

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATHEUS FRANCESCO OCELLI DE ARAÚJO ALVES

AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE DO ALUMÍNIO PELO PROCESSO DE  
SOLDAGEM TIG

BELO HORIZONTE

2017

MATHEUS FRANCESCO OCELLI DE ARAÚJO ALVES

AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE DO ALUMÍNIO PELO PROCESSO DE  
SOLDAGEM TIG

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan José de Santana

Co-Orientador: Prof. M. Sc. Aderci de Freitas Filho

Belo Horizonte

2017

MATHEUS FRANCESCO OCELLI DE ARAÚJO ALVES

AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE DO ALUMÍNIO PELO PROCESSO DE  
SOLDAGEM TIG

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em    /    /

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Ivan José de Santana – Orientador

Prof. M. Sc. Aderci de Freitas Filho

Prof. Victor Souza Esteves Lima

Prof. M. Sc. Euclides Gonçalves Martins Filho

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ivan J. de Santana, pela orientação e por toda a ajuda durante a realização deste trabalho.

A todos os professores e servidores do CEFET-MG que contribuíram com este trabalho.

A toda minha família que sempre apoiou todas as minhas decisões.

A todos os amigos, que apoiaram e ajudaram a conclusão deste.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para possibilitar a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

O processo de soldagem TIG, é um processo bastante utilizado para a soldagem de materiais não ferrosos, principalmente o alumínio. O gás inerte que é usado como proteção evita a ocorrência de porosidades e deixa a solda com uma alta qualidade e limpa. O alumínio não é um material fácil de soldar e devido ao aparecimento de poros durante a soldagem. Neste trabalho avaliou-se a soldabilidade do alumínio pelo processo de soldagem TIG, além de avaliar a influência dos parâmetros de soldagem, como corrente elétrica, velocidade e distância entre o eletrodo e a peça, na formação da zona fundida. Foram realizados vários testes de soldagem em corpos de prova com dimensões pré-estabelecidas divididos em sete procedimentos de soldagem diferentes. Primeiro variou-se a corrente de soldagem, depois a velocidade e, em seguida, a distância entre o eletrodo e a peça. O material foi caracterizado no intuito de descobrir quais os elementos presentes no material dos corpos de prova e suas respectivas concentrações. Foram realizados ensaios metalográficos de micrografia e macrografia na região da zona fundida. Como resultado obteve-se dados que possibilitaram verificar os parâmetros que mais influenciaram no aumento da região da zona fundida, sendo a velocidade de soldagem o mais significativo entre eles.

Palavras-chave: Soldagem, alumínio, TIG, zona fundida.

## **ABSTRACT**

The TIG welding process is a widely used process for the welding of non-ferrous materials, mainly aluminum. The inert gas that is used as protection prevents the occurrence of porosities and leaves the weld with a high quality and clean. Aluminum is not an easy material to weld due to the appearance of pores during welding. This work evaluated the weldability of aluminum by the TIG welding process, besides evaluating the influence of welding parameters, such as electric current, velocity and distance between the electrode and the specimen, in the formation of the melted zone. Several welding tests were performed on specimens with pre-established dimensions divided into seven different welding procedures. First the welding current was varied, then the speed and then the distance between the electrode and the piece. The material was characterized in order to discover which elements present in the material of the specimens and their respective concentrations. Metallographic tests of micrography and macrography were performed in the region of the molted zone. As a result, we obtained data that allowed us to verify the parameters that most influenced the increase of the region of the molted zone, being the speed of welding the most significant among them.

Key-Words: Welding, aluminum, TIG, melted zone.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de Soldagem TIG. ....	20
Figura 2 - Distribuição de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica, (b) Coluna do Arco e (c) Zona de Queda Anódica (esquemático). ....	26
Figura 3 - Diagrama de fases Al-Cu. ....	28
Figura 4 - Diagrama de fases Al-Si. ....	29
Figura 5 – Desenho esquemático do corpo de prova. ....	33
Figura 6 – Equipamento utilizado para Análise Química. ....	34
Figura 7 – Estrutura utilizada para a realização da soldagem. ....	36
Figura 8 – Máquina de solda Miller Syncrowave 250 DX. ....	37
Figura 9 – Máquina de corte Arocor 80. ....	38
Figura 10 – Corpo de prova após o corte. ....	38
Figura 11 – Lixadeiras modelo 115/60 da Strauers. ....	39
Figura 12 - – Lixadeira modelo PL02E da Soprano. ....	39
Figura 13 – Lixadeiras Arotec modelo Aropol 2V. ....	39
Figura 14 – Endoscópio Snake Inspeção e Câmera de Vídeo. ....	40
Figura 15 – Máquina politriz modelo DP-10 da Strauers. ....	41
Figura 16 – Microscópio modelo IM713. ....	41
Figura 17 – Micrografia do alumínio “in natura” usado nos corpos de prova. ....	43
Figura 18 - Superfícies soldadas dos corpos de prova onde houve variação de corrente. a) CP1, b) CP2, c) CP3. ....	44
Figura 19 - Superfícies soldadas dos corpos de prova onde houve variação de velocidade. a) CP4, b) CP5. ....	45
Figura 20 - Superfícies soldadas dos corpos de prova onde houve variação da distância. a) CP6, b) CP7. ....	45
Figura 21 – Micrografias com aumento de 100x. ....	46
Figura 22 – Micrografias com aumento de 200x. ....	46
Figura 23 – Imagens de macrografia dos corpos de prova. a) CP1, b) CP2, c) CP3, d) CP4. ....	47
Figura 24 – Imagem de macrografia dos corpos de prova. e) CP5, f) CP6, g) CP7. ....	47
Figura 25 - Gráfico de Corrente de Soldagem x Profundidade da zona fundida. ....	49
Figura 26 - Gráfico de Corrente de Soldagem x Largura da zona fundida. ....	50
Figura 27 - Gráfico de Corrente de Soldagem x Área da zona fundida. ....	50

Figura 28 - Gráfico da Distância entre o eletrodo e a peça x Profundidade da zona fundida. .51	51
Figura 29 - Gráfico da Distância entre o eletrodo e a peça x Largura da zona fundida. ....51	51
Figura 30 - Gráfico da Distância entre o eletrodo e a peça x Área da zona fundida. ....52	52
Figura 31 - Gráfico de Velocidade de Soldagem x Profundidade da zona fundida. ....52	52
Figura 32 - Gráfico de Velocidade de Soldagem x Largura da zona fundida. ....53	53
Figura 33 - Gráfico de Velocidade de Soldagem x Área da zona fundida. ....53	53



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos fisiológicos do choque elétrico. ....	17
Tabela 2 - Efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem TIG.....	22
Tabela 3 - Classificação das ligas de alumínio.....	27
Tabela 4 – Procedimentos de soldagem onde variou a corrente de soldagem. ....	35
Tabela 5 - Procedimentos de soldagem onde variou a velocidade de soldagem. ....	35
Tabela 6 - Procedimentos de soldagem onde variou a distância entre o eletrodo e a peça. ....	36
Tabela 8 – Resultado da análise química do material dos corpos de prova. ....	43
Tabela 9 – Área aproximada da zona fundida em cada corpo de prova. ....	49

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	OBJETIVOS.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM .....	14
3.2	A IMPORTÂNCIA DA SOLDAGEM.....	14
3.3	SEGURANÇA EM SOLDAGEM.....	16
4	PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	18
4.1	PROCESSO DE SOLDAGEM TIG .....	19
4.1.1	PROCESSO TIG – EQUIPAMENTOS .....	20
4.1.2	PROCESSO TIG – CONSUMÍVEIS .....	20
4.1.3	PROCESSO TIG – VARIÁVEIS E MODOS DE EMISSÃO DOS ELÉTRONS 21	
5	LIMPEZA CATÓDICA.....	24
6	FÍSICA DA SOLDAGEM .....	24
6.1	O ARCO ELÉTRICO .....	24
7	ALUMÍNIO.....	27
7.1	PROPRIEDADES DAS LIGAS DE ALUMÍNIO .....	28
7.2	CRESCIMENTO DE GRÃO APÓS RECRISTALIZAÇÃO .....	30
7.3	APLICAÇÕES.....	31
8	PARTE EXPERIMENTAL.....	32
8.1	MATERIAIS.....	33
8.2	METODOLOGIA .....	33
8.2.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DAS CHAPAS .....	37
8.2.2	AVALIAÇÃO DA ZTA DAS AMOSTRAS .....	42
9	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	43
9.1	RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA NO MATERIAL.....	43

9.2	RESULTADO DO PROCESSO DE SOLDAGEM .....	44
9.3	RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL .....	45
10	CONCLUSÃO .....	55
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) é usado em grande escala atualmente, principalmente na soldagem de materiais não-ferrosos como, por exemplo, o alumínio, o manganês e o titânio. É considerado como um processo eficiente devido a proteção de sua solda por um gás inerte. A soldagem TIG produz soldas de alta qualidade e limpa, como não é gerado escória, a chance de inclusão da mesma no metal de solda é eliminada, e a solda não necessita de limpeza no final do processo.

