

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS LAGES  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNA MOREIRA SKONIECZNY**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM  
NO PROCESSO TIG**

**LAGES, 2023.**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS LAGES  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNA MOREIRA SKONIECZNY**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM  
NO PROCESSO TIG**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador:

Prof. Rafael Gustavo Schreiber, Doutor em Engenharia.

**LAGES, 2023**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM NO  
PROCESSO TIG**

**BRUNA MOREIRA SKONIECZNY**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Engenharia Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Lages, 13 de dezembro, 2023.

Banca Examinadora:

---

Prof. Rafael Gustavo Schreiber, Dr.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina

---

Profa. Natália Madalena Boelter, MSc.

Avaliadora

Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Ricardo Teran Muhl, MSc.

Avaliador

Instituto Federal de Santa Catarina

Esse trabalho é dedicado aos meus queridos pais,  
e ao meu namorado.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me concedido a vida e todas as oportunidades as quais pude desfrutar.

Aos meus colegas de classe, pelo convívio, cooperação, e amizades adquiridas nesses anos de curso.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Lages, por fornecer de excelente infraestrutura e ensino que fazem com que eu possa completar minha graduação.

Aos meus colegas Alysson Henrique Rudek e Bianca Grahl Reyes, e aos meus professores Diego Augusto Gonzaga, Matheus Fontanelle Pereira e Rafael Gustavo Schreiber que auxiliaram na execução do presente trabalho.

E a todos os demais que não foram citados, mas se fizeram presente durante este ano.

## RESUMO

A soldagem TIG, vem se mostrando cada vez mais presente dentro das indústrias, tanto de forma manual, bem como mecanizada. Indústrias como aeroespacial, aeronáutica e nucleares, onde utiliza-se peças finas ou de precisão, buscam a aplicação da solda TIG em seus processos, visando maior qualidade e a praticidade que a TIG oferece. Porém, para atingir a melhor qualidade possível neste processo, é necessário atentar-se à parâmetros que podem interferir no mesmo, sendo corrente, distância eletrodo peça e velocidade de soldagem. Portanto, o presente trabalho visa buscar qual a real interferência da velocidade neste processo, com a realização de ensaios incluindo um braço robótico para auxiliar na precisão dos demais parâmetros a serem aplicados, bem como na variação da velocidade. Para a real demonstração da qualidade das soldagens, foram realizadas análises metalográficas para que fosse possível observar quais foram as reações com a variação da velocidade. Sendo obtido o valor mais adequado da velocidade de 2,5 mm /s.

**Palavras-chave:** Velocidade de soldagem. TIG. Alumínio.

## **ABSTRACT**

TIG welding is becoming increasingly present in industries, both manually and mechanized. Industries such as aerospace, aeronautics and nuclear, where thin or precision parts are used, seek to apply TIG welding in their processes, aiming for the practicality it offers and its higher quality. However, in order to achieve the best possible outcome in this process, it is necessary to pay attention to the parameters that can interfere with it, such as current, electrode-to-part distance and welding speed. Therefore, this study aims to determine what is the real interference of speed in this process, by performing tests using a robotic arm to help with the accuracy of the other parameters to be applied, as well as varying the speed. In order to really demonstrate the quality of the welds, metallographic analyses had been conducted so that it was possible to see what the reactions were with the speed variation. The most suitable speed was 2.5 mm /s.

**Keywords:** Welding speed. TIG. Aluminium.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos da soldagem TIG .....	13
Figura 2 - Efeito da corrente de soldagem na velocidade limite para ocorrência de descontinuidades .....	14
Figura 3 – Novo modelo de coletor solar .....	17
Figura 4 – Componentes de uma estação de soldagem TIG.....	18
Figura 5 – Tocha para soldagem TIG (a) montada e (b) desmontada .....	18
Figura 6 – Cotas do dispositivo de fixação .....	24
Figura 7 – Dispositivo de dobramento fabricado .....	25
Figura 8 – Resultado dos testes preliminares .....	26
Figura 9 – Posicionamento da tocha (a)Tocha posicionada à 60° (b)Dispositivo de fixação .....	27
Figura 10 – Parâmetros ajustados na fonte de soldagem.....	28
Figura 11 – Captação de imagens digitais .....	29
Figura 12 – Cordão de solda com $v = 2,5$ mm/s.....	30
Figura 13 – Cordão de solda com $v = 5$ mm/s.....	30
Figura 14 – Cordão de solda com $v = 7,5$ mm/s.....	30
Figura 15 – Resultados do ensaio de dobramento .....	31
Figura 16 – Zona fundida com $v = 2,5$ mm/s .....	32
Figura 17 – Zona fundida com $v = 5$ mm/s .....	33
Figura 18 – Zona fundida com $v = 7,5$ mm/s .....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos gases para soldagem nos aços.....	20
Tabela 2 – Composição química dos eletrodos em % .....	20
Tabela 3 – Ângulo do eletrodo, de acordo com a energia e o diâmetro .....	21
Tabela 4 – Relação largura do cordão x velocidade.....	31
Tabela 5 – Relação zona fundida x velocidade .....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celcius
A	Ampere
Al	Alumínio
ANSI	American National Standards Institute
AWS	American Welding Society
CA	Corrente alternada
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
mm	Milímetros
mm/s	Milímetros por segundo
Mn	Manganês
NaOH	Hidróxido de sódio
O	Oxigênio
PWM	Pulse Width Modulation
s	Segundos
S	Enxofre
Se	Selênio
Si	Silício
Th	Tório
Ti	Titânio
TIG	Tungsten Inert Gas
v	Velocidade
W	Tungstênio
Zr	Zircônio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3</b>	<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>SOLDAGEM TIG .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>SOLDAGEM TIG AUTOMATIZADA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM TIG .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>GASES DE PROTEÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>ELETRODO DE TUNGSTÊNIO .....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>MATERIAIS .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>FABRICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>TESTES PRELIMINARES .....</b>	<b>25</b>
<b>3.5</b>	<b>SOLDAGEM COM BRAÇO ROBÓTICO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.6</b>	<b>ANÁLISE METALOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>MELHORIAS FUTURAS .....</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>37</b>
	<b>APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO BRAÇO ROBÓTICO .....</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gás) está sempre presente em alguma peça e/ou componente do nosso cotidiano e saber como utilizá-lo traz inúmeros benefícios, pois a soldagem ideal para determinada aplicação é o caminho para gerar uma peça com qualidade (DE SOUZA; NUNES; PAGANINI, 2020).

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a unir. Uma característica importante deste processo é o excelente controle da energia transferida para a peça, tornando o processo bastante adequado para a soldagem de peças de pequena espessura (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2016).

Este processo apresenta cordões de solda de alta qualidade, sem escórias, sem respingos e pode ser soldado em todos os tipos de juntas (DOS SANTOS, 2015). E assim como o nível de corrente, a velocidade de soldagem tem papel fundamental na formação do cordão de solda (JORGE, 2016).

Entre as principais aplicações da soldagem TIG estão a soldagem em alumínio, magnésio e titânio, particularmente de peças leves ou de precisão como as utilizadas na indústria aeroespacial (LACOSTE, 2017).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Alguns parâmetros podem ser modificados no processo TIG na tentativa de amenizar a susceptibilidade para formação de instabilidades que levam a má formação do cordão de solda. Dentre eles, a proteção gasosa, que modifica de maneira acentuada as características do arco, influenciando também a velocidade limite para aparecimento dos defeitos (SAVAGE; NIPPES; AGUSA, 1979).

Este projeto visa realizar experimentos de soldagem TIG automatizada com auxílio de um braço robótico na junção de chapas de alumínio sobrepostas. Atendendo a este desafio, pretende-se estabelecer um ponto de referência a fim de aplicar sua utilização em indústrias de diversos segmentos.

A soldagem TIG é largamente utilizada para união de juntas que não podem conter vácuos ou impurezas, sendo muito utilizada nas indústrias nucleares, químicas e de alimentos (SILVEIRA, 2018), bem como na aeroespacial (DEMARQUE, 2018).

## 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema a ser apresentado a seguir, envolve diretamente a dificuldade que se enfrenta ao trabalhar com chapas de alumínio de baixa espessura, bem como a aplicação da soldagem autógena para realização da soldagem de chapas sobrepostas. Essa pesquisa foi realizada através da análise da variação da velocidade de soldagem, tendo como condição inicial uma velocidade pré-estabelecida por estudos já realizados. Posteriormente foram realizadas análises metalográfica e de dobramento, afim de avaliar a qualidade das chapas soldadas.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da velocidade de soldagem na qualidade de juntas sobrepostas de alumínio AA1200-H14 de 0,8 mm de espessura, soldadas pelo processo TIG com braço robótico.

## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Programar o braço robótico para execução dos experimentos;
2. Realizar a soldagem das juntas com diferentes velocidades de avanço;
3. Realizar ensaio de dobramento em amostras soldadas em cada velocidade;
4. Realizar análise metalográfica em todas as amostras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, serão evidenciados estudos já realizados na área de soldagem, com ênfase no processo tipo TIG, os quais foram essenciais para o desenvolvimento do experimento, bem como na escolha de materiais e métodos.

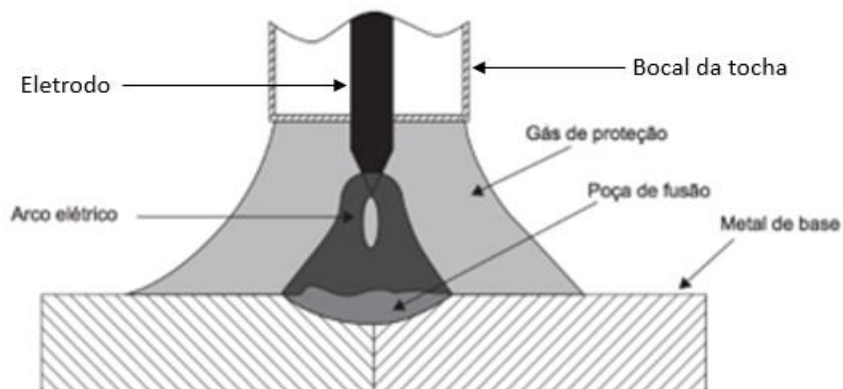
### 2.1 SOLDAGEM TIG

Em meio à diversos processos de fabricação, ao surgir a necessidade de projetos de união entre peças, podemos rapidamente associar o processo de soldagem para realização da mesma. O conceito da soldagem fala sucintamente sobre ser um processo de união, porém atualmente também utiliza-se para a recuperação de peças, bem como formação de um revestimento com características especiais (MARQUES, 2016).

Podem, portanto, ser realizadas a união de diversos materiais com a utilização de processos de soldagem. Dentre os mais comumente utilizados encontram-se: aço inox, aço carbono, alumínio e cobre.

Durante o processo de soldagem TIG, algumas etapas e processos são necessários para que se forme o cordão de solda. Deseja - se inicialmente obter a poça de fusão, que é formada através do depósito de calor, gerado por uma tocha, sobre o metal de base como ilustra a Figura 1, e em alguns casos com o depósito de metal de adição.

Figura 1 – Elementos da soldagem TIG



Fonte: Adaptado de Dos Santos, 2015

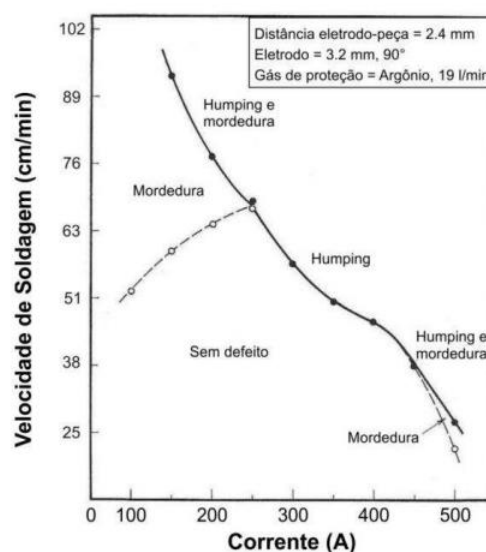
O arco de soldagem é formado quando uma corrente elétrica passa entre uma barra de metal (tungstênio), que é o eletrodo não consumível, e que pode corresponder ao polo negativo (cátodo), e o metal de base, que pode corresponder ao polo positivo (ânodo) (DOS SANTOS,2015).

O metal de base trata - se do material à qual desejamos obter a solda. Enquanto o metal de adição é um material adicionado ao processo, quando há necessidade, devendo ser compatível às características do metal de base. Para a especificação do metal adicionado é aconselhável buscar informações em órgãos como o AWS (Associação Americana de Soldagem).

Para que ocorra a proteção da poça contra o ar atmosférico, é utilizada uma mistura de gases, ou até mesmo uma coluna de gás inerte. Para cada tipo de material há uma variação de gás de proteção a ser aplicado no processo.

De acordo com (SAVAGE; NIPPES; AGUSA, 1979) para que se obtenha uma boa eficiência na fusão, é necessário um valor de corrente alto, porém como ilustra a Figura 2, o aumento da corrente interfere na velocidade, sendo necessário diminuir a velocidade para soldar com qualidade. Analisando o gráfico, observamos que o aumento da velocidade pode ser responsável por criar defeitos sobre a solda, como *humping* e mordeduras, que caracterizam cordões de solda descontínuos.

Figura 2 - Efeito da corrente de soldagem na velocidade limite para ocorrência de descontinuidades



Fonte: (Savage; Nippes; Agusa, 1979)

De acordo com a AWS (American Welding Society), há outros defeitos que podem aparecer em um processo de soldagem mal executado, sendo eles:

- Porosidade da superfície: quando há falta de gás, resultando em pequenas cavidades;
- Mordedura: ocorre quando grande quantidade de metal de base é absorvido pela região de solda, resultando em descontinuidade superficial;
- Falta de penetração: causada por parâmetro incorretos, neste caso a solda não se prolonga através da totalidade da junta soldada;
- Humping: é uma falha no depósito de solda fundida para preencher completamente um sulco definido pelo limite de fusão, gerada pela entrada de calor do arco.

Para que se possa calcular a velocidade a ser aplicada na soldagem, deve – se determinar o tamanho do cordão e o tempo de solda.(SERAFIM, 2016), como mostrado na Equação 1.

$$v = \frac{e}{t} \quad (1)$$

Onde:

- $v =$  Velocidade (mm/s);  
 $e =$  Comprimento do cordão (mm);  
 $t =$  Tempo (s).

Bem como, o resultado do processo de soldadura está relacionado com a entrega térmica, que é definida como sendo a quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear. Sendo a velocidade de avanço um dos parâmetros que interfere diretamente no valor da entrega térmica.

Quanto maior for a entrega térmica, maior será a quantidade de calor transferida para a peça de trabalho, maior será o banho de fusão, mais extensa a zona termicamente afetada (COITO, 2016).

Quando se trata da soldagem entre chapas sobrepostas, é necessário observar os parâmetros que não ficam sob controle e deverão ser estudadas suas faixas de tolerância a fim de não comprometer o desempenho da soldagem, são elas: folga entre as chapas, distância eletrodo peça e velocidade de soldagem.

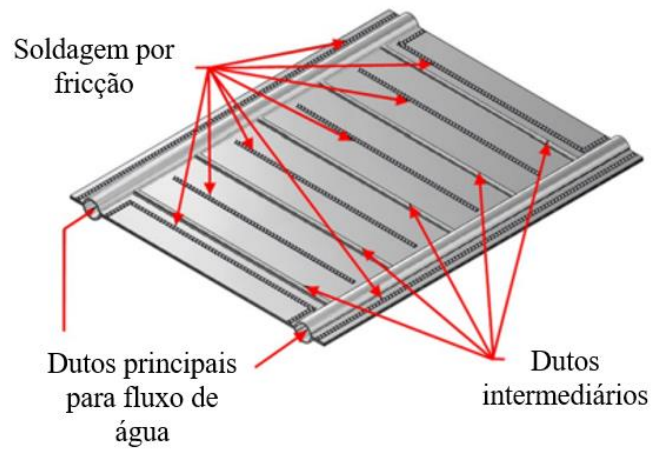
Além de que, há certa influência da composição do metal base, o uso do processo TIG autógeno pode sofrer alterações entre profundidade e largura do cordão de acordo com os teores dos elementos, como Al, Se, Ti, Mn, Si, e principalmente S e O, no metal base (MARQUES, 2016).

O processo TIG é considerado tradicionalmente um processo aplicado com baixa velocidade de soldagem, e também por isso, classificado popularmente como um processo de baixa produtividade. Essa classificação ocorre também devido aos problemas encontrados quando se busca utilizar o processo TIG de forma autógena com velocidade de soldagem elevada, pois, dessa forma, é necessário que a corrente de soldagem também seja elevada para manter o cordão com tamanho satisfatório.

