direta produz o mínimo de aquecimento no eletrodo e o máximo de aquecimento no metal de base, eletrodos menores podem ser usados, obtendo-se profundidade de penetração ainda maior do que a obtida com polaridade inversa ou com corrente alternada.

Quando se deseja baixa penetração como na soldagem de chapas finas de alumínio, deve se optar pela situação que leve ao aquecimento mínimo do metal de base.

A respeito das vantagens citadas, é conveniente lembrar que a soldagem TIG, para ser bem-sucedida, requer uma excepcional limpeza das juntas a serem soldadas e um treinamento extenso do soldador.

Uma consideração que se deve ter em mente é o ângulo de cone da ponta do eletrodo de tungstênio, pois a conicidade afeta a penetração da solda.

Se o ângulo do cone for diminuído (ponta mais aguda) a largura do cordão tende a reduzir-se e a penetração aumenta. Contudo, se a ponta se tornar aguda demais a intensidade da corrente aumenta na ponta, e a extremidade desta pode atingir temperaturas superiores ao ponto de fusão do eletrodo quando então irá se desprender do eletrodo e contaminando a poça de fusão.

A faixa de espessura para soldagem TIG (dependendo do tipo de corrente, tamanho do eletrodo, diâmetro do arame, metal de base e gás escolhido) vai de 0.1mm a 50mm. Quando a espessura excede 5mm, precauções devem ser tomadas para controlar o aumento de temperatura, na soldagem multipasse. A taxa de deposição, dependendo dos mesmos fatores listados para espessura, pode variar de 0,2 a 1,3 kg/h.

1.1.8 Preparação e limpeza das juntas

A preparação e limpeza das juntas para a soldagem TIG requer todos os cuidados exigidos para a soldagem com eletrodo revestido e mais:

- A limpeza do chanfro e bordas deve ser ao metal brilhante, numa faixa de 10mm, pelos lados internos e externos. Isto será detalhado mais adiante.
- Quando da deposição da raiz da solda deve ser empregada a proteção, por meio de gás inerte, pelo outro lado da peça. Veja figura 4.

Figura 4



Fonte: Autores

1.1.9 Defeitos mais comuns na soldagem

- Falta de fusão: fusão incompleta entre a zona fundida e o metal de base, ou entre passes da zona fundida, podendo estar localizada na zona de ligação, entre os passes ou raiz da solda. Veja figura 5.

Figura 5: Falta de fusão



Fonte: Autores

- Falta de penetração: insuficiência de metal na raiz da solda. Veja figura 6

Figura 6: Falta de penetração



Fonte: Autores

- Mordedura: depressão sob a forma de entalhe, no metal de base acompanhando a margem de solda. Veja figura 7.

Figura 7: Mordedura



Fonte: Autores

- Mordedura na raiz: mordedura localizada na margem da raiz da solda. Veja figura 8.

Figura 8: Mordedura na raiz



Fonte: Autores

- Porosidade: defeito descrito com detalhes a seguir. Veja também a figura 9.

Figura 9: Porosidade na solda



Fonte: Autores

1.1.9.1 Porosidade na solda de alumínio

Um dos grandes desafios na soldagem do alumínio e suas ligas é a forte tendência em formar poros durante o processo.

- Poro vazio ou falta de preenchimento no cordão de solda, com formato esférico.
- Poro superficial: poro presente na superfície do cordão de solda
- Porosidade: vários poros presentes no cordão de solda

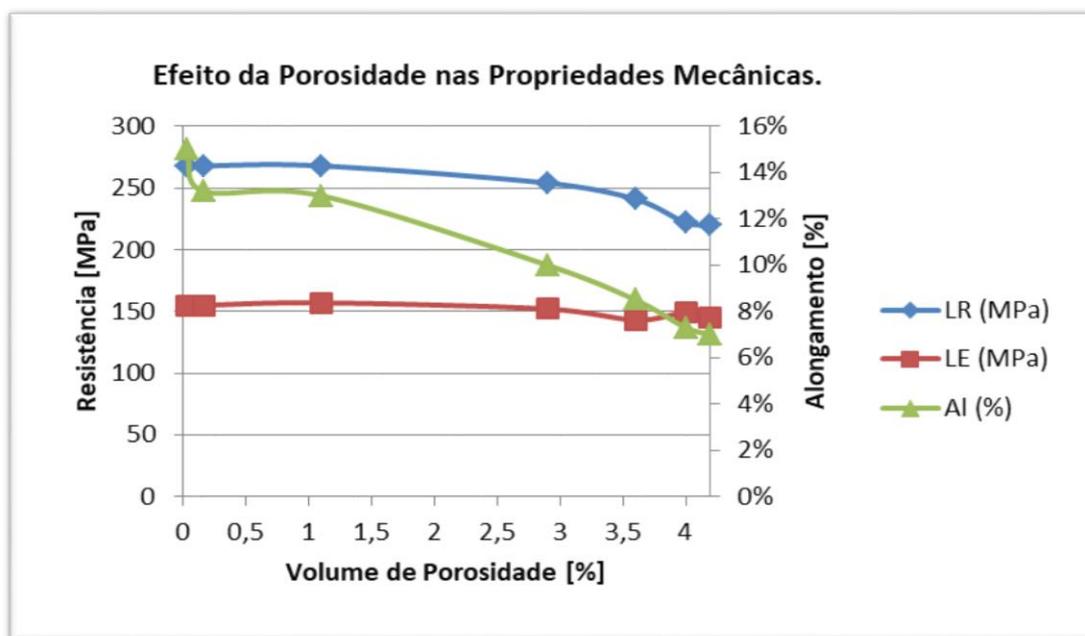
Mas por que isso acontece? Quais são as implicações da presença de poros no comportamento mecânico da junta soldada? Como reduzir a ocorrência deles?

O grande vilão desta história é o hidrogênio que causa porosidade e distorção no conjunto soldado. Mas de onde vem o hidrogênio?

Como o alumínio é um metal extremamente reativo, ao entrar em contato com o ar úmido durante a soldagem, o vapor d'água se decompõe liberando hidrogênio para a

poça de fusão. Outras fontes potenciais de hidrogênio são todos os hidrocarbonetos ou compostos orgânicos que não são voláteis (óleos, graxas e tintas por exemplo).

Figura 10: Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas.



Fonte: Marcelo Ferrari (2022)

O primeiro aspecto a ser considerado aqui diz respeito à solubilidade do hidrogênio no alumínio: no estado líquido essa solubilidade é muito maior do que no estado sólido.

É importante notar que a solubilidade do hidrogênio no alumínio depende da liga que está sendo soldada porque essa solubilidade no estado sólido depende de cada elemento de liga presente e o seu teor.

Assim, durante a soldagem, a poça de fusão é muito propensa em absorver o hidrogênio, e à medida que a solda se solidifica, ele tende a escapar. Porém, se a solidificação for rápida (o que ocorre na soldagem do alumínio), esse gás ficará aprisionado na forma de poros. A figura 11 mostra o efeito devastador do hidrogênio. Observe-se que mesmo com baixo teor de hidrogênio o efeito na porosidade é bastante evidente.