Com a dificuldade de soldar materiais não ferrosos, surgiu esse processo e primeiramente ele foi utilizado com o hélio como gás de proteção e, em seguida, substituído pelo argônio por ser economicamente mais viável. O processo TIG pode ser usado com corrente contínua, com corrente alternada e com corrente pulsada, o equipamento varia entre altas e baixas amperagens, sendo que na mais alta faz a solda e na mais baixa solidifica e esfria o material que está sendo soldado. Com isto é possível soldar materiais com o mínimo de empenamento por temperatura.

O alumínio é conhecido como um material que não é muito fácil de soldar, ele apresenta quase sempre uma grande ocorrência de poros, essa porosidade se deve a grande diferença de solubilidade do hidrogênio no estado líquido e no estado sólido. Isto porque o alumínio dissolve grandes quantidades de hidrogênio no estado líquido, enquanto que, no estado sólido, a solubilidade do hidrogênio é bastante reduzida. A técnica de soldagem TIG é recomendada para a soldagem deste tipo de material, porque utiliza um gás inerte de proteção, evitando o contato da solda com o hidrogênio da atmosfera.

Este trabalho propôs uma avaliação dos parâmetros da soldagem TIG e sua influência no tamanho da zona termicamente afetada. Para isso, após a soldagem dos corpos de prova, foi realizado um ensaio metalográfico, obtendo imagens de macrografia e micrografia, para verificar a área afetada. Esperou-se avaliar experimentalmente qual dos principais parâmetros do processo (corrente de soldagem, velocidade e distância do eletrodo para a peça) tem maior influência na formação da zona fundida. Como resultado, verificou-se que a velocidade de soldagem é o parâmetro que mais influenciou na profundidade da zona fundida.

## **2 OBJETIVOS**

Avaliar a soldabilidade do alumínio pelo processo de soldagem TIG e a influência dos parâmetros de soldagem na zona termicamente afetada.

Objetivos específicos:

Avaliar a influência da corrente de soldagem na penetração da zona fundida.

Avaliar a influência da velocidade de soldagem na penetração da zona fundida.

Avaliar a influência da distância entre o eletrodo e a peça na penetração da zona fundida.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM**

Os processos de soldagem assim como os processos de brasagem são dois importantes processos de união de metais que são utilizados industrialmente. Possuem diferentes tipos de aplicações, desde a microeletrônica até estruturas de grande porte como por exemplo navios e pontes. Os processos de soldagem podem ser usados não só como um processo de união, mas também como processos de deposição de material, servindo como revestimento com características especiais e recuperando peças desgastadas (MARQUES, ET AL., 2005).

De acordo com a Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society – AWS*), a soldagem é um “processo de união de matérias usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”.

Uma outra definição de soldagem bastante utilizada também é “processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”. Esta última definição engloba também a brasagem, que pode ser considerada, neste contexto, um processo de soldagem (MARQUES, ET AL., 2005).

#### **3.2 A IMPORTÂNCIA DA SOLDAGEM**

Soldagem é o método mais comum de união de duas ou mais peças de metal para fazê-las agirem como uma única peça. Ela permite a produção de uma estrutura monolítica que é forte em todas as direções. Soldagem é usada para juntar todos os metais comerciais e suas ligas e para juntar metais de diferentes características químicas e mecânicas. Os processos de soldagem são vitais para a economia e defesa da nação, mais de 50% do produto nacional bruto do país está relacionada com a soldagem de uma forma ou de outra. Soldagem é o jeito mais econômico e eficiente para juntar metais permanentemente (CARY & HELZER, 2005).

Soldagem começou como uma ferramenta de reparação ou manutenção e se tornou um dos mais importantes métodos de fabricação, bem como o método de construção mais essencial. Por causa de sua força e versatilidade, soldagem é usada na fabricação de quase todos os produtos usados no dia a dia e é usada na construção dos veículos de transporte. Sem a soldagem muitos

dos cidadãos não poderiam arcar com os custos dos bens e serviços que eles precisam para viver. Equipamentos de construção como trator e reboque são bem soldados, assim como os vagões ferroviários (CARY & HELZER, 2005).

Os automóveis usados atualmente seriam muito mais caros se não fosse pela soldagem. O corpo de aço e a estrutura dos carros de hoje são soldados por pontos de solda utilizando robôs, além disso, soldagem a arco e soldagem a laser também são usadas. O programa espacial foi viabilizado com a aplicação dos processos de soldagem. A estação espacial internacional foi soldada na terra e transportada para o espaço, e, em seguida, soldas de montagem final foram feitas no espaço. O próprio serviço de transporte, a partir do motor até o tanque de combustível, necessitam de procedimentos especializados para a soldagem de ligas de alumínio, sem defeitos (CARY & HELZER, 2005).

O uso da soldagem se destaca dentre os outros processos de trabalho de metais como usinagem e forjamento. Ao mesmo tempo que parece ser simples, soldagem envolve mais ciência e variáveis do que qualquer um dos outros processos industriais. Somente quando a soldagem é entendida que ela se torna a maneira mais econômica e eficiente para se juntar metais (CARY & HELZER, 2005).

Existem diferentes processos de soldagem, diferentes tipos de soldas e jeitos diferentes de fazer uma solda. Alguns processos de soldagem não causam faíscas, não usam eletricidade ou precisam de adição de calor. A soldagem necessita de conhecimento para selecionar o processo correto de soldagem para cada aplicação (CARY & HELZER, 2005).

Algumas das vantagens da soldagem são:

- É o método de união permanente que tem o menor custo.
- Proporciona alívio de peso com uma melhor utilização dos materiais.
- Pode ser usada em qualquer lugar.
- Oferece flexibilidade de *design*.
- Une todo tipo de metal comercial.

É importante saber também as limitações da soldagem, que são:

- Soldagem manual depende do fator humano.
- Deve ser desenvolvido procedimentos para os diferentes tipos de metal e aplicações.
- Inspeção dos componentes se faz necessário para garantir a qualidade.

Essas limitações podem ser superadas por meio de avaliação não destrutiva, boa supervisão, procedimentos qualificados, pessoal qualificado e o uso de processos de soldagem mecanizados. Uma soldagem feita corretamente é a melhor e mais barata solução para a montagem de qualquer produto de metal (CARY & HELZER, 2005).

### 3.3 SEGURANÇA EM SOLDAGEM

Todos os trabalhadores envolvidos na produção e construção estão continuamente expostos a um perigo potencial. Um número de problemas de saúde e segurança estão associados com a soldagem. Quando medidas preventivas corretas são seguidas, os processos de soldagem se tornam seguros (Cary & Helzer, 2005). De acordo com a *Occupational Safety and Health Act* (OSHA), operações de soldagem representam perigos potenciais de fumos, gases, choque elétrico, radiação de calor e as vezes barulho. Todas as pessoas devem ser protegidas contra estes perigos através do uso de equipamentos adequados.

Os perigos relacionados a soldagem são:

- Choque elétrico.
- Radiação do arco elétrico.
- Incêndios e explosões.
- Fumos e gases.
- Outros riscos relacionados a um processo ou ocupação específica.

O acidente por choque elétrico está sempre presente nas operações de soldagem que fazem uso de energia elétrica, principalmente na soldagem a arco. O contato com partes metálicas que estão eletricamente ativas pode causar lesões ou até a morte, devido ao efeito que o choque elétrico causa sobre o corpo humano, ou pode resultar em outros acidentes devido à reação da pessoa que tomou o choque (MARQUES, ET AL., 2005).