Nesse tipo de procedimento, também é possível realizar a soldagem autógena, ou seja, sem material de adição, nesse caso não existirá fluxo de massa entrando na poça de fusão, sendo uma propriedade importante para soldagem em peças de espessuras finas (VIEIRA; FRAGA, 2022).

Além da sua aplicação na indústria aeroespacial, nuclear, química e de alimentos, avalia-se também a sua aplicação para a fabricação de painéis solares, substituindo a soldagem por fricção. Os painéis solares são normalmente constituídos por tubos de cobre soldados por placas absorventes de calor montadas sobre eles (VEGA & RINCON, 2020). Porém em estudo recente (SCHREIBER, 2021), é apresentada uma nova alternativa para a fabricação de placas absorventes solares a partir de duas chapas de alumínio soldadas, criando um duto para permitir a passagem de água conforme Figura 3.

Figura 3 – Novo modelo de coletor solar



Fonte: Schreiber, 2021

## 2.2 SOLDAGEM TIG AUTOMATIZADA

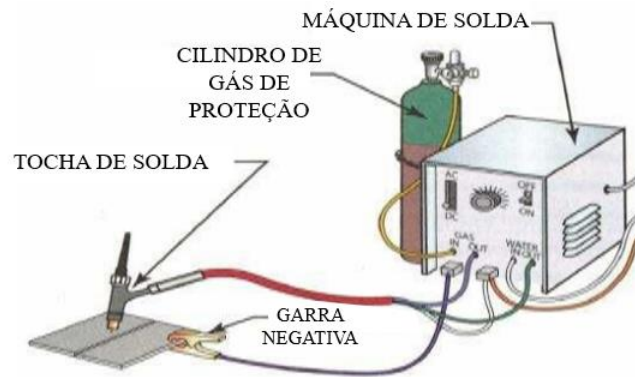
O experimento a ser realizado, visa a melhor qualidade da solda frente à automatização da mesma. De acordo com (FERNANDES DA ROSA, 2019), os processos de soldagem quando operados de forma mecanizada, e quando bem aplicados, além de proporcionarem uma produtividade muito maior considerando o tempo de arco aberto tendem a apresentar maior repetibilidade das características da solda.

A indústria vem buscando métodos alternativos para execução de soldagens, bem como a mecanização (CHOWDARY, MAHARAJ e LEWIS, 2010). Entretanto, a automatização desse procedimento vem sendo considerada como uma opção para reduzir as condições insalubres de trabalho (FERNANDES DA ROSA, 2019).

## 2.3 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM TIG

Existem quatro componentes principais que compõem uma estação de soldagem TIG: fonte, tocha, pinça e garrafa de gás de proteção (HAILE, 2015), como ilustra a Figura 4.

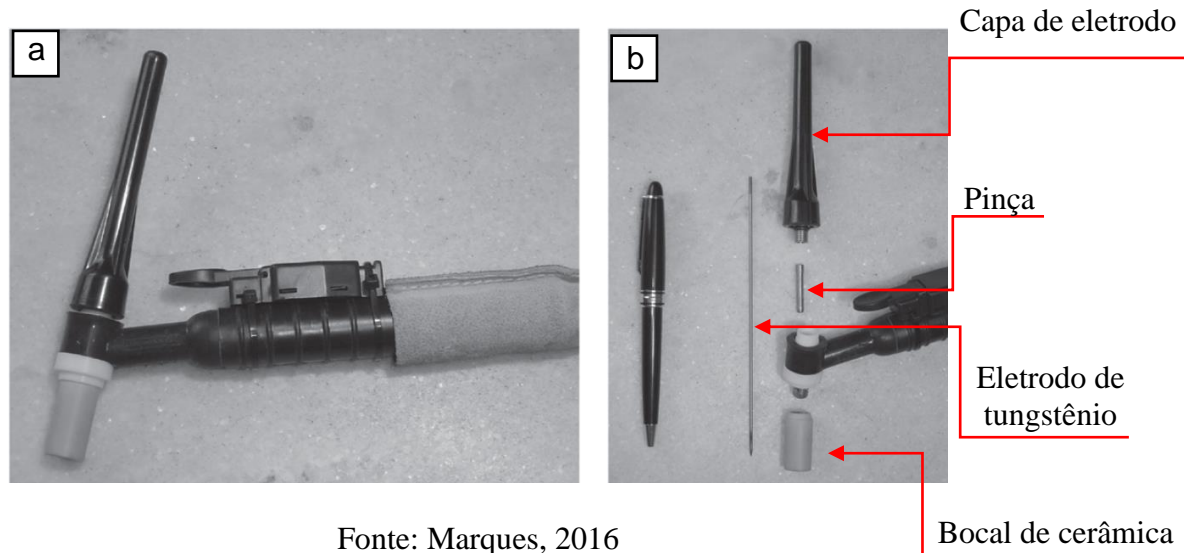
Figura 4 – Componentes de uma estação de soldagem TIG



Fonte: Haile, 2015

As tochas TIG possuem internamente uma pinça (Figura 5), que serve para segurar o eletrodo de tungstênio e fazer contato elétrico e que deve ter um tamanho adequado para cada diâmetro de eletrodo. Elas possuem ainda bocais para direcionamento do fluxo de gás, que podem ser cerâmicos ou metálicos e são fornecidos em diversos diâmetros. O diâmetro do eletrodo e do bocal devem ser escolhidos em função da espessura da peça a ser soldada e da corrente de soldagem a ser usada (MARQUES, 2016).

Figura 5 – Tocha para soldagem TIG (a) montada e (b) desmontada



Fonte: Marques, 2016

No painel de controle da máquina de soldagem há alguns parâmetros que devem ser ajustados afim de obter-se a melhor qualidade do cordão de solda, sendo estes:

- Tempo de rampa de subida: A corrente irá subir, partindo de um valor baixo até o valor ajustado, no tempo 0 a 1 segundo. Utilizado para evitar danificar a peça no início da soldagem;
- Corrente de pico: Ajusta a corrente de soldagem;
- Tempo da rampa de descida: Ajusta o tempo em que a corrente irá reduzir após finalizada a soldagem, no tempo de 0 a 10 segundos;
- Controle do balanço da onda AC: Quando a corrente vai do eletrodo para a peça, a peça está sendo aquecida, com baixa remoção dos óxidos e eletrodo de Tungstênio recebendo um menor aquecimento. Quando temos a corrente indo da peça para o eletrodo, obtemos uma maior limpeza da peça, mas também um maior aquecimento do eletrodo de Tungstênio;
- Controle de pós vazão de gás: Este potenciômetro ajusta o tempo em que o gás sairá após o término da soldagem de 0 a 10 segundos, para evitar que a peça oxide com o calor (Manual MaxxiTIG 300P AC-DC (380V)).

Além destes, inúmeros dispositivos podem ajudar na utilização do processo manual ou mecanizado, para fazer que o controle da soldagem seja mais eficiente e gerando mais produtividade, e também para simplificar a operação (WAINER, 1992).

## 2.4 GASES DE PROTEÇÃO

Durante o processo TIG são utilizados gases de proteção a fim de garantir que não exista a contaminação do cordão de solda. Os gases de proteção utilizados no processo de soldagem TIG são o argônio e o hélio, ou a mistura deles, mas a concentração de pureza de ambas as situações precisa ser de 99,99%. A utilização de cada um deles vai variar para cada tipo de material a ser soldado e as características aplicadas de cada uma das juntas (DOS SANTOS, 2015).

Quando se deseja realizar a soldagem de chapas finas, torna-se ideal a utilização de argônio por ele ser um gás de baixa tensão e baixa penetração. Como esse gás tem um arco mais estável, é ideal para soldagem manual. Além do mais, o argônio tem um custo menor em relação aos outros gases.

Já para soldagem de peças mais grossas, torna-se ideal a utilização do hélio pois o mesmo é capaz de realizar uma maior penetração na peça. Utilizar o hélio exige uma melhor análise do projeto, pois ele tem um maior custo em relação ao argônio.

A Tabela 1, ilustra qual gás de proteção é o mais adequado para cada tipo de material a ser soldado.

Tabela 1 – Características dos gases para soldagem nos aços

Metais e suas ligas	Gás de proteção e suas polaridades	Característica
Aços de baixa liga	Argônio – CCPD (-)	Soldagem manual
	Hélio – CCPD (-)	Soldagem automática
Aços inoxidáveis	Argônio – CCPD (-)	Arco estável e de fácil controle
	Hélio – CCPD (-)	Grande penetração e razoável estabilidade do arco elétrico

Fonte: Dos Santos, 2015.