Figura 11: Porosidade em solda de alumínio



Fonte: Autores

O grande problema da porosidade é que ela é bastante prejudicial para as propriedades mecânicas do metal de solda e na maioria das vezes ela não é aparente na superfície o que pode dar uma falsa impressão que está “tudo bem”.

Esse efeito muitas vezes inviabiliza o ensaio de dobramento que é empregado para fins de qualificação de procedimentos de soldagem.

E o que podemos fazer para eliminar ou ao menos reduzir a porosidade na soldagem de alumínio? Sugerimos as ações a seguir.

- Limpeza do metal de base: o alumínio é um material muito reativo e quando ele entra em contato com ar atmosférico é formado um filme de óxido bastante aderente sobre a sua superfície. Esta camada muito aderente é responsável pela magnífica resistência do alumínio à corrosão, porém por ser bastante porosa ela acaba aprisionando umidade e compostos orgânicos (fonte de hidrogênio). Quando decompostas elas liberam hidrogênio para a poça de fusão. Assim esta camada deve ser eliminada um pouco antes de começar a soldagem. Uma sequência recomendada

seria a limpeza inicial com algum desengraxante alcalino seguido de escovamento mecânico (com ferramentas específicas para alumínio e somente usadas para este material) e limpeza final com acetona. Não deve ser empregado álcool, pois ele reage com o alumínio especialmente em altas temperaturas.

- Limpeza do metal de adição: no caso da soldagem (TIG) o ideal é que as varetas sejam limpas com acetona antes da soldagem.
- Cuidados com o gás de proteção: outro ponto importante é a questão dos gases. Todo sistema de alimentação de gás deve ser checado para verificar se não há vazamento nas mangueiras. Caso existam eles podem arrastar umidade para o gás e assim contaminar a poça de fusão.
- Também é importante, antes de soldar, realizar a purga do sistema.
- O gás contido no cilindro deve conter baixo teor de umidade. Isso pode ser relacionado com o ponto de orvalho.

Assim, deve-se optar sempre com gás com baixo ponto de orvalho.

De acordo com a norma AWS A5.32 "Specification for Welding Shielding Gases" o máximo teor de umidade deve ser de 10,5 ppm (partícula por milhão) e o ponto de orvalho máximo deve ser de -60°C , para argônio.

De um modo geral o argônio é um gás de proteção mais empregado na soldagem de alumínio (pequenas e médias espessuras) tanto para o processo GTAW quanto para o GMAW.

Entretanto é sempre melhor usar uma mistura de argônio com hélio.

O hélio faz a mistura ficar mais quente, o que aumenta o tempo da poça de fusão no estado líquido (lembrar que o alumínio é um material de alta condutibilidade térmica e tende a se solidificar rapidamente) aumentando o tempo para o hidrogênio escapar da poça de fusão. Na verdade, a adição do hélio aumenta a energia necessária para a ionização do gás e, conseqüentemente, o calor adicionado ao metal de base é maior. Além de diminuir a porosidade, a adição de hélio também favorece a penetração e aumenta a velocidade de soldagem. O teor de hélio na mistura deve variar de 5 a 25%.

Não menos importante deve ser considerada a vazão do gás que deve ser de 10 a 35 lpm (litros por minuto) para o processo GMAW e de 6 a 5 lpm para o GTAW dependendo da espessura. Lembrar sempre que uma proteção gasosa deficiente da poça de fusão irá causar porosidade.

- Uso correto da técnica de Soldagem

A distância entre o bocal da tocha e a peça deve ser tão curta quanto possível, de 3 a 5 mm. Caso seja maior poderá ocorrer a contaminação. O ângulo de trabalho deve ser de 90° para junta de topo e 45° para junta de ângulo. O ângulo da tocha deve ser inclinado aproximadamente 25° em relação a vertical e apontar no sentido do deslocamento (empurrando). A tocha nunca deve ser arrastada (puxando), isto é apontada para o sentido contrário do deslocamento. Quando isso acontece, o seu movimento em relação à junta pode mover o gás de proteção à frente do arco permitindo que o ar entre contaminando a poça de fusão e causando poros. Veja figura 1.

1.2 Objetivo

Fornecer aos profissionais da área da soldagem as diretrizes para maximizar a qualidade da solda de alumínio nas ligas 1100 e 5052 com espessuras de 3mm a 6mm executada em único passe na junta de topo com abertura variando de 2mm a 4mm, para a confecção de solda isenta de porosidade.

1.3 Justificativa

A qualidade de um conjunto soldado está diretamente ligada aos processos de soldagem utilizados em consonância com os parâmetros preestabelecidos. Desta forma as discontinuidades e os defeitos que irão ocorrer implicam no retrabalho ou até mesmo na impossibilidade do uso dessa estrutura, aumentando consideravelmente os custos de produção.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Breve Histórico da Soldagem

Sem possuir dados históricos concretos que nos permitam precisar a origem da solda podemos, no entanto, afirmar que essa técnica nasceu com a aptidão dos homens para trabalhar os metais.

Na verdade, achados arqueológicos troianos do século XII A.C confirmam a existência nessa época da “solda heterogênea” a estanho e da solda “autogenia” por forjamento ou caldeação. Sabe-se por exemplo da existência da espada de Damasco (1300 A.C) que foi construída por “solda de forjamento” e até o uso de uma espécie de maçarico soprado pela boca usando álcool ou óleo como combustível que os egípcios usavam para fundir ou soldar bronze, técnica que foi legada a gregos e romanos.

Desta forma, percebemos que o conceito da soldabilidade existe há muito tempo modernizando-se a partir da descoberta do arco elétrico, bem como a sintetização do gás acetileno no século passado o que permitiu que fossem iniciados alguns processos de fabricação de peças utilizando esses novos recursos.

Com o advento da primeira guerra mundial, a técnica de soldagem começou a ser mais utilizada nos processos de fabricação. A segunda guerra mundial imprimiu grande impulso na tecnologia de soldagem, desenvolvendo novos processos e aperfeiçoando os já existentes.

2.1.1 Cronologia da Soldagem

Apresenta-se a seguir uma linha do tempo com importantes referências sobre soldagem.

Em 1801 Humphrey Davy descobriu o arco elétrico que foi produzido entre dois eletrodos de carvão. Deu a ele o nome de “chama voltaica”.

Em 1836 Edmund Davy descobriu o gás acetileno acidentalmente em experimentos para isolar potássio metálico.

Em 1837 Desbassyns de Richemont descobriu a chama oxi-hídrica.

Em 1856 o físico James Joule, descobriu o princípio da soldagem por resistência.

Em 1862 Friedrich Woehler produziu gás acetileno a partir de carboneto de cálcio.

Em 1876 John Tobin, patenteou seu conhecimento sobre ligas de bronze de alta resistência (cobre-zinco-estanho).

Em 1881 Auguste de Meritens inventou o primeiro equipamento de soldagem a arco e Robert Henry Thurston, completou seis anos de estudos e testes exaustivos sobre a ductilidade e resistência de ligas de latão.

Em 1882 Robert A. Haldfield depositou patente sobre o aço manganês austenítico chamado de aço Haldfield.