A gravidade desse choque elétrico está relacionada com o tempo que este dura, o trajeto no corpo da vítima e a intensidade da corrente. A Tabela 1 apresenta os efeitos no corpo da vítima gerados por diferentes intensidades. Nota-se que dependendo da intensidade da corrente, o acidente pode ser fatal (MARQUES, ET AL., 2005).

Existem precauções que devem ser tomadas para se prevenir do choque elétrico, como:

- Aterrar todo o equipamento elétrico.



- Trabalhar em ambiente seco.
- Manter as conexões elétricas limpas e bem ajustadas.
- Usar cabos de dimensões corretas.

Evitar trabalhar sobre circuitos energizados e usar roupas, luvas e calçados secos.

**Tabela 1 - Efeitos fisiológicos do choque elétrico.**

<b>Intensidade da corrente</b>	<b>Efeito</b>
<b>Até 5 mA</b>	Formigamento fraco
<b>5 até 15 mA</b>	Formigamento forte
<b>15 até 50 mA</b>	Espasmo muscular
<b>50 até 80 mA</b>	Dificuldade de respiração até desmaios
<b>80 mA até 5 A</b>	Fibrilação do ventrículo do coração; parada cardíaca; queimaduras de alto grau
<b>Acima de 5 A</b>	Morte certa

Fonte: Marques, et al., 2005.

O arco elétrico é uma fonte poderosa de luz: visível, ultravioleta e infravermelho. É necessário que soldadores e pessoas próximas do arco elétrico usem proteções adequadas contra a radiação. O brilho e o exato espectro de um arco de soldagem dependem do processo de soldagem, dos metais no arco, da atmosfera do arco, do comprimento do arco e da corrente de soldagem. Quanto maior a corrente e a tensão, mais intenso a luz emitida pelo arco. Como todas as radiações, a luz de radiação do arco reduz de acordo com o quadrado da distância. A exposição da pele e dos olhos para o arco é a mesma que a exposição para o sol (CARY & HELZER, 2005).

Calor é radiado do arco em forma de radiação infravermelha. A radiação infravermelha é inofensiva, desde que proteção adequada para os olhos e roupas sejam usadas. Para diminuir a radiação de luz, telas devem ser colocadas em volta da área de soldagem, assim pessoas trabalhando por perto estão protegidas do arco. As telas e a área em volta, especialmente as cabines de soldagem, devem ser pintadas com tintas de acabamento que absorvem a radiação ultravioleta sem criar um grande contraste entre as áreas clara e escura. Soldadores devem usar capacetes de proteção de soldagem e roupas adequadas (CARY & HELZER, 2005).

Um grande número de incêndios em plantas industriais são causados por soldagem com equipamento portátil em áreas não especificamente designadas ou aprovadas para tal trabalho. Os três elementos do triângulo do fogo, combustível, calor e oxigênio, estão presentes na maioria dos processos de soldagem. O calor vem da chama da tocha, do arco ou do metal quente.

O combustível vem do gás combustível usado ou a partir dos combustíveis na área de soldagem. O oxigênio é presente no ar, mas pode ser enriquecido pelo oxigênio usado com o gás comburente. Muitos incêndios industriais são causados por faíscas (CARY & HELZER, 2005).

Peças quentes de metal podem entrar em contato com materiais combustíveis e começar um incêndio. Explosões e incêndios foram também causados pelo calor transmitido pelas paredes de containers para a atmosfera inflamável ou para combustíveis dentro de recipientes. Incêndios por soldagem podem ser prevenidos eliminando todos os combustíveis na área de soldagem, além disso, é necessário que em todas as situações onde haja soldagem, extintores de incêndio estejam disponíveis (CARY & HELZER, 2005).

Gases e fumos podem ser gerados pelas operações de soldagem e estes muitas vezes podem ser prejudiciais à saúde. Vapores de zinco podem causar dor de cabeça e febre e vapores de cádmio podem ser fatais. Argônio, dióxido de carbono e misturas que são usados como gases de proteção em alguns processos de soldagem, não são tóxicos, mas podem deslocar o ar e causar asfixia até a morte se forem usados em ambientes fechados (MARQUES, ET AL., 2005).

Portanto, operações de soldagem devem ser realizadas em ambientes bem ventilados, com o uso de ventiladores e ou exaustores. Sempre que possível, o soldador deve usar também máscaras contra os gases (MARQUES, ET AL., 2005).

Outros riscos relacionados a soldagem são: a queda de objetos, trabalhar com objetos pesados, trabalhar ao redor de materiais aquecidos e queda de trabalhadores de lugares altos como andaimes ou plataformas.

#### **4 PROCESSOS DE SOLDAGEM**

Segundo Marques *et al.* (2005) existem dois tipos de processos de soldagem, esses são classificados pelo método dominante de se produzir a solda, são estes dois tipos de processos: os processos de soldagem por deformação e os processos de soldagem por fusão.

Incluem-se nos processos de soldagem por deformação os processos de soldagem por forjamento, por pontos, por ultrassom, por fricção, por difusão, por explosão, etc.

Já os processos de soldagem por fusão podem ser divididos em grupos de acordo com o tipo de fonte de energia usada para fundir as peças. O mais importante são os processos de soldagem a

arco, que tem como fonte de energia o arco elétrico (Marques, et al., 2005). Os principais processos de soldagem por fusão são:

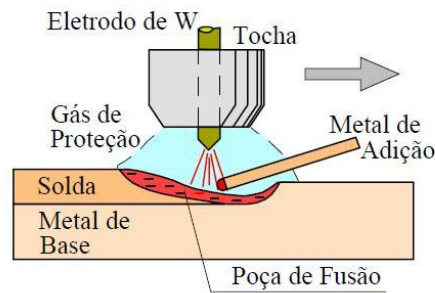
- Soldagem por eletro-escória.
- Soldagem a arco submerso.
- Soldagem com eletrodo revestido.
- Soldagem com arame tubular.
- Soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*).
- Soldagem a plasma.
- Soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*).
- Soldagem por feixe de elétrons, a laser e a gás.

#### **4.1 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**

*Tungsten Inert Gas* (TIG) é um processo de soldagem usado em grande escala, especialmente para a soldagem de metais não ferrosos como o alumínio, o magnésio e o titânio. Um eletrodo de tungstênio não consumível, protegido por um gás inerte, é utilizado para estabelecer um arco elétrico com o metal de base. O calor necessário para fundir o metal de base é fornecido pelo arco elétrico. Pode-se usar ou não um metal de adição nesse processo de soldagem e, quando usado, este metal é aplicado diretamente na poça de fusão. Outra característica importante desse processo é que devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de metal de deposição, esse processo tem um excelente controle de energia transferida para a peça, o que deixa o processo viável para a soldagem de peças de pequena espessura. Com uma eficiente proteção contra a contaminação esse método permite a soldagem de materiais de difícil soldabilidade e com ótimos resultados (MARQUES, ET AL., 2005).

Pode-se observar o desenho esquemático do processo TIG na Figura 1.

**Figura 1 – Processo de Soldagem TIG.**



Fonte: Modenesi, 2007.

#### **4.1.1 PROCESSO TIG – EQUIPAMENTOS**

O principal componente do sistema TIG é a fonte de energia, nesse processo a fonte de energia usada é a de corrente constante. Além dessa fonte de alimentação, usa-se uma tocha de soldagem apropriada, uma fonte de gás protetor e um dispositivo para abertura do arco, cabos e mangueiras (MARQUES, ET AL., 2005).

Segundo Cary & Helzer (2005) as tochas usadas para o processo TIG são desenhadas e usadas somente para esse tipo de processo. Existem quatro tipos básicos de tochas: tochas para soldagem automática, tochas para soldagem manual, tochas refrigeradas a ar para corrente mais baixa e tochas refrigeradas a água para corrente mais alta. Os cabos ligados nas tochas conectam na fonte de energia, gás protetor e refrigeração a água quando usada. Todas as tochas são projetadas para segurarem o eletrodo de tungstênio e, além disso, possuem bocais para direcionamento do fluxo de gás.

A fonte de gás protetor consiste de cilindros de gás inerte e reguladores de pressão e vazão dos gases. Misturadores podem ser usados em situações onde diferentes misturas de gases são usadas com frequência (MARQUES, ET AL., 2005).