## 2.5 ELETRODO DE TUNGSTÊNIO

O eletrodo de tungstênio é o eletrodo utilizado no processo de solda TIG, sendo um eletrodo não consumível, ele tem um maior ponto de fusão, bem como maior capacidade de emissão de elétrons. A partir da espessura do material a ser soldado, define-se a faixa de corrente que será aplicada ao eletrodo (DOS SANTOS, 2015).

Apesar de não consumível, o eletrodo de tungstênio trabalha sob altas temperaturas, e pode acabar se deteriorando. Há diversos tipos de eletrodos disponíveis no mercado, podendo ser de tungstênio puro, ou composto por mais de um elemento químico, como ilustra a Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química dos eletrodos em %

Classificação AWS	Composição química %			
	Tungstênio	Tório	Zircônio	Outros (MÁX)
EWP	99,5			0,5
EWTh-1	98,5	0,8-1,2		0,5
EWTh-2	97,5	1,7-2,2		0,5
EWTh-3	98,95	0,35-0,55		0,5
EWZr	99,2		0,15-0,40	0,5

Fonte: Dos Santos, 2015

A classificação dos eletrodos, se dá através da cor de sua ponta, sendo:

- EWP: Eletrodo de ponta verde;
- EWTh-1: Eletrodo de ponta amarela;
- EWTh-2: Eletrodo de ponta vermelha;
- EWZr: Eletrodo de ponta marrom ou branca, dependendo da porcentagem de zircônio presente;

Além de que, a escolha do ângulo do eletrodo em relação às chapas soldadas, depende diretamente da escolha de seu diâmetro e da corrente que será utilizada. Para isso, podemos avaliar esse parâmetro na Tabela 3.

Tabela 3 – Ângulo do eletrodo, de acordo com a energia e o diâmetro

Intensidade da corrente de soldagem (A)	Diâmetro do eletrodo (mm)	Ângulo (graus)
<20	1,0	30
20 – 100	1,6	30 – 60
100 – 200	2,4	60 – 90
200 – 300	3,2	90 – 120
300 – 400	3,2	120

Fonte : Dos Santos, 2015

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para fins de melhoria em processos de soldagem, o trabalho em questão tem por finalidade estabelecer um intervalo de valores de velocidade adequados em um processo de solda TIG. A organização desse intervalo visa uma melhor otimização de tempo durante o processo, e busca uma maior excelência da resistência da solda.

#### 3.1 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS

O trabalho foi conduzido em três etapas, dividindo-se em projeto, execução e análise de resultados. Inicialmente foi projetado o dispositivo de fixação das chapas que auxiliou durante o processo de soldagem TIG, bem como o dispositivo de dobramento. O projeto de ambos dispositivos foram realizados em software *SolidWorks*, software que executa o desenho em modelagem 2D e 3D.

Simultaneamente a esta etapa, ocorreu o projeto da programação do braço robótico da marca ABB, modelo IRB 140, que é responsável por conduzir a tocha de soldagem TIG. Foram elaborados três programas, que percorreram a mesma trajetória, variando apenas a velocidade entre eles, variável à qual se deseja analisar. Juntamente à esta programação, foram adaptados demais parâmetros que fazem parte do processo de soldagem TIG, sendo estes: ângulo do eletrodo, distância entre eletrodo e peça, corrente, gás de proteção e tempo.

Após o projeto dos dispositivos, foi conduzido a fabricação dos mesmos, bem como ajustes finais nos parâmetros de soldagem, e testes referentes à programação do braço. Sendo assim, finalmente ocorreu o processo de soldagem das chapas sobrepostas diante das variações de velocidade, as chapas são de alumínio puro AA1200-H14 de 0,8mm cada. A soldagem foi realizada por meio de corrente alternada sem metal de adição, e após a execução das mesmas foram cortados corpos de prova correspondentes a cada velocidade executada.

Por fim, visando obter os resultados desejados, partiu-se para a última fase do projeto, onde foram analisadas a qualidade das chapas soldadas. Nessa fase, conduziu-se as análises dos corpos de prova, de maneira a serem avaliadas através de ensaios de dobramento e posteriormente sendo realizada uma análise metalográfica dos mesmos.

### 3.2 MATERIAIS

Para a execução do projeto apresentado, foram realizados estudos preliminares sobre quais materiais seriam necessários para atingir o objetivo da pesquisa. Portanto, baseando-se em processos de soldagem realizados anteriormente, e em objetivos específicos, foram selecionados os materiais para a realização do experimento.

Foi utilizada, portanto, uma fonte de soldagem a arco TIG AC/DC pulsado Maxxi TIG 300 P AC/DC (380 V) da marca Balmer. A fonte utilizada garante um rendimento de 85% e de economia de energia, além de permitir a estabilidade da corrente de saída através da aplicação da tecnologia PWM (*Pulse Width Modulation*).

Durante o processo de soldagem TIG, é imprescindível também a utilização de uma unidade de refrigeração que irá fornecer refrigeração à tocha através da circulação de água. Para este projeto, foi utilizada a unidade de refrigeração WK 330i/365i da marca BALMER.

Para um ajuste mais preciso das velocidades a serem empregadas, foi utilizado um Braço Robótico ABB IRB 140. Ele é programado usando a linguagem de programação RAPID, que é uma linguagem de programação própria desenvolvida pela ABB especificamente para programação de robôs industriais da marca (ROBOTICS, 2004).

Para programar o braço robótico IRB 140, pode-se utilizar o software RobotStudio, desenvolvido pela ABB, como também o próprio Flexpendant disponível juntamente ao braço. O RobotStudio oferece recursos avançados de simulação, programação offline e depuração. Com esse software, os usuários podem programar o IRB 140 usando a linguagem RAPID e testar as operações do robô em um ambiente virtual antes de implementá-las na produção real, ajudando a reduzir erros e otimizando o desempenho do robô, economizando tempo e recursos (ROBOTICS, 2023).

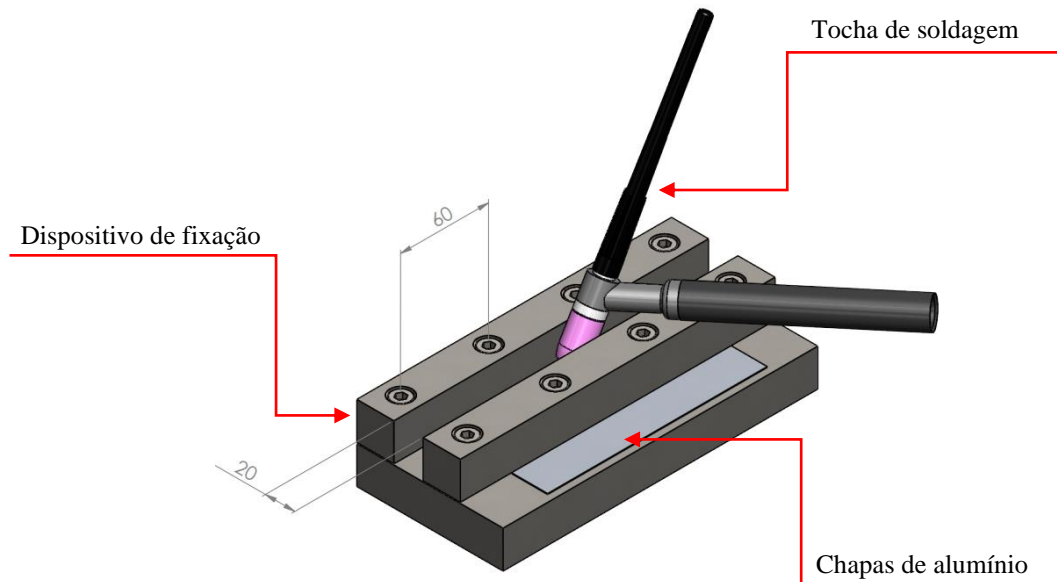
### 3.3 FABRICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

Dando início à construção de dispositivos auxiliares para o projeto, foi realizado a fabricação de um dispositivo auxiliar para fixação das chapas de alumínio a serem soldadas.

As dimensões do dispositivo foram calculadas com base no diâmetro da tocha, tamanho e espessura das chapas, bem como a necessidade das chapas serem fixadas o mais próximo possível uma da outra. Para isso adotou-se uma distância de 60mm entre os parafusos, fazendo com que a área de contato entre as chapas seja a maior possível.

Outro aspecto a avaliar antes da fabricação foi o diâmetro da tocha, portanto foi dimensionado em 20 mm de largura o caminho a ser percorrido pela tocha, sendo possível deixar uma folga entre a mesma e as paredes do dispositivo, como ilustra a Figura 6.