Em 1885 Elihu Thompson depositou patente para uma máquina de solda por resistência e Nicolai N. Benardos desenvolveu a soldagem a arco elétrico com eletrodo de carbono.

Em 1887 Nicolai N. Benardos e Stanislaw Olszewski com Auguste de Meritens, depositaram patentes na Inglaterra e nos Estados Unidos para o primeiro porta-eletrodos (para eletrodos de carvão).

Em 1889-1890 Charles L. Coffin realizou a primeira soldagem com eletrodo nu e definiu o conceito de soldagem originada em meio oxidante.

Em 1895 foram observados, por Konrad Roentgen, os efeitos da radiação X enquanto uma corrente elétrica atravessava um tubo sob vácuo e a chama oxiacetilênica foi descoberta e estudada cientificamente por Henry Louis Le Chatelier.

Em 1898 o oxigênio é produzido em escala industrial pela primeira vez por Carl Von Linde.

Em 1900 A.P Strohmenger para melhor estabilizar o arco elétrico, produziu um arame nu coberto por uma fina camada de argila e Edmund Fouche juntamente com Charles Picard fabricaram o primeiro maçarico para soldagem oxiacetilênica.

Em 1903 Hans Goldschmidt descobriu como iniciar a reação exotérmica entre uma mistura de óxido metálico e pó de alumínio (soldagem por aluminotermia) por meio de uma fonte externa de calor.

Em 1909 Carl Johann Schonherr inventou o sistema de soldagem a arco plasma utilizando gás argônio para estabilizar o arco.

Em 1910 Oscar Kjellberg deposita patente para eletrodos revestidos que desenvolveu em 1907.

Em 1920 arames tubulares começaram a ser utilizados para revestimentos duros e P.O. Nobel desenvolveu a soldagem automática.

Em 1926 o desenvolvimento sobre soldagem a arco utilizando o gás hélio como proteção gasosa teve patentes depositadas separadamente por Henry M. Hobart e Philip K. Devers.

Em 1928 foi publicada pela AWS a primeira norma sobre soldagem de aços estruturais utilizando soldagem por fusão e o corte a gás para construção de estruturas.

Em 1930 a soldagem por hidrogênio atômico foi desenvolvida como método para soldagem de metais que não são aços carbonos e aços de baixa liga e B.S. Robiniff depositou patente do processo de soldagem a arco submerso.

Em 1941 Russel Meredith e outros desenvolveram o processo de soldagem TIG (patenteado como Heliarc).

Em 1948 H.F. Kennedy desenvolveu o processo de soldagem MIG.

Em 1949 a Ford produziu o primeiro automóvel com carroceria totalmente soldada utilizando soldagem a arco e por resistência.

Em 1950 na Rússia foi utilizado pela primeira vez em produção, o processo de soldagem por eletroescória e na França e Alemanha foi desenvolvido o processo de soldagem por feixes de elétrons.

Em 1953 R.M Gage patenteou a tocha para arco plasma com constrição e K.V. Lyubasvskii e N.M. Novoshilov desenvolveram o processo de soldagem MAG.

Em 1955 a Linde Division e a Union Carbide Corporation desenvolveram a soldagem a arco plasma (arco constricto).

Em 1956 na Rússia foi patenteada a soldagem por atrito (fricção).

Em 1960 a Airco dos Estados Unidos introduziu o primeiro equipamento de corrente pulsada para soldagem MIG.

Em 1962 Wolfgang Krieweth e Klaus Dohm patentearam o processo de soldagem por eletrogás e no mesmo ano foi desenvolvido o primeiro equipamento para soldagem a laser por Théodore H. Maiman.

Em 1964 a Manz dos Estados Unidos patenteou o processo de soldagem com arame quente e o equipamento de controle sinérgico para soldagem MIG.

Em 1980 começaram a ser utilizados os circuitos semicondutores e circuitos de computador para controle de processos de soldagem, corte e soldagem de placa de circuitos impressos por brasagem por refluxo de vapor.

Em 1991 a soldagem por fricção linear é introduzida e utilizada com sucesso na soldagem de ligas de alumínio séries 2000, 5000 e 6000.

Em 1993 o processo de soldagem por laser de CO₂ é automatizado com robôs no tanque de guerra M1 Abrams do exército americano.

2.1.2 Soldagem na era moderna

O processo de soldagem moderno só evoluiu a partir da descoberta do arco elétrico em 1801 pelo inglês Sir Humphry Davy. O processo demorou em torno de 7 anos para ser oficializado. Em 1808, Humphry Davy apresentou publicamente um arco de grande escala em frente a Royal Society em Londres, através da transmissão de uma corrente elétrica entre duas hastes de carbono em contato.

Esse avanço permitiu a criação da solda por arco elétrico, um marco muito importante na história da soldagem. Porém a falta de estabilidade e equipamentos mais adequados atrasou o processo e por isso a demora de quase 100 anos para tornar-se viável na indústria.

A história da soldagem faz parte da história do mundo. A primeira utilização em larga escala foi durante a primeira guerra mundial, onde foi usada como uma ferramenta de reparos rápidos de equipamentos, que permitia ganho de tempo durante os conflitos. Contudo após a guerra, a indústria ainda preferia produzir peças de equipamentos em ferro fundido.

Para uma engrenagem de ferro fundido ser feita era necessário projetar a peça, fabricar um molde em argila, preencher o molde com o ferro derretido e usinar a peça

para corrigir as imperfeições geradas pelo molde. Já a solda era um método mais barato, rápido e prático para a produção de peças quando comparado ao processo de fundição. No entanto, a indústria tinha receio do uso da nova tecnologia e acordos lucrativos comerciais sobre o uso do ferro fundido também era um empecilho. Por isso a demora para incluir o processo na sua linha de produção.

2.1.3 A revolução industrial

A soldagem permitiu um grande avanço na indústria agilizando o tempo de produção e reduzindo custos. Ela começou a ser utilizada em todos meios possíveis por prover qualidade e resistência.

Os aviões deram um grande salto em sua tecnologia. Com a solda, as cabines pressurizadas ficaram mais eficazes e as estruturas mais fortes e leves. A mudança permitiu que os aviões pudessem carregar mais passageiros por maiores distâncias e melhor conforto, reduzindo os efeitos das violentas turbulências.

As linhas férreas também foram beneficiadas pela soldagem, não só na questão dos trilhos que podiam ser reparados a qualquer momento, mas a própria locomotiva modernizou-se.

A indústria dos meios de transportes teve uma grande evolução, porém não foi apenas esse setor que sofreu transformações a partir da solda, as construções também passaram por uma inovação gigantesca permitindo estruturas metálicas mais resistentes que resultaram na construção de prédios cada vez mais altos.

Graças à evolução da tecnologia desses equipamentos, a humanidade alcançou grandes feitos como por exemplo, a corrida espacial durante a guerra fria. O desenvolvimento da tecnologia da solda fez o homem pisar na Lua graças a melhorias nas cápsulas pressurizadas e nas estruturas metálicas dos foguetes.

Outro grande avanço proporcionado pela soldagem aconteceu nas refinarias de petróleo. Com a melhoria dos tubos pressurizados, a produtividade aumentou juntamente com a qualidade e conseqüentemente houve a redução do custo de produção e do combustível.