#### **4.1.2 PROCESSO TIG – CONSUMÍVEIS**

Na soldagem TIG os principais consumíveis são as varetas de metal de adição e os gases de proteção. Apesar de não serem consumíveis, os eletrodos de tungstênio sofrem um desgaste durante o processo, e por isso devem ser substituídos e reconicionados frequentemente (MARQUES, ET AL., 2005).

Gases inertes como por exemplo o argônio, o hélio e misturas destes, são usados como gases de proteção na soldagem TIG. A qualidade da solda depende muito da pureza desses gases utilizados, portanto exige-se teores mínimos de 99,99% do gás ou gases considerados. Pode-se observar que soldagem com argônio tem melhor estabilidade do arco, menores tensões de soldagem, maior facilidade na abertura do arco, melhor efeito de limpeza dos óxidos na soldagem com corrente alternada e, além disso, o argônio tem um menor custo. Já a soldagem com hélio tem maior penetração e a possibilidade de uso de maiores velocidades (MARQUES, ET AL., 2005).

Para selecionar o tipo de gás a ser usado deve-se observar o tipo de metal a ser soldado, a espessura das peças a unir e a posição da soldagem.

Varetas com comprimentos em torno de 1 metro são usadas como metal de adição na soldagem manual, para a soldagem mecanizada usa-se um fio com diferentes diâmetros. O diâmetro dos fios ou varetas podem variar entre 0,5 a 5 milímetros aproximadamente (MARQUES, ET AL., 2005).

A seleção do material de adição depende das propriedades mecânicas desejadas para a junta soldada. Geralmente, o metal de adição tem composição similar ao do metal de base. O diâmetro escolhido para as varetas ou para os fios variam em função dos parâmetros de soldagem, da quantidade de material a ser depositado e da espessura das peças soldadas (MARQUES, ET AL., 2005).

#### **4.1.3 PROCESSO TIG – VARIÁVEIS E MODOS DE EMISSÃO DOS ELÉTRONS**

De acordo com Marques et al. (2005) existem quatro variáveis principais na soldagem TIG que são: a corrente, a velocidade de soldagem, o comprimento do arco e a vazão do gás de proteção.

Geralmente, quanto maior o comprimento do arco, mais raso e largo é o cordão de solda, sendo esse comprimento a distância entre a peça de trabalho e a ponta do eletrodo. A formação de descontinuidades como porosidades, falta de fusão e mordeduras, pode ser atribuído à instabilidade do arco elétrico quando eles são muito curtos ou muito longos.

Variações na corrente de soldagem podem gerar algumas características na solda, quanto maior a corrente maior será a penetração e a largura do cordão de solda. Já com um aumento na velocidade de soldagem ocorre a diminuição da penetração e largura do cordão de solda.

Geralmente, uma operação com boa produtividade e boa eficiência se dá com uma alta velocidade de soldagem, o que faz com que os custos por unidade de comprimento de solda produzida sejam reduzidos (MARQUES, ET AL., 2005).

Uma vazão insuficiente de gás de proteção pode resultar em pouca proteção e assim pode ocorrer a oxidação do cordão de solda e formação de porosidades. Portanto, a qualidade da solda é influenciada diretamente pela vazão do gás de proteção. Vazões acima do necessário podem causar problemas, como turbulência, arrasto de ar e podem elevar bastante o custo. Para atingir uma vazão ideal deve-se começar com uma vazão alta e ir diminuindo gradativamente até que se inicie a oxidação, uma vazão um pouco maior a essa última seria a ideal (MARQUES, ET AL., 2005).

A Tabela 2 mostra os modos de emissão dos elétrons.

**Tabela 2 - Efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem TIG.**

<b>Tipo de Corrente</b>	<b>CC-</b>	<b>CC+</b>	<b>CA</b>
<b>Polaridade do eletrodo</b>	Negativa ou direta	Positiva ou inversa	Alternada
<b>Fluxo de elétrons e íons</b>	Íons saem da peça para o eletrodo e Elétrons do eletrodo para a peça	Íons saem do eletrodo para a peça e Elétrons da peça para o eletrodo	Íons e Elétrons indo da peça para o eletrodo e do eletrodo para a peça.
<b>Limpeza de óxido</b>	Não	Sim	Sim (meio ciclo)
<b>Balanco de calor</b>	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo
<b>Penetração</b>	Estreita e profunda	Rasa e superficial	Intermediária
<b>Aplicações</b>	Aço, Cu, Ag, Aços inoxidáveis e ligas resistentes ao calor	Al, Mg (somente baixas correntes e espessuras)	Al, Mg e suas ligas com correntes e espessuras maiores

Fonte: Marques, et al., 2005.

#### **4.1.3.1 EMISSÃO TERMIONICA E NÃO TERMIONICA**

O método mais simples e mais conhecido para a emissão de elétrons é a emissão termiônica. Quando o metal é exposto a um calor suficientemente, elétrons poderão receber uma energia que é maior que o limite mínimo necessário para libertá-los do metal, esse limite mínimo de energia é chamado de função de trabalho do material. O fenômeno de elétrons, energeticamente

afetados pelo aquecimento do material, saindo do metal é chamado de emissão termiônica. A função de trabalho está diretamente relacionada com a temperatura necessária para emissão de uma certa quantidade de elétrons por unidade de tempo, ou seja, quanto maior a função de trabalho maior a temperatura e vice-versa (GUILLE, 1970).

A emissão termiônica não tem uma participação importante na emissão de elétrons em cátodos de metais como alumínio e ferro e sim em materiais refratários, como o tungstênio e o carbono (GUILLE, 1970).

Pontos catódicos de diferentes características das discutidas na emissão termiônica são formados, pois as temperaturas requeridas para a geração das densidades de corrente utilizadas são bem maiores que a temperatura de vaporização da maioria dos materiais utilizados em soldagem. Eles são formados na maioria das vezes na superfície do cátodo, tendo uma certa mobilidade, com vários pontos se formando sem nenhum controle sobre o eletrodo. Portanto, esses fenômenos são mais complexos do que a emissão termiônica (MONTEIRO DE SOUZA COSTA, 2006).

Vários mecanismos foram apresentados para explicar a emissão não termiônica de elétrons, mas ainda existem dúvidas sobre qual ou quais mecanismos usar em uma dada situação. De acordo com Guile e Juttner (1980) existem pelo menos três tipos de cátodos não termiônicos, que são: Vapor, se formado sobre metais sem filme de óxidos sobre a superfície, Tunelamento, sobre camadas finas de óxidos (menor que 10nm) e Chaveamento, sobre camadas mais espessas de óxidos (acima de 10nm).

A presença de filmes de óxidos de espessura microscópica na superfície do cátodo na soldagem a arco com proteção gasosa e com proteção de fluxo, desempenha um papel importante na emissão não termiônica de elétrons. Embora seja um mecanismo que não possui total conhecimento, aparentemente envolve a formação de campos elétricos extremamente intensos na camada de óxido, resultante da adsorção de íons positivos, o que leva a formação de filetes condutores no óxido, emissão de elétrons, destruição da camada neste local e, conseqüentemente, do produto de emissão (JUTTNER, 2001A).

No vácuo, onde a camada de óxido não pode ser regenerada, outros mecanismos de emissão não termiônica de elétrons parecem operar após a camada de óxido ser destruída. Existem evidências de que, também na soldagem, mecanismos diferentes de emissão de elétrons podem

operar, ou competir entre si, e resultar em perturbações no comportamento do arco (MODENESI, 1990).

## **5 LIMPEZA CATÓDICA**

A limpeza catódica é um fenômeno no qual ocorre a remoção da camada de óxido da superfície do metal pela ação de um arco incidindo nessa superfície (Pattee, et al., 1968a). De acordo com Pattee et al. (1968a) a limpeza catódica ocorre quando um jato de gás contendo íons positivos incidem, durante a soldagem, a superfície do metal e que ela não sofre influência pela velocidade de soldagem. Além disso, Pattee et al. (1968a) propuseram que o responsável pela limpeza catódica é o fluxo de íons e não a emissão de elétrons. Outros autores como Gibson e Rothschild (1948), atribuíram a limpeza catódica à erosão do cátodo e a emissão de elétrons como o principal agente responsável por essa remoção de partículas. Já Pumphrey (1955) falou que a remoção de óxidos é devido ao bombardeamento de íons positivos no cátodo. Os autores observaram que a limpeza é mais evidente quando se usa o argônio como gás de proteção, diferentemente de quando se usa hélio, onde não existe um claro efeito de limpeza ao usar esse gás.