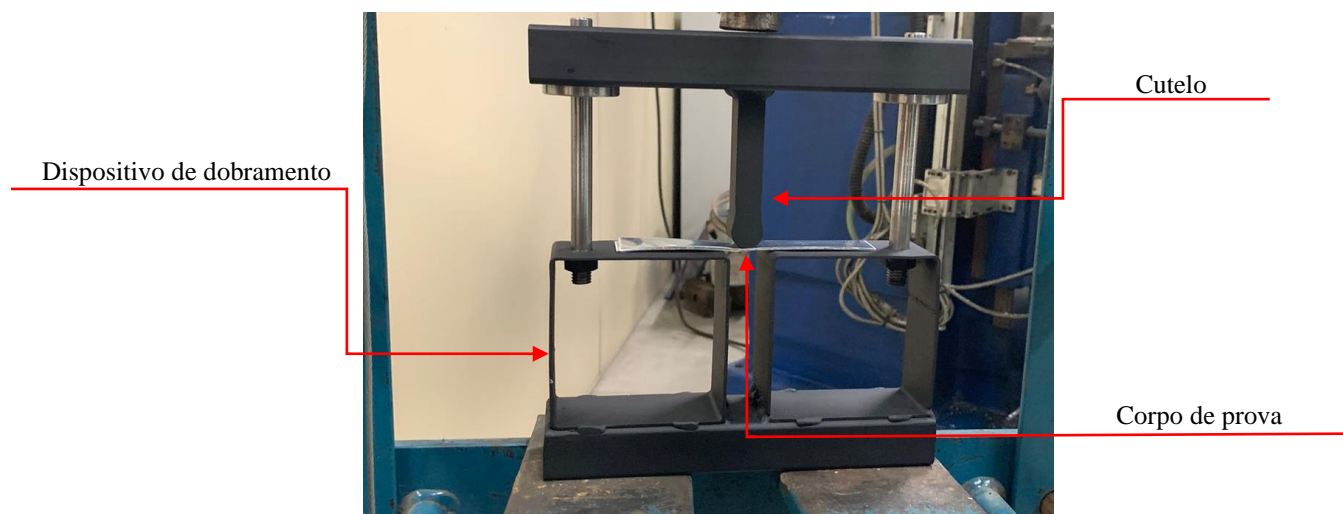
Figura 6 – Cotas do dispositivo de fixação



Fonte: Próprio autor

Por fim, foram realizadas a fabricação do dispositivo de fixação e também do dispositivo de dobramento em Aço carbono ABNT 1020, através de processo de usinagem. O dispositivo de dobramento foi fabricado para realização dos ensaios de dobramento e está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Dispositivo de dobramento fabricado



Fonte: Próprio Autor

### 3.4 TESTES PRELIMINARES

Com o objetivo de aproximar-se de valores a serem aplicados durante a soldagem de chapas de alumínio de baixa espessura, inicialmente foram realizados experimentos manuais. Através destes experimentos, foi possível observar a reação das chapas diante da corrente utilizada.

Para isso foram cortadas chapas de alumínio, utilizando guilhotina, em chapas menores de 120x150 mm. E anteriormente à realização da solda, o eletrodo foi afiado em ângulo de 45°, com auxílio de um esmeril.

A série de experimentos foi realizada utilizando um eletrodo de ponta marrom de 1.6 mm e chapas de alumínio de 0,8 mm, posicionadas sobre o dispositivo de fixação. Alguns parâmetros foram ajustados no painel de operação da fonte, sendo executados com corrente de 90 A, 100 A, 110 A e 120 A, todos com corrente alternada.

Posteriormente à soldagem, foram cortados corpos de prova, de largura 20 mm, e realizados dobramentos de face e raiz o com auxílio de prensa hidráulica e dispositivo de dobramento. Os ensaios de dobramento foram realizados somente nas juntas que, à olho nu, obtiveram melhor resultado.

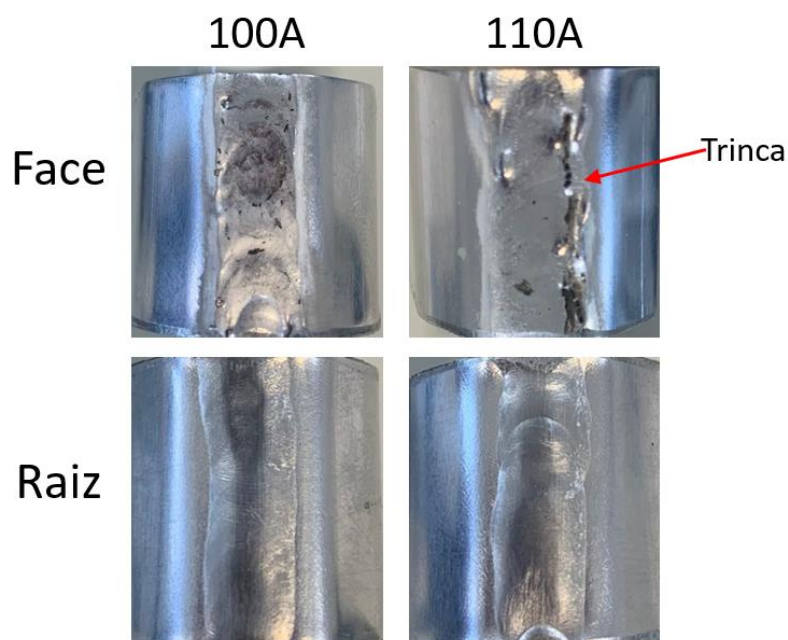
Diante dos testes, obtivemos os seguintes resultados:

- Corrente de 90 A: não houve formação de poça;
- Corrente de 100 A: obteve-se a soldagem das juntas com qualidade;

- Corrente de 110 A: ocorreu a formação de cordão, porém apresentou trincas após teste de dobramento;
- Corrente de 120 A: ocorreram trincas durante o processo de soldagem.

É possível observar o resultado dos ensaios na Figura 8.

Figura 8 – Resultado dos testes preliminares



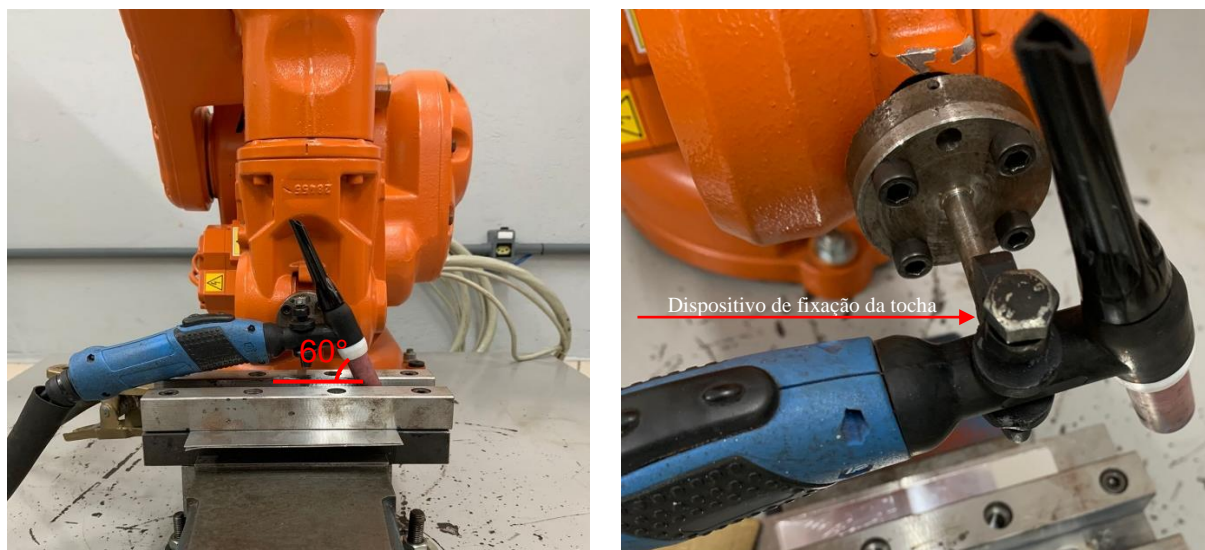
Fonte: Próprio Autor

Após análise das juntas soldadas e dobradas, foi escolhida a corrente de 100 A para ser utilizada no processo de soldagem com braço robótico. A junta soldada à 100 A não apresentou defeitos após o ensaio de dobramento.