Sendo assim, com esses exemplos é possível perceber a importância que a história da soldagem e a evolução dos processos têm para a história da tecnologia.

2.1.4 O surgimento do processo de soldagem TIG

A possibilidade de usar o gás hélio para proteger o arco voltaico foi primeiramente investigada em 1920. No entanto em 1940 o processo TIG foi desenvolvido para soldagem de aços inoxidáveis e ligas de alumínio e magnésio. Atualmente é utilizado para soldar praticamente todos os materiais.

Durante a II Guerra Mundial, quando a indústria de aviões de combate enfrentou a premente necessidade de substituir os rebites por soldas de alumínio e magnésio, esta possibilidade foi amplamente desenvolvida. Usando um eletrodo de tungstênio no polo negativo conseguia-se soldas de ótima qualidade.

Atualmente TIG é a denominação dada ao processo de soldagem (fig1) que utiliza eletrodo de tungstênio em atmosfera de gás inerte (TIG = Tungstênio + Gás Inerte). Na Alemanha, o processo é conhecido por WIG, iniciais de "Wolfranium Inert Gas", pois wolfrânio é outra designação para tungstênio. Embora chamados de eletrodos permanentes, os de tungstênio gastam. Em condições normais, esses eletrodos, com comprimentos mais comuns de 150 a 170mm, duram 30 horas de arco aberto. Trata-se de um processo na maioria das vezes manual, em que uma das mãos conduz a tocha e a outra a vareta de metal de adição, analogamente à soldagem oxi-acetilênica. É a vareta e não o eletrodo que se funde, transformando-se em material que integrará a solda.

O eletrodo gasta porque é contaminado pelos resultados da solda e precisa sofrer manutenção (esmerilhamento) com certa frequência.

Embora não seja tão comum, esse processo pode ser semiautomático ou totalmente automatizado. Além disso, o processo pode ser empregado com ou sem metal de adição. Neste caso, por não se usar a vareta, a solda será composta apenas pelo material de base que fundir.

O processo TIG é especialmente para o alumínio, magnésio e suas respectivas ligas, aços inoxidáveis e metais especiais como titânio e molibdênio. É utilizado em aços comuns ou ligas em casos específicos, sobretudo para espessuras finas e médias. Entretanto, com utilização de metal de adição, pode-se soldar chapas espessas, principalmente em ligas leves e inoxidáveis. Os materiais de consumo (gás inerte e eletrodo de tungstênio) são relativamente caros. A mão de obra deve ter boa formação.

Em suma, o processo TIG é usado para aços comuns e especiais, principalmente onde se tenham espessuras finas menos que 2 ou 3 milímetros (obtendo-se melhor

aspecto da solda e menores deformações nas peças), e é o principal processo quando se trata de ligas leves e metais especiais.

Além disso para se obter bom aspecto na junta, reduzindo ao mesmo tempo as tensões internas e as deformações, o processo TIG é muito usado também para aços inoxidáveis.

A soldagem TIG automática existe em duas versões: sem e com metal de adição. Ambos os casos só se aplicam para fabricação seriada, em ligas leves, inoxidáveis e, em certos casos, de aços comuns ou ligas em chapa fina. Obtém-se solda de belo aspecto e com notável regularidade de penetração, apropriada aos casos que necessita de um trabalho limpo, com muito esmero e muito precisão de montagens.

2.2 O alumínio e suas ligas

O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativamente baixa, tem condutividades elétrica e térmica elevadas e uma boa resistência à corrosão. Muitas dessas ligas são conformadas com facilidade em virtude das suas elevadas ductilidades.

O alumínio é um metal não ferroso de cor branco acinzentado, tem somente $\frac{1}{3}$ do peso do aço e uma boa resistência a corrosão ambiental, não magnético, bom condutor de calor e ótimo condutor elétrico com o diferencial de não produzir faíscamento. São caracterizados por uma densidade relativamente baixa ($2,7 \text{ g/cm}^3$ em comparação com uma densidade de $7,9 \text{ g/cm}^3$ para o aço), condutividade elétrica e térmica elevadas e uma resistência a corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente. Muitas dessas ligas são conformadas com facilidade em virtude das suas elevadas ductilidade; isso fica evidente através das finas folhas de papel alumínio nas quais o material relativamente puro pode ser laminado.

Uma vez que o alumínio possui uma estrutura cristalina CFC, a sua ductilidade é mantida até mesmo em temperaturas reduzidas. A principal limitação do alumínio está na sua baixa temperatura de fusão [660°C (1220°F)], o que restringe a temperatura máxima em que o alumínio pode ser utilizado.

A resistência mecânica do alumínio pode ser aumentada através da deformação plástica a frio e mediante a formação de ligas; entretanto, ambos os processos tendem

a diminuir a resistência a corrosão. Os principais elementos de liga incluem o cobre, o magnésio, o silício, o manganês e o zinco. As ligas que não são tratadas termicamente consistem em uma única fase, para as quais um aumento na resistência é obtido através do endurecimento por solução sólida. Outras ligas são tornadas termicamente tratáveis (capazes de serem submetidas a tratamento de endurecimento por precipitação) como resultado do processo de formação da liga. Em várias dessas ligas, o endurecimento por precipitação é devido à precipitação de dois elementos que são adicionados ao alumínio para formar um composto intermetálico, tal como o $MgZn_2$.

A seguir são descritas algumas características do alumínio:

- **Densidade:** a densidade é uma das mais conhecidas características físicas do alumínio e a mais interessante do ponto de vista da engenharia. Como mostra a Tabela 1, a densidade do alumínio é a menor de todos os materiais listados, exceto o magnésio. Esse baixo valor faz com que o alumínio possa competir com outros metais, em base de peso, mesmo quando estes apresentam melhores propriedades em base volumétrica. A menor densidade do alumínio, quando comparada com o aço, não tem nenhuma ligação direta com a soldagem. Entretanto, a maior facilidade no manuseio das lâminas antes e após a soldagem é uma vantagem significativa que deve ser levada em consideração (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993).

- **Condutividade elétrica:** a condutividade elétrica difere de metal para metal e no alumínio de liga para liga. A Tabela 1 mostra que, para os metais mais comuns, o cobre tem a mais alta condutividade. O alumínio comercialmente puro é o mais próximo, com 60% do valor do padrão internacional do cobre (IACS). Ainda assim, apesar do condutor de alumínio precisar de 1,67 vezes a área de seção transversal de um condutor equivalente de cobre, o seu peso é somente metade do valor deste último, devido à sua densidade ser aproximadamente um terço se comparada com a do cobre. Este é um exemplo de que modo duas propriedades (baixa densidade e alta condutividade) proporcionam ao alumínio uma vantagem sobre os outros materiais, e explica a razão do seu uso crescente em setores de transmissão e distribuição de energia elétrica (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993).

- **Condutividade térmica:** é uma das mais altas encontradas nos metais, é aproximadamente cinco vezes a do aço, porém é metade em relação à do cobre.