As principais características da limpeza catódicas são (Pattee, et al., 1968a):

- A limpeza catódica ocorre quando a peça de trabalho está conectada ao polo negativo da fonte.
- A limpeza catódica é reduzida quando se usa hélio como gás de proteção e fortemente evidenciada quando se usa argônio.
- A limpeza catódica não é influenciada pela velocidade de soldagem.
- O aumento da corrente e da taxa de fluxo do gás aumenta a largura da região de limpeza catódica.

## **6 FÍSICA DA SOLDAGEM**

### **6.1 O ARCO ELÉTRICO**

Na soldagem por fusão de materiais metálicos, o arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada, já que possui ótima combinação de características como: baixo custo relativo de equipamento, uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controle e um nível aceitável de riscos à saúde de seus operadores. Este arco “consiste de uma



descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma, podendo produzir energia térmica suficiente para ser usado em soldagem, pela fusão localizada das peças a serem unidas” (MARQUES ET AL., 2005, p. 51).

Considerando a característica elétrica do arco, ele pode ser caracterizado pela diferença de potencial entre suas extremidades e pela corrente elétrica que circula por este. Com uma queda de potencial não uniforme o arco elétrico divide-se em três regiões distintas, a queda anódica, a queda catódica e a queda na coluna, a Figura 2 abaixo mostra esquematicamente essas quedas no arco elétrico. Para o arco se manter estável deve-se ter uma grande produção de elétrons e íons, sendo estes produzidos na coluna de plasma (MARQUES, ET AL., 2005).

Existem dois efeitos de origem magnética de grande importância na soldagem a arco, sendo eles o jato de plasma e o sopro magnético. O jato de plasma é um fluxo intenso de gás do eletrodo para a peça, como esse gás está quente, esse mecanismo é um dos grandes responsáveis pela penetração da solda. O sopro magnético é um desvio do arco de sua posição normal de operação, esse desvio é devido a forças radiais que atuam sobre o arco e o que causa o aparecimento dessas forças é a distribuição assimétrica do campo magnético sobre o arco (MARQUES, ET AL., 2005).

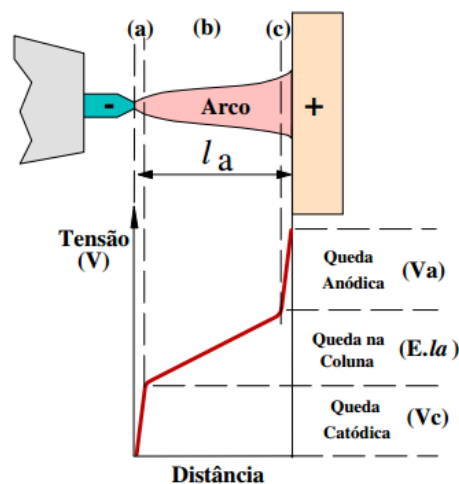
Para minimizar ou até eliminar esse sopro magnético devemos inclinar o eletrodo para o lado para o qual se dirige o arco, soldar com arco mais curto, usar mais de uma conexão de corrente na peça, visando balanceá-la em relação ao arco, usar corrente de soldagem mais baixa, quando possível, e usar corrente alternada, pois o efeito do sopro é menor (MARQUES, ET AL., 2005).

Na soldagem TIG existe alguns métodos para abrir o arco elétrico como por exemplo o toque do eletrodo na peça. Este é o método mais simples, mas não é muito recomendado, pois tocando a peça o eletrodo pode contaminá-la e danificar-se. Um outro método para abertura do arco é a utilização de um ignitor de alta frequência, que fornece uma alta tensão com alta frequência em série ao circuito de soldagem, para ionizar o gás e permitir a abertura do arco e poder trabalhar com uma corrente igual à corrente de soldagem ou não. O problema de usar este último método é que ele pode gerar grande quantidade de distúrbios para a rede de alimentação elétrica (BRACARENSE, 2000).

A partida pulsada é um outro método que pode ser utilizado para abrir o arco na soldagem TIG, ela é obtida através de pulsos de alta tensão que ionizam o gás e permitem a abertura do arco, sempre usando corrente iguais às de soldagem (BRACARENSE, 2000).

A Figura 2 apresenta um desenho esquemático de um arco elétrico, ilustrando suas respectivas regiões.

**Figura 2 - Distribuição de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica, (b) Coluna do Arco e (c) Zona de Queda Anódica (esquemático).**



Fonte: Modenesi, 2007.

A corrente de soldagem é uma variável que tem uma relação direta na penetração da solda e na quantidade de fusão no metal de base, por ter uma relação direta com a quantidade de calor transferido para a peça. Já a tensão elétrica não tem um grande efeito na penetração, pois variações desta atingem a coluna do arco onde o calor que é gerado é transmitido radialmente (MODENESI & BRACARENSE, 2012).

Como a tensão está diretamente relacionada com o tamanho do arco, ela afeta principalmente a largura do cordão (MODENESI & BRACARENSE, 2012).

No arco elétrico, a presença de um campo elétrico entre o cátodo e a poça de fusão, o ânodo, faz com que haja uma passagem de corrente elétrica através da região de plasma ionizado que, por sua vez, dá origem a um campo magnético auto induzido. O campo magnético interage com a corrente transferindo impulso para o gás, o qual é acelerado em direção ao ânodo sob a forma de jato de cátodo característico. Devido à resistência elétrica do plasma, a energia produzida

pela corrente mantém o plasma em seu estado ionizado e fornece o mecanismo de aquecimento para o processo de soldagem (MCKELLIGET & SZEKELY, 1986).

## 7 ALUMÍNIO

O alumínio está entre os 5 elementos de maior abundância na terra e vem sendo utilizado em grande escala nas aplicações industriais. Sua elevada relação resistência/peso, sua baixa densidade, seu elevado coeficiente de expansão térmica, sua elevada resistência a corrosão e suas elevadas condutividade térmica e elétrica são os principais fatores que contribuem para seu sucesso na indústria mecânica (DOS SANTOS, 2009).

Por ser um material com propriedades mecânicas inadequadas para uso estrutural, o alumínio é usado em conjunto com outros materiais, constituindo as ligas estruturais do alumínio. Suas ligas são divididas entre tratáveis termicamente e não tratáveis termicamente, as tratáveis termicamente tem suas propriedades melhoradas através de tratamento térmico e as não tratáveis termicamente tem suas propriedades melhoradas através de tratamento mecânico a frio (BUZINELLI, 2000).

A Tabela 3 indica os tipos de ligas de alumínio existentes, observa-se que essas ligas são classificadas num sistema de número de 4 dígitos, o primeiro indicando o grupo de elementos que determinam as características da liga (DOS SANTOS, 2009).

**Tabela 3 - Classificação das ligas de alumínio.**

<b>Liga</b>	<b>Principal elemento químico</b>
<b>1XXX</b>	Alumínio (99% puro)
<b>2XXX</b>	Cobre
<b>3XXX</b>	Manganês
<b>4XXX</b>	Silício
<b>5XXX</b>	Magnésio
<b>6XXX</b>	Magnésio e Silício
<b>7XXX</b>	Zinco
<b>8XXX</b>	Outros elementos
<b>9XXX</b>	Série não utilizada

Fonte: Dos Santos, 2009.

No primeiro grupo, os dois últimos dígitos correspondem a porcentagem de alumínio que excede 99%. Nos grupos de 2XXX a 8XXX, os dois últimos dígitos diferenciam ligas de um mesmo grupo. O segundo dígito refere-se apenas a uma derivação de uma mesma liga, como exemplo a liga 5652 deriva da liga 5052 (ALCAN, 1993).