### 3.5 SOLDAGEM COM BRAÇO ROBÓTICO

Para realização dos testes oficiais, a fonte Maxxi TIG foi posicionada ao lado do braço robótico ABB IRB 140, sendo a tocha de soldagem acoplada à extremidade do braço, através de um dispositivo de fixação. A tocha foi posicionada à um ângulo de 60° referente à chapa, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Posicionamento da tocha (a)Tocha posicionada à 60° (b)Dispositivo de fixação



Fonte: Próprio Autor

Após o posicionamento da tocha e do dispositivo de fixação, foi dado início à programação do braço robótico. A programação foi realizada através da linguagem RAPID, no FlexPendant do próprio robô. Para isso, foram cadastrados todos os pontos necessários, de acordo com as posições desejadas.

O cadastro dos pontos para a programação, funciona de maneira em que, utilizando o joystick do FlexPendant, o robô é posicionado no ponto desejado, e atribuído um nome a ele, e então é feito o registro do mesmo. Portanto, os pontos utilizados foram:

- Início\_cima: ponto inicial do robô, de onde a programação irá iniciar;
- Início: ponto referente ao início da chapa, onde o robô se posiciona para começar a soldagem;
- Início2: ponto referente aos primeiros 3mm da chapa, onde o robô irá avançar com 1mm/s de velocidade, para que ocorra a estabilização do arco;
- Final: ponto final da chapa. Será entre os pontos “início2” e “final” onde ocorrerá definitivamente a soldagem.
- Final\_acima: ponto com variação de alguns mm no eixo z, após o fim da soldagem.

A programação ocorreu conforme descrito no APÊNDICE A, e foi realizada de maneira que foram estabelecidos todos os parâmetros iniciais, variando apenas a velocidade. O único tipo de movimento utilizado foi o MoveL, além das funções:

- V: velocidade, variando entre 2,5 mm/s, 5 mm/s e 7,5mm/s;

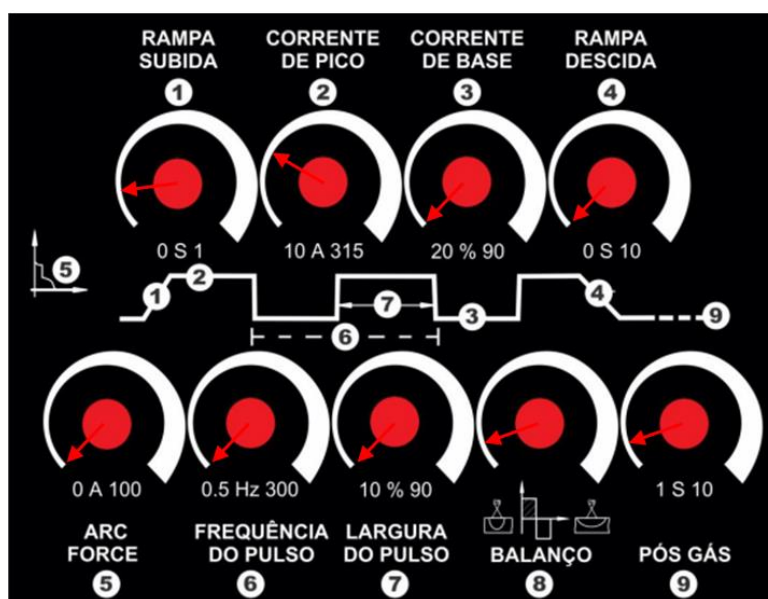
- Z: arredondamento, utilizado a opção “fine”, que permite que o movimento não sofra arredondamentos;
- Tool: ferramenta.

O eletrodo de tungstênio escolhido foi o de ponta marrom, pois além de ser recomendável para a soldagem em alumínio, também é o mais adequado para soldagem em CA. O eletrodo de ponta marrom, possui em sua composição Tungstênio e 0,3% de Zircônio. O Zircônio é um metal forte que resiste à rachaduras, produz arco estável e resiste à contaminação.

Como pode-se observar na Tabela 3, para escolha do diâmetro do eletrodo, baseia-se na corrente a ser depositada no material de base, foi então selecionado o eletrodo de ponta marrom com 1,6 mm de diâmetro.

Antes do início da soldagem, foram ajustados os parâmetros no painel da fonte de soldagem, como ilustrado na Figura 10, sendo a corrente de soldagem aplicada de 100 A.

Figura 10 – Parâmetros ajustados na fonte de soldagem



Fonte: Próprio Autor

Partindo então para o início das soldagens, foram realizados dois testes com a velocidade de 5 mm/s, com distância eletrodo-peça de 0,5 mm e 1 mm respectivamente. Em ambos os testes, não houve formação do cordão e nem fusão entre as chapas. Buscando o ponto ótimo desta distância, foi realizado um terceiro teste, com a mesma velocidade de 5 mm/s e distância de 2 mm, obtendo assim um ótimo resultado.

Foi estabelecido então, 5 mm/s como a velocidade média dos testes, a partir daí, foi variada a velocidade para 2,5 mm/s e 7,5 mm/s, utilizando a distância eletrodo peça de 2 mm.

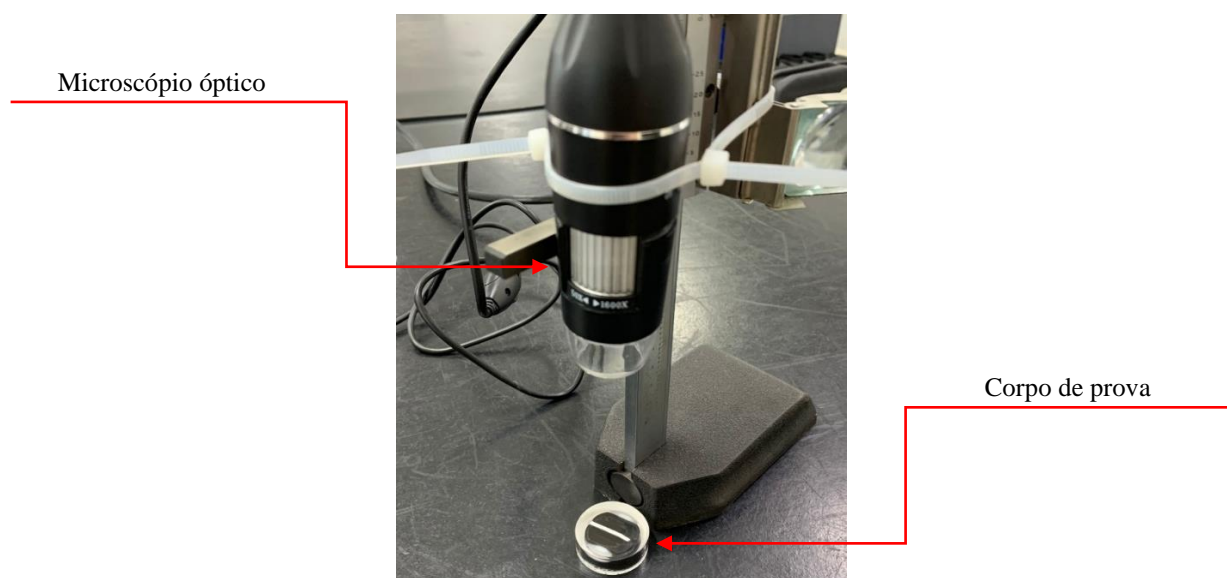
### 3.6 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Afim de identificar a zona termicamente afetada da região soldada, foram cortados corpos de prova de 10x22mm, e embutidos em resina acrílica com o auxílio de uma máquina de embutimento. Posteriormente os corpos de prova foram lixados e polidos, e por fim submetidos à imersão em uma mistura de 10g de NaOH (hidróxido de sódio) com 90ml de água destilada. Para melhor reação do alumínio, os corpos de prova ficaram submersos por 60 segundos à 70°C, a temperatura da solução foi controlada através de termômetro.

Por fim, as amostras foram analisadas utilizando um microscópio óptico digital, atrelado ao software Hi View, conforme ilustra a Figura 11. Através das imagens digitais, foram observadas quais as zonas termicamente afetadas em cada uma das amostras. Durante a análise também foi possível observar porosidades, trincas, defeitos e largura do cordão de solda.

Para melhor precisão, o microscópio foi calibrado com auxílio de uma régua de calibração própria para o mesmo, e em seguida realizadas as medições da região efetivamente soldada.