- Ponto de fusão: a temperatura em que o alumínio deixa de ser sólido e passa a ser líquido é 660°C, suas ligas têm um ponto de fusão entre 482°C e 660°C. A pureza do alumínio não ligado varia entre 99,2% e 99,9% para as formas comerciais. Purezas maiores requerem técnicas especiais de fusão. Quanto maior for o grau de pureza, maiores serão as condutividades elétricas e térmicas.
- Calor específico: é a quantidade de energia térmica fornecida a uma substância para que sua temperatura varie 1°C. Todos os líquidos, sólidos e gases possuem um calor específico que caracteriza o seu comportamento quando estão sujeitos a uma fonte de calor.

Esse calor é proporcional àquele fornecido pela substância, então se aumentarmos o calor específico, a quantidade de calor necessário para que a substância varie sua temperatura também aumentará.

Por exemplo, o calor específico do alumínio é 0,215 cal/g. °C, já o da água é de 1 cal/g. °C, o que significa dizer que a água precisa receber mais calor do que o alumínio para conseguir aumentar sua temperatura.

- Calor latente de fusão: o calor latente de fusão é o calor absorvido quando uma substância passa do estado sólido para o estado líquido sem aumento de temperatura. (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993).

Tabela 1 – Propriedades físicas de vários materiais

| PROPRIEDADES | SI | ALUMÍNIO | COBRE 6538 | BRONZE 6538 | AÇO | AÇO INOX 304 | MAGNÉSIO |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Densidade | g/cm ³ | 2,79 | 8,93 | 8,43 | 7,99 | 7,88 | 1,74 |
| Condutividade Elétrica | % I.A.C.S. | 62 | 100 | 27 | 10 | 2 | 38 |
| Condutividade Térmica 25°C | W/(m.°C) | 222 | 394 | 117 | 46 | 21 | 159 |
| Coefficiente de Expansão Linear | °C | 23,6x10 ⁻⁶ | 16,5x10 ⁻⁶ | 20,3x10 ⁻⁶ | 12,6x10 ⁻⁶ | 16,2x10 ⁻⁶ | 25,8x10 ⁻⁶ |
| Calor Específico Médio 0 – 100°C. | J/(Kg.°C) | 940 | 376 | 368 | 496 | 490 | 1022 |
| Calor Latente de Fusão | KJ/Kg | 388 | 212 | - | 272 | - | 372 |
| Ponto de Fusão | °C | 660 | 1083 | 930 | 1350 | 1426 | 651 |
| Módulo de Elasticidade (E) | MPa | 69x10 ³ | 110x10 ³ | 103x10 ³ | 200x10 ³ | 200x10 ³ | 45x10 ³ |

Fonte: ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993

2.2.1 Propriedades químicas do alumínio

A composição química do alumínio e suas ligas é expressa em percentagem, obedecendo à Norma ABNT NBR ISO 209, que abrange o sistema de classificação da composição do alumínio e suas ligas.

- Uma liga muito utilizada (3003) contém 1,2% de manganês. Suas propriedades, principalmente a conformidade e a resistência à corrosão, são similares às do alumínio comercialmente puro, com propriedades mecânicas um pouco melhores, particularmente quando deformadas a frio.

As mais resistentes são as ligas da série alumínio-magnésio, disponíveis em vários formatos como lâminas, chapas, perfis, tubos, arames etc. Elas também possuem elevada resistência à corrosão e são facilmente soldadas.

As ligas tratadas termicamente de média resistência, que contém magnésio e silício, possuem elevada resistência a corrosão, mas perdem um pouco de sua trabalhabilidade, o que é irrelevante em seções estruturais retas, as quais são muito difundidas em aplicações estruturais.

As ligas tratadas termicamente de elevada resistência, que contém cobre ou zinco como principais elementos de liga, são tão resistentes quanto o aço estrutural, mas necessitam de proteção superficial. Estas ligas são utilizadas quando a maior relação resistência/peso for a principal consideração, como na aviação.

A tabela a seguir resume as mais importantes.

Tabela 2: características de ligas de Al

| NOMENCLATURA CONFORME NORMAS: ABNT – NBR 8994 – PETROBRAS Nº1618A e ASTM B-209 | FORMATOS | CARACTERÍSTICAS | APLICAÇÃO |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1050 | Chapas Bobinas Tubos | Alta resistência à corrosão. Boa conformabilidade e soldabilidade. Baixa resistência mecânica. Adequada para anodização decorativa. | Refletores, luminárias, utensílios domésticos, tanques e cubas estruturais nas indústrias química e alimentícia, trocadores de calor. |
| 1100 1200 | Chapas Bobinas | Alta resistência à corrosão. Boa conformabilidade e soldabilidade. Baixa resistência mecânica. Adequada para anodização decorativa. | Painéis decorativos, etiquetas metálicas, utensílios domésticos, refletores, aletas |
| 1350 | Vergalhões Barras Chatas Tubos | Alta soldabilidade e resistência à corrosão. Alta condutividade elétrica. Boa conformabilidade | Condutores Elétricos. |
| 2011 | Vergalhões | Alta resistência mecânica. Boa usinabilidade. Média resistência à corrosão. Não | Peças usinadas em torno automático |

| | | | |
|------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | recomendada para solda. | |
| 3003 | Tubos Chapas Bobinas | Média resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. Boa conformabilidade. Boa soldabilidade | Trocadores de Calor, isolamento térmico, indústria química, utensílios domésticos, carrocerias. |
| 3104 | Chapas Bobinas | Boa resistência à corrosão. Boa conformabilidade. Moderada resistência mecânica | Carrocerias para ônibus e caminhões, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e alimentícia, latas para bebidas e alimentos, coberturas, calhas. |
| 3105 | Chapas Bobinas | Boa resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. Boa conformabilidade. Boa soldabilidade | Carrocerias de ônibus e caminhão, piso antiderrapante |
| 5005 | Chapas Bobinas | Alta resistência mecânica e à corrosão. Alta conformabilidade. Alta soldabilidade | Utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e alimentícia, coberturas, calhas e forros. |
| 5052 | Chapas Bobinas Lâminas | Alta resistência mecânica e à corrosão. Alta soldabilidade. Boa conformabilidade. | Carrocerias para ônibus e caminhão, placas de sinalização, indústria naval, persianas, ilhoses, peças estampadas com alta solicitação mecânica, vagões ferroviários, piso |

| | | | |
|------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| | | | antiderrapante, coberturas. |
| 6060 | Vergalhões Barras Chatas Tubos Perfis | Alta resistência à corrosão. Média resistência mecânica. Boa conformabilidade. Apropriada para anodização decorativa fosca. | Perfis em geral, tubos de irrigação, móveis, iluminação e ornamentos |
| 6061 | Tubos Vergalhões Perfis | Alta resistência mecânica e à corrosão. Boa conformabilidade e soldabilidade. | Estruturas, construção naval, veículos, indústria moveleira, rebites. |
| 6063 | Vergalhões Barras Chatas Tubos Perfis | Alta resistência à corrosão. Média resistência mecânica. Boa conformabilidade. Apropriada para anodização decorativa fosca. | Perfis em geral, tubos de irrigação, móveis, iluminação e ornamentos. |
| 6101 | Vergalhões Barras Tubos Perfis | Alta condutividade elétrica. Boa resistência à corrosão. Média resistência mecânica. | Condutores e barramentos elétricos. |
| 6261 | Vergalhões Tubos Perfis | Boa resistência mecânica. Boa resistência à corrosão. Boa conformabilidade. | Carrocerias de veículos, estruturas e equipamentos. |
| 6262 | Vergalhões | Ótima usinabilidade. Alta resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. Apropriada para anodização decorativa. | Peças usinadas em torno automático. |
| 6351 | Vergalhões Tubos Perfis | Alta resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. | Engenharia estrutural, construção de navios, veículos e equipamentos. |

2.2.2 Propriedades mecânicas do alumínio e suas ligas

- Limite de resistência a tração: é a máxima tensão que o material resiste antes de ocorrer a ruptura.