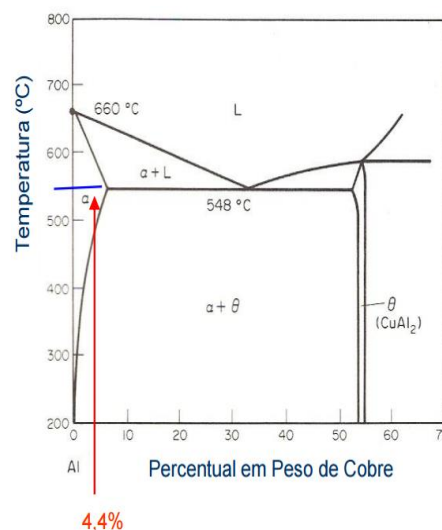
## 7.1 PROPRIEDADES DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Segundo Buzinelli (2000) algumas das características e propriedades das ligas de alumínio são:

- Série 1000: Esta série apresenta o alumínio com 99% de pureza ou mais. E suas propriedades são excelente resistência a corrosão e boa condutividade térmica. Como o alumínio puro tem baixa resistência mecânica essa série tem limitada utilização estrutural.
- Série 2000: Série onde tem o cobre como elemento de liga. Estas ligas podem ser tratadas termicamente e esse tratamento aumenta a resistência mecânica mas perde em resistência a corrosão, quando comparadas com as anteriores. Não são soldáveis e por isso não podem ser usadas em algumas estruturas, como por exemplo aeronaves.

Pode-se dividir esse grupo Al-Cu em outros dois subgrupos: ligas de Al-Cu com altos teores de magnésio (denominadas Al-Cu-Mg) e as ligas de Al-Cu com baixos teores de magnésio. A grande diferença entre esses dois subgrupos é que nas ligas de Al-Cu, as fases precursoras da fase  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ):  $\theta''$  e  $\theta'$ , são as únicas que contribuem para o tratamento térmico de endurecimento por precipitação, já nas ligas Al-Cu-Mg a fase  $S'$  que é precursora da fase  $S$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ), também tem grande importância na contribuição. Caso haja um alto teor de silício nessas ligas, a fase quaternária  $Q$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_7$ ) pode ser encontrada (Barbosa, 2014). A Figura 3 mostra o diagrama de fases do sistema Al-Cu.

**Figura 3 - Diagrama de fases Al-Cu.**



Fonte: Scheid, 2010.

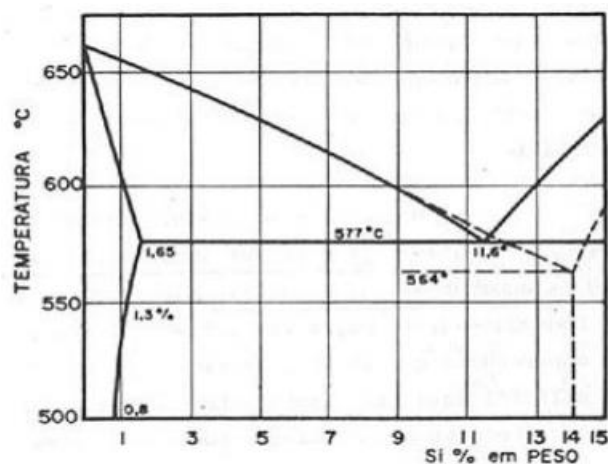
As ligas de Al-Cu podem apresentar diferentes elementos de liga em sua composição, o que confere a formação de diferentes fases. A adição de manganês causa a formação da fase  $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$  a qual retarda os processos de crescimento de grão e recristalização. Já a adição de ferro e silício causa a formação da fase  $Al_7CuFe_2$ , que é uma fase insolúvel (BARBOSA, 2014).

- Série 3000: Série onde tem o manganês como elemento de liga. A adição do manganês melhora um pouco sua resistência e sua trabalhabilidade, através da formação de fases intermetálicas como  $AlFeMnSi$  e  $AlMnSi$ . Entretanto, caso adicionada em quantidades excessivas essas fases podem reduzir a ductilidade. As ligas não são tratáveis termicamente.

O sistema Al-Mn possui apenas uma fase metaestável que tem composição  $Al_{12}Mn$  com 14.5% de manganês. O ferro e silício acima de 0.2% impedem a formação de  $Al_{12}Mn$ , mas o cromo estabiliza essa fase (BARBOSA, 2014).

- Série 4000: Série onde tem o silício como elemento de liga. Esse elemento ajuda na diminuição do ponto de fusão das ligas e assim elas podem ser utilizadas na soldagem. Ao ser combinado com o magnésio, torna a liga tratável termicamente. A Figura 4 o diagrama de fases do sistema Al-Si.

**Figura 4 - Diagrama de fases Al-Si.**



Fonte: Mello et al., 2009.

As ligas de Al-Si podem apresentar diferentes tipos de elementos de liga em sua composição, assim ocorrendo na formação de diferentes fases. A adição de ferro tem o aparecimento de duas fases ternárias que são  $\alpha$  ( $AlFe_2Si$ ) e  $\beta$  ( $Al_5FeSi$ ). A adição de

cobre da origem ao subgrupo Al-Si-Cu e aumenta a resistência mecânica da liga, já a adição de magnésio torna a liga termicamente tratável devido a formação da fase  $Mg_2Si$ , responsável pelo endurecimento das ligas Al-Mg-Si (BARBOSA, 2014).

- Série 5000: Série onde tem o magnésio como elemento de liga. O magnésio faz com que as ligas dessa série tenham uma boa resistência em aplicações com solda, mas uma elevada quantidade desse elemento pode causar problemas de corrosão em temperaturas maiores que  $65^\circ C$ . As ligas não são tratáveis termicamente.

A fase em equilíbrio com o alumínio é a  $Al_3Mg_2$  com 37,3% de magnésio, quando o teor de magnésio supera 3,5% essa fase pode se precipitar dentro dos grãos ou nos contornos de grãos. Uma outra fase também bastante encontrada nas ligas Al-Mg é a  $Al_8Mg_5$  com 36% de magnésio (Barbosa, 2014). A Figura 6 mostra o diagrama de fases do sistema Al-Mg.

- Série 6000: Série onde tem o magnésio e o silício juntos como elemento de liga. Esses dois elementos combinados ajudam as ligas dessa série a terem uma boa resistência mecânica e também uma boa resistência a corrosão. As ligas podem ser tratadas termicamente. A fase  $\beta$  corresponde a fase  $Mg_2Si$  e a fase  $\alpha$  o alumínio, o aumento da temperatura aumenta a solubilidade da fase  $\beta$  na matriz de alumínio ( $\alpha$ ). A adição de cobre nas ligas dessa série forma precipitados intermediários da fase  $Q'$  ( $Al_4Cu_2Mg_8Si_7$ ), da fase  $\theta''$  ( $Al_2Cu$ ) ou da fase  $S'$  ( $Al_2CuMg$ ). O manganês também é um importante elemento nestas ligas, combinado com ferro e silício formam as fases  $AlFeMnSi$  e  $Al_{15}Mn_3Si_2$ . (BARBOSA, 2014).
- Série 7000: Série onde tem o zinco como elemento de liga. Essas ligas podem ser tratadas termicamente e quando tratadas o zinco ajuda no aumento da resistência mecânica das ligas.

Pode-se dividir esse grupo Al-Zn em dois subgrupos: o Al-Zn-Mg e o Al-Zn-Mg-Cu. As fases encontradas nesse tipo de liga na matriz de alumínio são a fase M ( $MgZn_2$ ), T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) e a fase  $\beta$  ( $Al_3Mg_5$ ), sendo essa última encontrada apenas quando o teor de magnésio for muito alto (BARBOSA, 2014).

## 7.2 CRESCIMENTO DE GRÃO APÓS RECRISTALIZAÇÃO

O crescimento de grão pode ser produzido através do aquecimento após a recristalização, esse crescimento pode ocorrer de dois diferentes modos: o crescimento normal de grão e o crescimento anormal de grão (BARBOSA, 2014).

O crescimento normal de grão leva a eliminação de grãos com formas ou orientações desfavoráveis em relação aos seus vizinhos. Processo que ocorre facilmente em alumínio puro, mas em caso de ligas pode formar grãos grosseiros. Um aquecimento generalizado, grãos recristalizados e altas temperaturas leva ao acontecimento desse tipo de crescimento de grão (BARBOSA, 2014).