Figura 11 – Captação de imagens digitais



Fonte: Próprio Autor

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o processo de soldagem, foram obtidos 2 cordões de solda em ótimo estado (Figura 12 e Figura 13), como também um terceiro processo em que obteve-se rompimento de chapa, este rompimento está diretamente atrelado à alta velocidade de soldagem aplicada, fazendo com que não se tenha controle de transferência de energia adequado, conforme ilustra a Figura 14. As soldagens ocorreram no sentido da direita para a esquerda, como indica a seta vermelha.

Observando novamente na Figura 14, após percorrer 6,5 mm a chapa superior veio a romper, prejudicando o cordão. Foi realizado um segundo experimento com  $v = 7,5$  mm/s onde a chapa superior também veio a romper, porém após percorrer 8mm. Também ocorreu o aparecimento de porosidades nas chapas soldadas à 5 mm/s.

Figura 12 – Cordão de solda com  $v = 2,5$  mm/s



Fonte: Próprio Autor

Figura 13 – Cordão de solda com  $v = 5$  mm/s



Fonte: Próprio Autor

Figura 14 – Cordão de solda com  $v = 7,5$  mm/s



Rompimento da chapa

Fonte: Próprio Autor

Através da observação dos cordões de solda obtidos, identificou-se à olho nu a influência da velocidade da largura do cordão. Portanto, com auxílio de um paquímetro, foram determinadas as larguras expressas na Tabela 4.

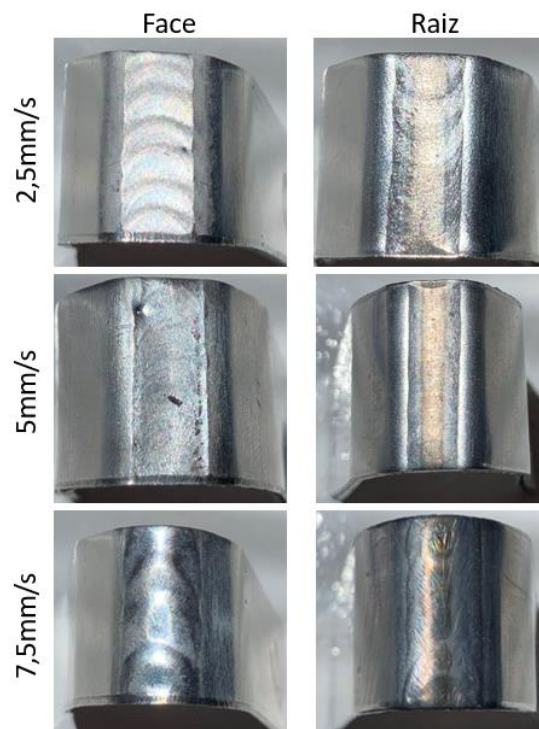
Tabela 4 – Relação largura do cordão x velocidade

Velocidade (mm/s)	2,5	5	7,5
Largura do cordão (mm)	8,	7,05	8,75

Fonte: Próprio Autor

Após a realização do ensaio de dobramento, os cordões de solda não apresentaram rompimento em nenhuma das três velocidades, como é possível observar na Figura 15. Considerando então, que as juntas soldadas são resistentes à dobra para as 3 variações de velocidade diferentes.

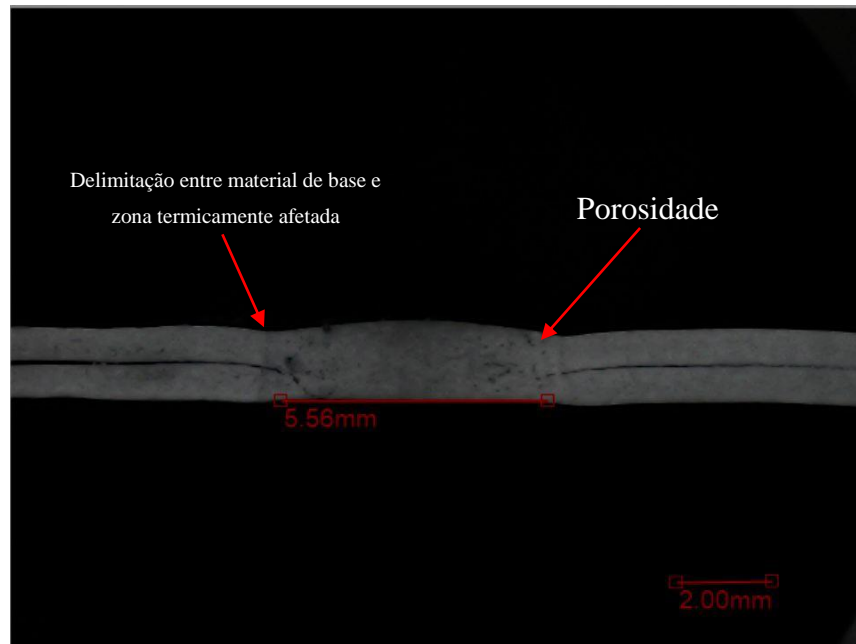
Figura 15 – Resultados do ensaio de dobramento



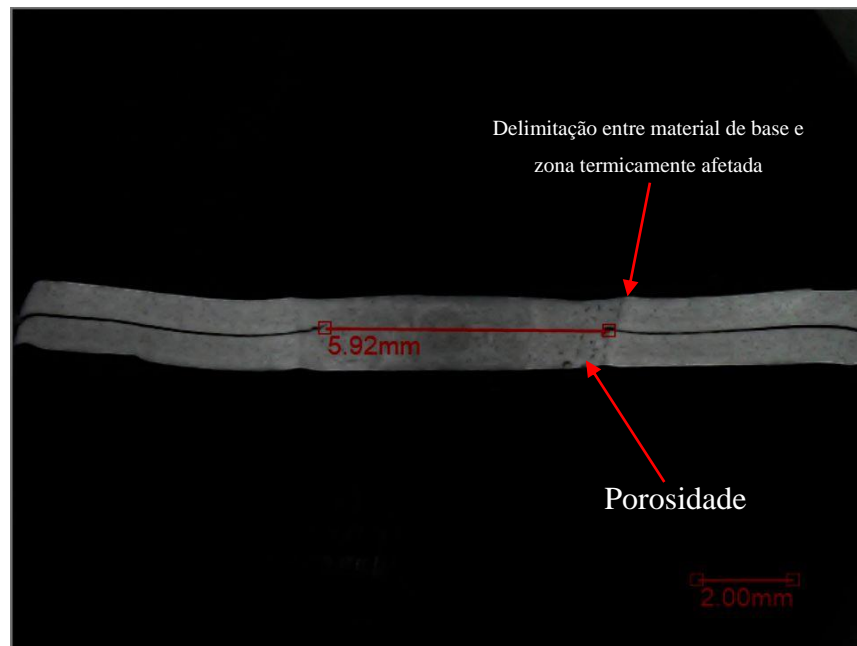
Fonte: Próprio Autor

Analisando, por último, a reação das chapas soldadas após imersão em solução química, foram obtidas revelações da zona termicamente afetada após realização de tratamento de: exposição, luminosidade, sombras e contraste nas imagens. Pôde-se, então, observar a variação da largura das zonas fundidas, como também a variação da extensão da zona termicamente afetada, como ilustram a Figura 16, Figura 17 e Figura 18.

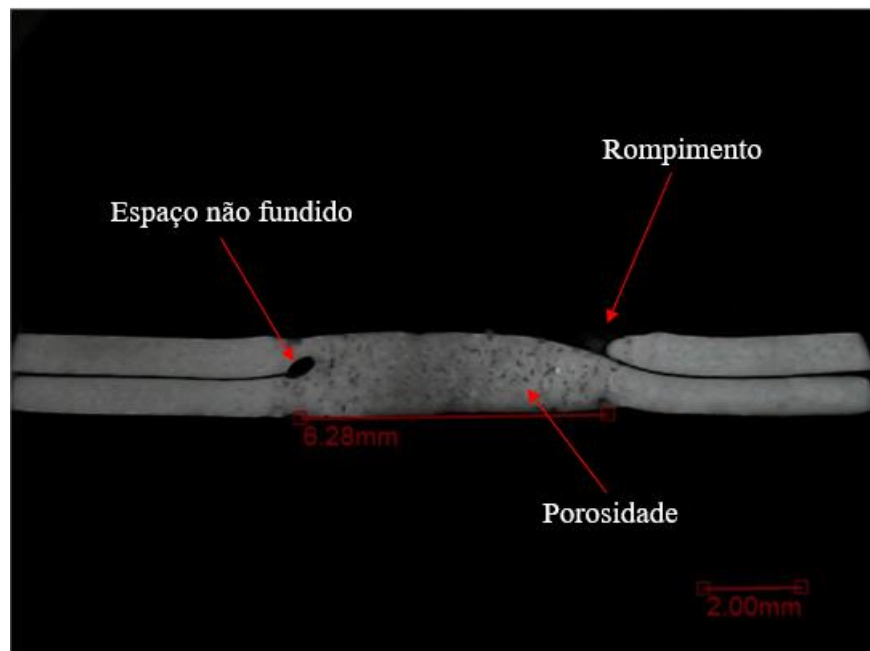
Figura 16 – Zona fundida com  $v = 2,5$  mm/s



Fonte: Próprio Autor

Figura 17 – Zona fundida com  $v = 5 \text{ mm/s}$ 

Fonte: Próprio Autor

Figura 18 – Zona fundida com  $v = 7,5 \text{ mm/s}$ 

Fonte: Próprio Autor

O aparecimento de defeitos ficou evidente na análise metalográfica das chapas soldadas à 7,5 mm/s. Por tanto, verifica-se a fragilidade interna da solda nesta velocidade. Também houve aparecimento de porosidade nas chapas soldadas com as demais velocidades, porém em menor quantidade, e nas regiões mais extremas da zona fundida, com menor impacto sobre a resistência.