- Limite de escoamento: é a tensão em que o material começa a se deformar plasticamente e que para o alumínio é de 0,2% do comprimento original, medido em um corpo de prova normal.

- O limite de escoamento do alumínio puro recozido é aproximadamente 12,7Mpa.

- Alongamento: o alongamento é expresso por % relativamente ao comprimento original medido em corpo-de-prova normal e é calculado através da diferença de comprimentos. Medido entre as partes de referência, antes e após o ensaio de tração.

O alongamento é a indicação da ductilidade.

- Dureza: a dureza de um metal é definida como a medida de sua resistência à penetração. Existem vários métodos de se determinar a dureza, sendo os mais comuns: Brinell, Vickers e Rockwell.

2.2.3 Soldabilidade do alumínio e suas ligas

A condutividade térmica exerce uma grande influência na soldabilidade do alumínio e suas ligas, pois ela é quase cinco vezes maior no alumínio do que no aço, ou seja, o alumínio necessita de um fornecimento de calor cerca de cinco vezes maior do que o necessário para o aço, para uma mesma massa elevar sua temperatura localmente. Na prática, isso significa o uso de uma fonte de calor com maior intensidade para que a soldagem seja bem-sucedida.

As propriedades da estrutura bruta de solidificação do cordão de solda são influenciadas pela composição química e pela taxa de solidificação. Um aumento na taxa de solidificação contribui para a obtenção de melhores propriedades mecânicas devido à formação de uma microestrutura mais fina. Ainda, a taxa de solidificação será tanto maior quanto menor for o aporte térmico – este último é influenciado pela velocidade de soldagem, de modo que velocidades maiores diminuem o aporte térmico cedido à solda e o tamanho dos cordões.

2.2.4 Liga de alumínio 5052

O alumínio 5052 também é conhecido como um material naval, devido à utilização em grande escala nesse setor. No entanto não é apenas a indústria marítima que se beneficia com a matéria-prima, as propriedades desta liga também são aproveitadas por outras áreas.

2.2.4.1 Propriedades da liga de alumínio 5052

O alumínio 5052 é uma liga composta por 96 a 99% de alumínio, além de concentrações menores de outros metais, como magnésio, ferro, cobre, manganês, cromo e zinco. O mercado de alumínio oferece opções em forma de placas, tubos, chapas, bobinas, perfis e mais.

Uma das características mais marcantes do alumínio 5052 é a resistência à corrosão, ou seja, o material suporta ação de agentes oxidantes como a água ou ar. Por outro lado, a liga conta com baixa resistência mecânica e boa ductilidade.

Essa última propriedade faz com que o alumínio 5052 seja uma peça com excelente conformabilidade. Desta forma, o material oferece facilidade de atingir diferentes formatos, sem romper.

Além disso, o metal conta com boa soldabilidade, permitindo o processo de união com outras ligas sem perder as características físicas como dureza, alongamento e limite de resistência.

2.2.4.2 Aplicações da liga de alumínio 5052

A aplicação mais clássica é, sem dúvida, na indústria naval. Com tantas propriedades favoráveis, também é útil para aplicações em: estamparias, placas de sinalização, carrocerias de ônibus, quadros de bicicleta e de motos, tanques de gasolina, pisos antiderrapantes, entre outros.

2.2.5 Propriedades da liga de alumínio 1100

O alumínio 1100 é utilizado em funções que não exigem alta resistência mecânica.

Alta resistência à corrosão, baixa resistência mecânica, elevada condutividade térmica e elétrica, fácil conformação mecânica e boa soldabilidade.

- Composição

| | |
|--------|--------------|
| Cu | 0,05 – 0,20% |
| Mn | 0,05% |
| Al | 99,00% |
| Si+Fe | 0,95% |
| Outros | 0,05 – 0,15% |
| Zn | 0,10% |

- Propriedades físicas

| | |
|--------------------------|----------------------------|
| Condutibilidade elétrica | 56% I.A.C.S |
| Condutibilidade térmica | 0,52 – 0,56 cal/cms °C |
| Densidade | 2,71 g/cm ³ |
| Expansão térmica | 24x10 ⁻⁶ x 1/°C |
| Modulo de elasticidade | 64000 – 69000Mpa |
| Ponto de fusão | 658°C |

- Propriedades mecânicas

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Limite de resistência | 90 – 142 Mpa |
| Limite de escoamento | 90 – 115 Mpa |
| Alongamento | 3 – 9% |
| Dureza | 32 Brinell |
| Têmpera | ½ D (meio da Dureza) |

2.2.5.1 Aplicações da liga de alumínio 1100

Fabricação de luminárias, tanques e cubas não estruturais nas indústrias químicas e alimentícias, produtos impactados (tubos, bisnagas e aerossol), painéis decorativos, utensílios domésticos, peças estampadas etc.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Através das pesquisas, análises e experimentos efetuados no chão de fábrica, os resultados obtidos nos corpos de prova foram todos por meio de ensaio visual, lixamento e polimento das superfícies que eram de interesse da inspeção visual.

Constatou-se que com uma pequena mudança na inclinação da junta soldada houve melhora na redução de poros. Como a chapa era de 4mm de espessura, o soldador estava utilizando uma corrente de soldagem de 205 ampéres que é elevada para a espessura de 4 mm. A corrente foi reduzida para 190 ampéres, houve progresso, mesmo assim o número de passes que eram realizados, também estavam contribuindo no surgimento da porosidade, nesse momento o corpo de prova era da liga 5052.

Na EPS fornecida pela empresa, não constatava nenhum procedimento, ou sequer conhecimento da soldabilidade do alumínio e suas ligas, nenhum soldador qualificado para tal. As observações continuaram na mesma liga 5052. Por falta dessa matéria prima e alta demanda na produção, essa liga foi substituída pela liga 1100 que possui boa resistência mecânica e boa ductilidade, melhorando assim o processo de estampagem. O processo de soldagem continuou o mesmo TIG, a geometria do cordão de solda era a mesma, ou seja, o mesmo processo e procedimentos. Mudança na posição de soldagem e diminuição na corrente de soldagem e redução no número de passes, foi sendo aprimorados gradativamente, e logo após alguns anos de estudos, concluiu-se que a posição de soldagem era um dos fatores que leva ao aparecimento da porosidade na soldagem de ambas as ligas. Em consonância com o número de passes realizado durante esses processos, parâmetros foram alterados de 190 ampéres para 180 ampéres, a posição passou de 1G plana para 3G vertical, o ângulo de ataque também sofreu mudanças de 15° para 75° em relação à superfície a ser soldada. Logo após essas alterações foram realizados testes de raio- X que comprovaram a eficiência da junta soldada e a eliminação dos poros na solda de ambas as ligas.