O crescimento anormal de grão acontece nas ligas de alumínio que possuem algum tipo de obstáculo ao movimento dos contornos de grão e também pode ser chamado como recristalização secundária. Nesse processo o crescimento de grão restringe-se a apenas alguns grãos recristalizados, que em altas temperaturas crescem rapidamente consumindo os grãos vizinhos menores e tornando-se grãos de tamanho grosseiro. A temperatura não é a única razão do aparecimento desses grãos grosseiros, orientações cristalográficas preferencias também podem contribuir para o aparecimento desses grãos (BARBOSA, 2014).

### **7.3 APLICAÇÕES**

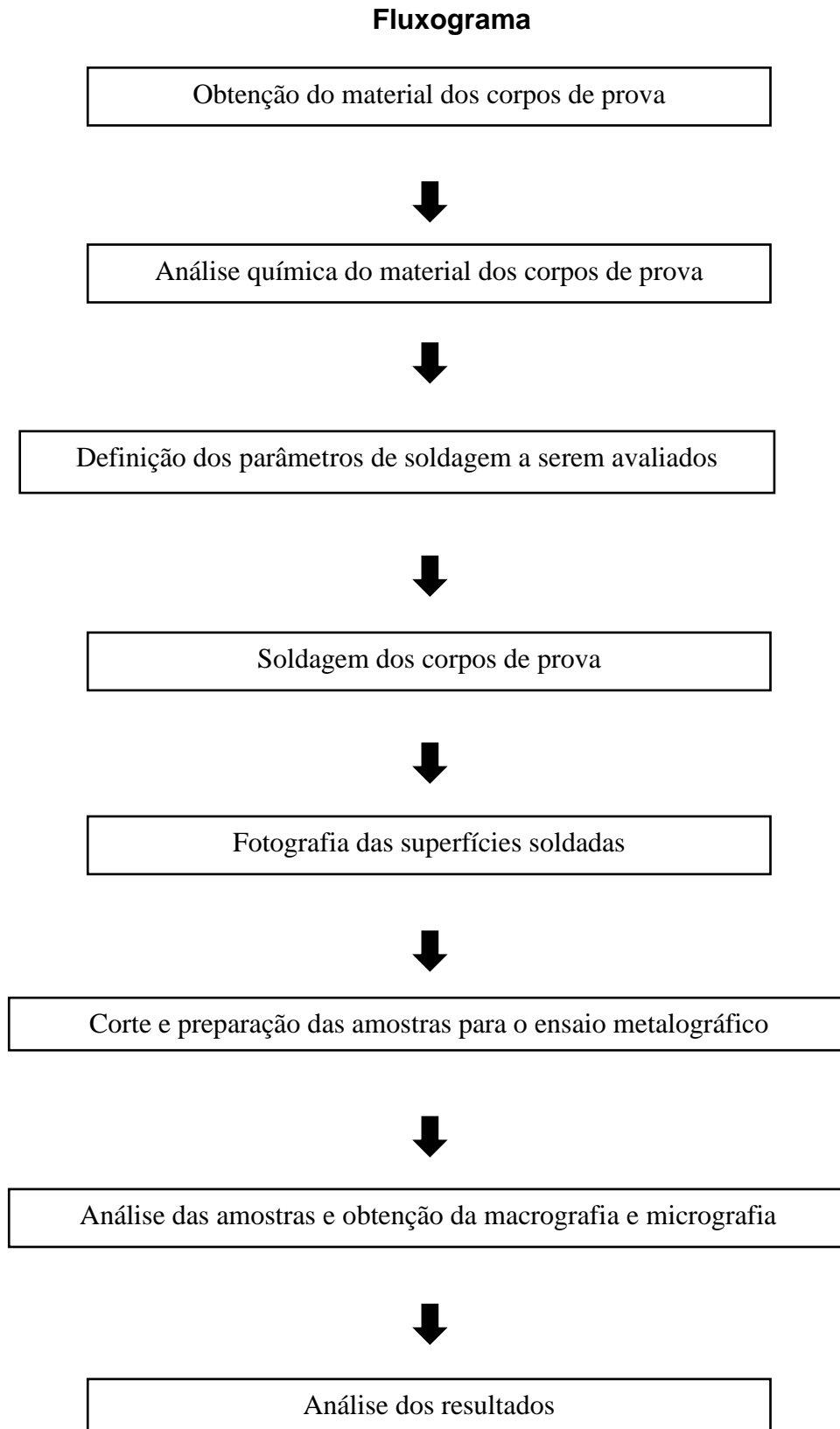
O alumínio e suas ligas, por não serem tão pesados se comparados com outros tipos de metais, são muito utilizados na indústria aeroespacial, aeronáutica e automobilística. Nestas indústrias eles estão presentes em inúmeros elementos de maquinas que são altamente solicitadas termicamente e mecanicamente como: para-choques de automóveis, confecção de fuselagens para aeronaves, componentes de motores de combustão interna, radiadores, embreagens, roldanas e mancais (JÚNIOR, 2014).

O alumínio e suas ligas também está presente na indústria eletroeletrônica e é utilizado na confecção de placas para capacitores eletrolíticos e na fabricação de cabos de transmissão de energia. Na indústria de bebidas eles são utilizados na confecção de recipientes para armazenamento de bebidas e são muito utilizados nas embalagens para transporte e uso doméstico (JÚNIOR, 2014).

Por não ser tóxico e ter uma elevada resistência a corrosão o alumínio também é bastante utilizado na indústria farmacêutica. Enfim, o alumínio mostra-se adequado para uma infinidade de aplicações e também é bastante abundante e indefinidamente reciclável (JÚNIOR, 2014).

## 8 PARTE EXPERIMENTAL

As etapas desenvolvidas neste trabalho podem ser observadas no fluxograma abaixo:

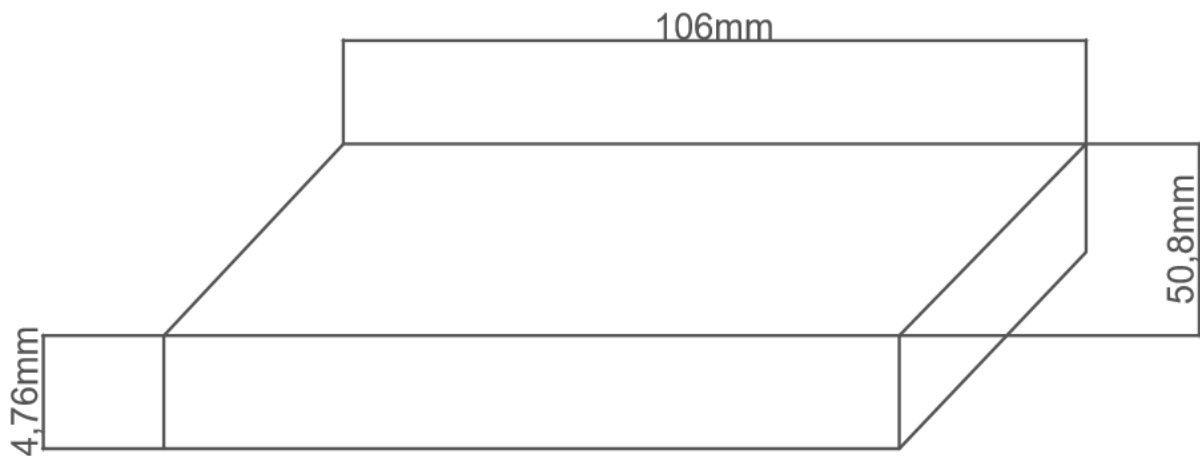




## 8.1 MATERIAIS

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado o Alumínio 6063 e as dimensões determinadas foram: 106mm x 50,8mm x 4,76mm. O material foi fornecido pela empresa Metal Nylon. Para a soldagem foi utilizado um eletrodo de tungstênio com diâmetro de 2,4mm e uma tocha TIG. A Figura 5 mostra um desenho esquemático das dimensões dos corpos de prova usados neste trabalho.

**Figura 5 – Desenho esquemático do corpo de prova.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

## 8.2 METODOLOGIA

Antes de começar a soldagem dos corpos de prova, foi feita a análise química do material que seria soldado. Essa análise tem o objetivo de verificar quais elementos estão presentes na amostra e suas respectivas concentrações. Essa técnica foi realizada pelo equipamento da Oxford Instruments, Foundry-Master Xpert, que está representado na Figura 6.