A largura da zona termicamente afetada e da zona fundida, variaram de acordo com a velocidade utilizada durante o processo. A zona termicamente afetada é observada através do contraste de cores entre a mesma com material de base. Enquanto na zona fundida, as larguras foram medidas com auxílio de régua do próprio software Hi View. Os resultados estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação zona fundida x velocidade

Velocidade(mm)	2,5	5	7,5
Zona fundida(mm)	5,56	5,92	6,28

Fonte: Próprio Autor

Savage (1979) diz que para soldar com qualidade é necessário diminuir a velocidade. Relacionando, por fim, todos os testes, ensaios e análises desenvolvidas, nota-se que as chapas soldadas à 2,5 mm/s e 5 mm/s apresentaram melhores resultados. As chapas soldadas à 5 mm/s apresentaram maior quantidade de porosidade, tanto à olho nu quanto através de análise metalográfica. Pelo aparecimento de defeitos nas chapas soldadas à 7,5 mm/s, pode ser considerada inadequada esta velocidade para o processo de solda de chapas finas à corrente de 100A.

## 5 CONCLUSÃO

As análises demonstram que os principais parâmetros a se verificar durante um processo de soldagem TIG autógeno são: corrente, distância eletrodo peça e velocidade de avanço.

Portanto, é possível concluir que:

- Foram identificadas variações de 0,36 mm nas zonas fundidas entre cada velocidade variada;
- Conforme ocorre o aumento da velocidade, ocorre também o aumento de porosidade;
- A melhor corrente a ser utilizada para soldar chapas de alumínio com espessura de 0,8 mm é de 100 A;
- A melhor velocidade a ser utilizada para soldar chapas de alumínio com espessura de 0,8 mm é de 2,5 mm/s.

## 6 MELHORIAS FUTURAS

Visando melhor aproveitamento do processo de soldagem, ficam as sugestões da implementação de algumas melhorias a serem realizadas em estudos futuros:

- Reavaliar a solução química de submersão para análise metalográfica;
- Realizar mais quantidade de experimentos;
- Realizar experimentos com velocidade inferior à 2,5 mm/s, a fim de eliminar defeitos.

## REFERÊNCIAS

- COITO, Serafim Da Hora. **Definição de parâmetros a usar num processo de soldadura para melhoria da qualidade do produto.** Universidade do Minho, 2016
- CHOWDARY, B. V.; MAHARAJ, R. R.; LEWIS, W. G. **Development of Welding Parameters to Perform Root Pass Welding Using a Mechanised GTAW Process: A Case Study.** v. 32, 2010. The West Indian Journal of Engineering, v. 32, p. 20-27, Janeiro 2010. ISSN 0511-5728.
- DA ROSA, Alisson Fernandes. **Estudo do processo tig com estratégias inovadoras de inserção de arame para aplicação em soldagem orbital.** Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 2019.
- DE SOUZA, S. S.; NUNES, W. M.; PAGANINI, P. **Processo de Soldagem: uma Introdução aos Princípios Básicos do Processo de Soldagem TIG Aplicado na Indústria Mecânica.** Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, v. 14, n. 14, p. 27–29, 29 maio 2020.
- DEMARQUE, R. **Metallurgical characterization of dissimilar joints inconel 718 - Inox 316L welded by the autogenous TIG process.** Soldagem e Inspeção, v. 23, n. 3, p. 380–392, 1 jul. 2018.
- DOS SANTOS, Carlos Eduardo Figueiredo. **Processos de Soldagem: Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança.** 1. ed. São Paulo: Érica, 2015. 78-86 p. ISBN 978-85-365-2006-3.
- EDUARDO TAVARES VIEIRA, H.; EDSON NOGUEIRA FRAGA, F. **Análise computacional das curvas de ciclo térmico em uma chapa de alumínio soldada com o processo TIG autógena.** n. 2, p. 61–71, 2022.
- GARCIA, B. **Estudo comparativo de emendas soldas por eletrodo revestido em relação a tensão de tração comparative study of electrode soles by electrode coated in relation to drive tension.**
- HAILE, A. **The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A Review**The International Journal Of Engineering And Science (IJES).
- JORGE, V. L. **Avaliação das Potencialidades da Soldagem TIG com Alta Corrente Aplicada em União de Chapas Sobrepostas.** 2016. 123 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- LACOSTE, Juan León. **Análisis comparativo en cordones de soldadura obtenidos por friction stir welding y metodo TIG en chapas de aluminio de alta resistencia de uso aeroespacial.** In: IX Congreso Argentino de Tecnología Espacial (CATE)(Córdoba, 26 al 28 de abril de 2017). 2017.
- Manual de Operação - Unidade de Refrigeração WK 330-365i.
- Manual MaxxiTIG 300P AC-DC (380V).
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.** 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2016. 189-204 p. ISBN 975-85-352-7881-1.

MARTINS, Édý Alan. **AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM TIG AUTÓGENA DUPLO CÁTODO TWIN TIG**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

ROBOTICS, A. **Operating manual – RobotStudio**, 2023.

ROBOTICS, A. **Product manual - IRB 140**, 2004.

SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. **Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding**. Welding Journal, jul. 1979. 212s-224s.

SCHREIBER, Rafael Gustavo; TEIXEIRA, Andrison Rodrigues; PEREIRA, Rafael Santiago Floriani; OSÓRIO, Fernando Da Silva; SCHAEFER, Lirio. **Prototyping of absorber plate for solar collector by ISF and FSW processes**. Lages, Santa Catarina: © The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2021, 2021.

SILVEIRA, E. J. Ciências Exatas **SOLDAGEM TIG APLICADO NA RECUPERAÇÃO DE MATRIZES DE CORTE DE AÇO VC-131 TEMPERADO**. *Revista Ciências Exatas* v. 24, n. 2, p. 21, 2018.

VEGA, Mario Palacio; RINCON, Angie. **Experimental comparative analysis of a flat plate solar collector with and without PCM**, 2020.

WAINER, E. **Soldagem processo e metalurgia**. São Paulo: Bluncher, 1992.

**APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO BRAÇO ROBÓTICO**

```
PROC main ( )
  MoveL, inicio_cima, v50, fine, tool0;
  MoveL inicio, v10, fine, tool0;
  MoveL inicio2, speed1\ V:=1, fine, tool0;
  MoveL final, speed1\ V:=5, fine, tool0;
  MoveL, final_acima, v50, fine, tool0;
  MoveL, inicio_cima, v50, fine, tool0;
ENDPROC
```

```
PROC main ( )
  MoveL, inicio_cima, v50, fine, tool0;
  MoveL inicio, v10, fine, tool0;
  MoveL inicio2, speed1\ V:=1, fine, tool0;
  MoveL final, speed1\ V:=2.5, fine, tool0;
  MoveL, final_acima, v50, fine, tool0;
  MoveL, inicio_cima, v50, fine, tool0;
ENDPROC
```

```
PROC main ( )
  MoveL, inicio_cima, v50, fine, tool0;
  MoveL inicio, v10, fine, tool0;
  MoveL inicio2, speed1\ V:=1, fine, tool0;
  MoveL final, speed1\ V:=7.5, fine, tool0;
  MoveL, final_acima, v50, fine, tool0;
  MoveL, inicio_cima, v50, fine, tool0;
ENDPROC
```