Figura 12: Corpo de prova posicionado para teste de raio x



Fonte: Autores

Figura 13: Parâmetros de teste de raio x



Fonte: Autores

Figura14: Parâmetros de teste de raio x



Fonte: Autores

Figura 15: Parâmetros de teste de raio x



Fonte: Autores

Foram feitos vários testes de raio x aumentando gradativamente a tensão do aparelho (o que modificou a aceleração dos elétrons. Quanto maior a tensão, maior a penetração da radiação). Também foram utilizadas duas intensidades de correntes 3,0 e 3,5 mA. A intensidade de corrente é responsável pela quantidade de radiação.

Figura 16: Modelo do aparelho de raio x utilizado



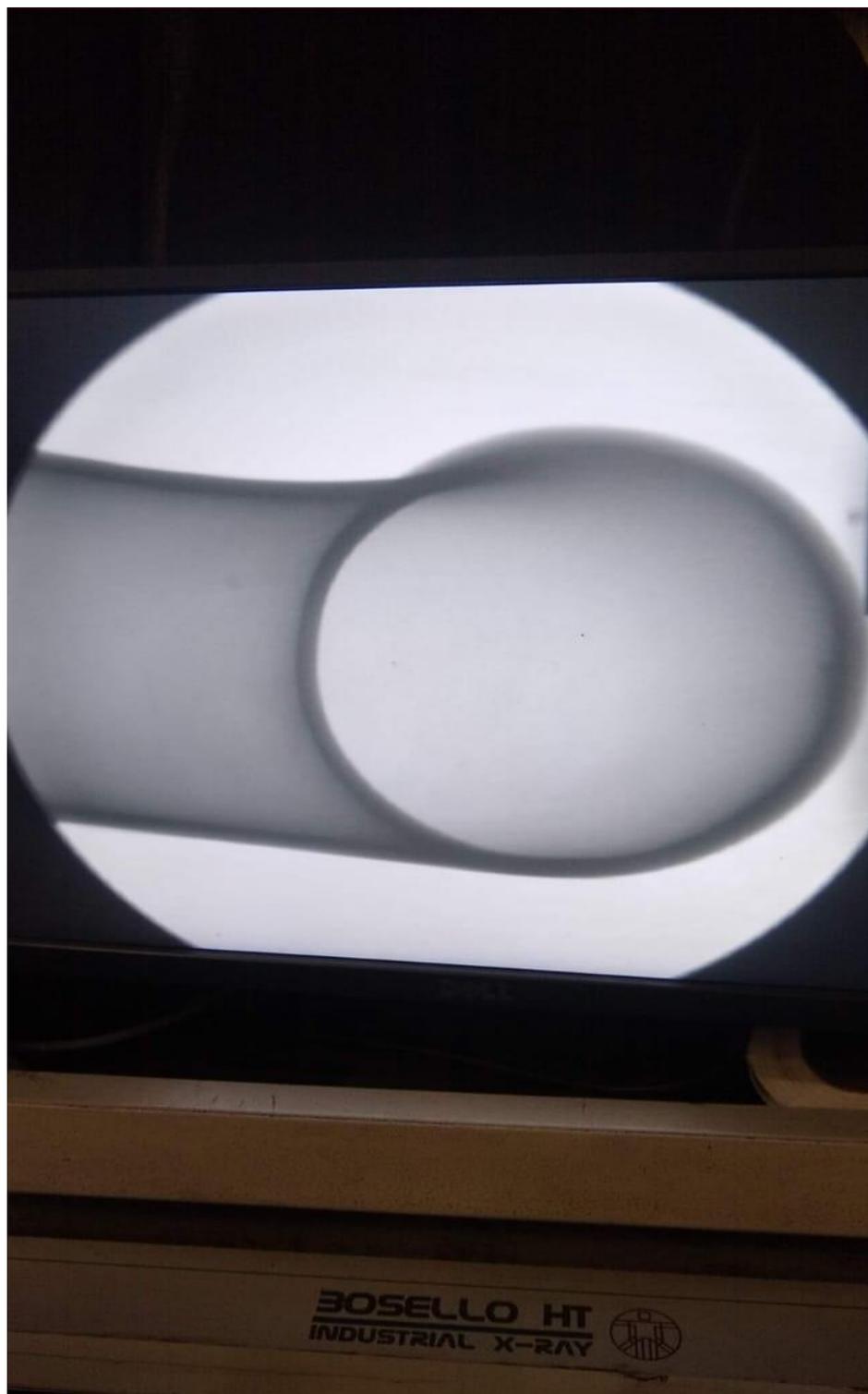
Fonte: Autores

Figura 17: Imagem da peça após carga de 100 kV. Verificou-se que não há poros.



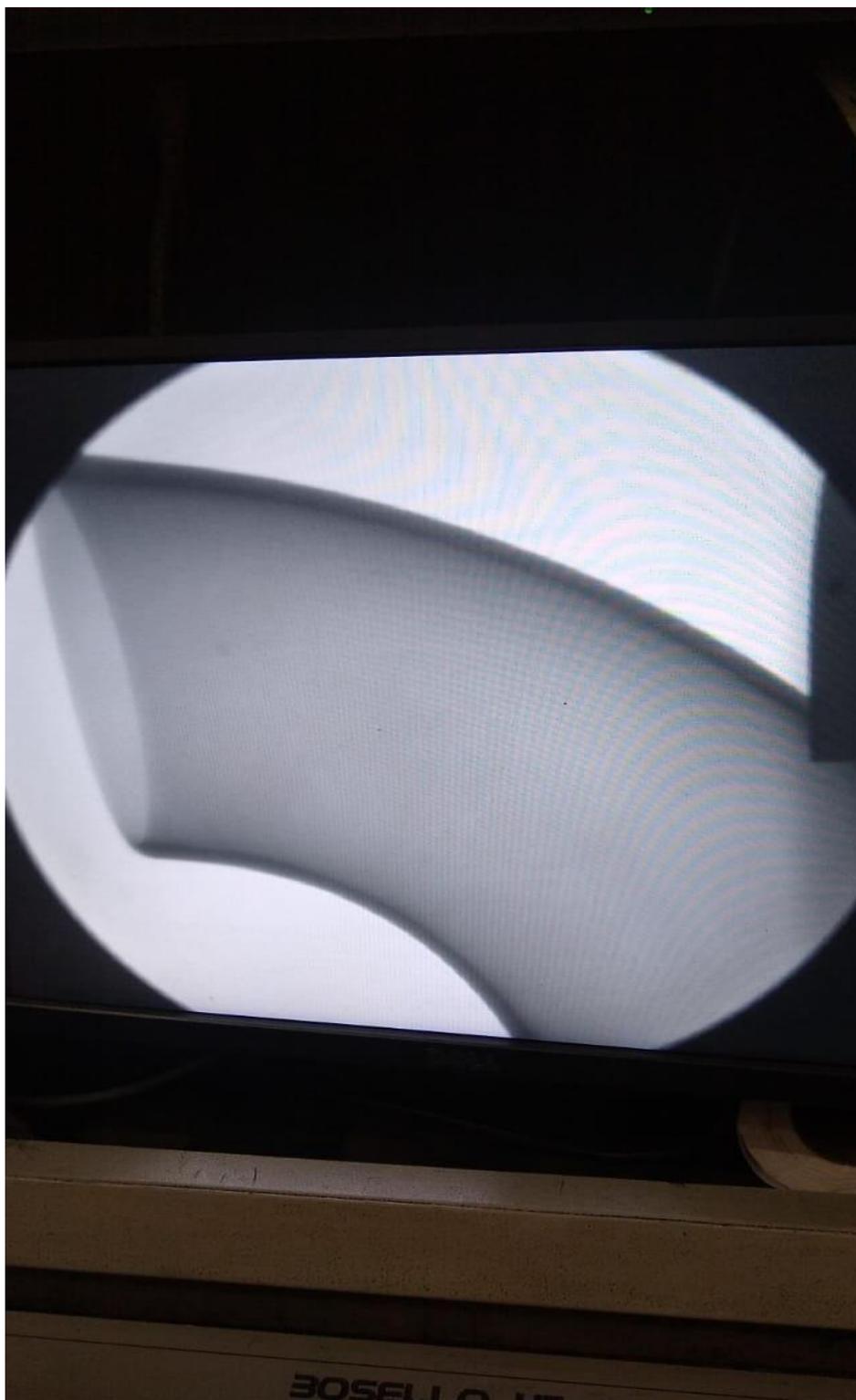
Fonte: Autores

Figura 18: Imagem da peça após carga de 100Kv. Verificou-se que não há poros.



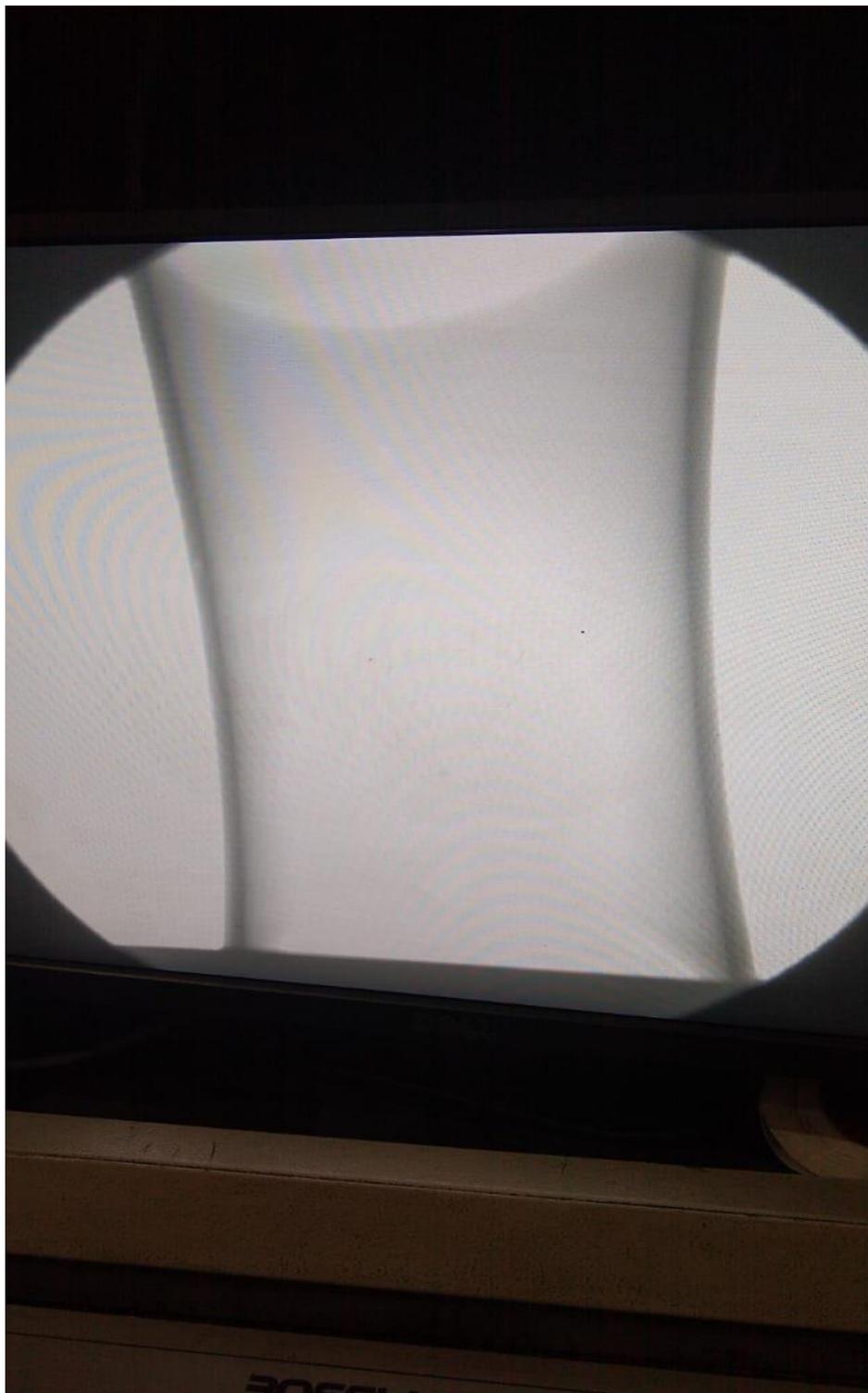
Fonte: Autores

Figura 19: Imagem da peça após carga de 100 kV. Verificou-se que não há poros.



Fonte: Autores

Figura 20: Imagem da peça após carga de 100 kV. Verificou-se que não há poros.



Fonte: Autores

Figura 21: Qualidade das peças soldadas.



Fonte: Autores

Figura 22: Qualidade das peças soldadas.



Fonte: Autores

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A soldagem é um dos processos de união de peça mais utilizado no mundo.

Com ele, pode-se unir permanentemente as mais variadas gamas de materiais, principalmente os metais.

Um dos metais que podem ser soldados é o alumínio.

Acontece que, durante o processo, podem ocorrer descontinuidades, que colocam em risco a integridade das peças.

Uma dessas descontinuidades é a formação de poros nos cordões da solda de alumínio.

Este trabalho tratou de analisar este problema e mostrou as soluções encontradas. A melhor delas, e que eliminou definitivamente a porosidade nos cordões, foi a mudança do ângulo de ataque da tocha de 15° para 75° .

REFERÊNCIAS

DBC Oxigênio - Catálogo de gases - <https://www.oxigenio.com> – 01/2024

Ferrari, Marcelo - Porosidade na solda de alumínio – <https://www.linkedin.com/in/marcelo-ferrari> -2020

Cronologia da soldagem – Vários autores – Editora Senai SP - 2013

Alcan Alumínio do Brasil – <https://www.revistadoaluminio.com.br> -1993