**Figura 6 – Equipamento utilizado para Análise Química.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Após o material ser analisado quimicamente, o processo de soldagem dos corpos de prova foi realizado. Neste trabalho este processo consiste em sete procedimentos diferentes. Em todos os procedimentos o cordão de solda passou pelo centro da peça e foi iniciado a uma distância de 5 mm da extremidade da mesma. Além disso, antes de iniciar o cordão, o arco elétrico foi mantido em um mesmo local até a formação da poça de fusão, o que pode minimizar a formação de poros no cordão de solda e também pré-aquecer a peça. Esse pré-aquecimento se deve porque o alumínio é um material que tem alta condutividade térmica.

Os procedimentos realizados estão citados a seguir:

- 1º Procedimento: o corpo de prova foi soldado com corrente de 110 A, distância entre o eletrodo e a peça de 2,8 mm e velocidade de 13,7 cm/min.
- 2º Procedimento: o corpo de prova foi soldado com a mesma distância e velocidade do primeiro procedimento, variando apenas sua corrente, usando uma corrente de 120 A.
- 3º Procedimento: o corpo de prova foi soldado com a mesma distância e velocidade do primeiro procedimento, variando apenas sua corrente, usando uma corrente de 100 A.

**Tabela 4 – Procedimentos de soldagem onde variou a corrente de soldagem.**

	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Distância entre eletrodo e a peça (mm)</b>
<b>1º Procedimento</b>	110	13,7	2,80
<b>2º Procedimento</b>	120	13,7	2,80
<b>3º Procedimento</b>	100	13,7	2,80

- 4º Procedimento: o corpo de prova foi soldado com a mesma distância e corrente do primeiro procedimento, variando apenas a velocidade de soldagem, usando uma velocidade de 16,4 cm/min.
- 5º Procedimento: o corpo de prova foi soldado com a mesma distância e corrente do primeiro procedimento, variando apenas a velocidade de soldagem, usando uma velocidade de 19,1 cm/min.

**Tabela 5 - Procedimentos de soldagem onde variou a velocidade de soldagem.**

	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Distância entre eletrodo e a peça (mm)</b>
<b>1º Procedimento</b>	110	13,7	2,80
<b>4º Procedimento</b>	110	16,4	2,80
<b>5º Procedimento</b>	110	19,1	2,80

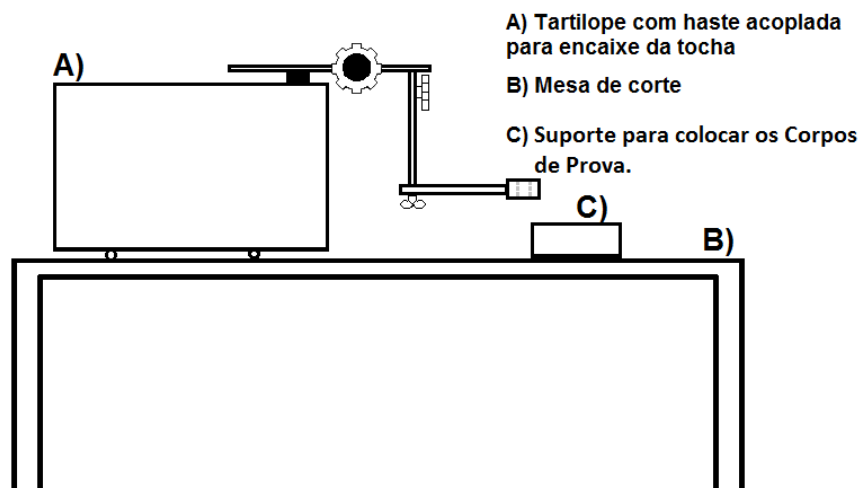
- 6º Procedimento: o corpo de prova foi soldado com a mesma corrente e velocidade do primeiro procedimento, variando apenas a distância entre o eletrodo e a peça, usando uma distância de 1,4 mm.
- 7º Procedimento: o corpo de prova foi soldado com a mesma corrente e velocidade do primeiro procedimento, variando apenas a distância entre o eletrodo e a peça, usando uma distância de 4.2 mm.

**Tabela 6 - Procedimentos de soldagem onde variou a distância entre o eletrodo e a peça.**

	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Distância entre eletrodo e a peça (mm)
<b>1º Procedimento</b>	110	13,7	2,80
<b>6º Procedimento</b>	110	13,7	1,40
<b>7º Procedimento</b>	110	13,7	4,20

O processo de soldagem dos corpos de prova foi mecanizado, para isso foi utilizado uma mesa de aço, um tãrtilope com hastes para o encaixe da tocha e um suporte de aço para apoiar os corpos de prova (Figura 7). A máquina de solda TIG utilizada foi a *Miller Syncrowave 250 DX*, que pode ser observada na Figura 8.

**Figura 7 – Estrutura utilizada para a realização da soldagem.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 8 – Máquina de solda Miller Syncrowave 250 DX.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Após a realização da soldagem dos corpos de prova foi tirado uma fotografia de cada peça para análise do cordão e superfícies soldadas.

### **8.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DAS CHAPAS**

Depois de soldadas as amostras foram levadas para serem avaliadas por meio do ensaio metalográfico. Para preparação dessas amostras, primeiramente elas foram cortadas por uma máquina de corte da Arotec modelo Arocor 80 (Figura 9). Uma imagem do corpo de prova após a realização do corte está representada na Figura 10.

**Figura 9 – Máquina de corte Arocor 80.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 10 – Corpo de prova após o corte.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Em seguida as amostras foram embutidas “à frio” com resina acrílica auto polimerizante. Após esse embutimento realizou-se o processo de lixamento dos corpos de prova, sendo eles lixados com lixas de 120, 240, 320, 400 e 600 mesh respectivamente. Foram utilizadas para esse processo duas lixadeiras modelo 115/60 da Strauers (Figura 11), uma lixadeira modelo PL02E da Soprano (Figura 12) e duas lixadeiras da Arotec modelo Aropol 2V (Figura 13).

**Figura 11 – Lixadeiras modelo 115/60 da Strauers.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 12 - - Lixadeira modelo PL02E da Soprano.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 13 – Lixadeiras Arotec modelo Aropol 2V.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O ataque químico para observar as macrografias dos corpos de prova foi realizado após o lixamento dos mesmos. A solução de Keller, que é composta por 10 ml de ácido fluorídrico, 15 ml de ácido clorídrico concentrado, 25 ml de ácido nítrico concentrado e 50 ml de água destilada, foi utilizada para realizar esse ataque. As imagens obtidas foram fotografadas pelo Endoscópio Snake Inspeção e Câmera de Vídeo, apresentado na Figura 14.

**Figura 14 – Endoscópio Snake Inspeção e Câmera de Vídeo.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor

Depois de observar as macrografias, as amostras foram lixadas novamente, mas passando apenas pela lixa de 600 mesh, e então polidas. O processo de polimento foi realizado em panos com pasta de diamante de 9 $\mu$ m e 3 $\mu$ m respectivamente, usando álcool etílico como lubrificante. A máquina politriz utilizada nesse processo foi a da Strauers modelo DP-10 que está representada na Figura 15.



**Figura 15 – Máquina politriz modelo DP-10 da Strauers.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Após o polimento as amostras sofreram outro ataque químico, mas dessa vez para observar as micrografias. Uma solução de ácido fluorídrico (HF) foi utilizada para esse ataque. As imagens de micrografia então, foram obtidas pelo microscópio modelo IM713 da empresa Kontrol e distribuído pela Fortel Industria e comércio LTDA (Figura 16). Foram utilizados aumento de 100x e 200x para analisar essas micrografias.

**Figura 16 – Microscópio modelo IM713.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

### **8.2.2 AVALIAÇÃO DA ZTA DAS AMOSTRAS**

Com ajuda do software AutoCAD a área da zona fundida em cada corpo de prova foi medida. Sólidos geométricos foram usados para representar essa área e assim obter um valor numérico aproximado para posterior análise.

## 9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 9.1 RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA NO MATERIAL

Três testes são realizados no material e após obter os dados da Análise Química, pode-se observar que o material dos corpos de prova é composto, em sua maioria, por Alumínio. O Silício, Magnésio e Ferro também foram identificados e podem ser considerados, já os outros elementos que foram detectados estão com concentrações tão pequenas que podem ser desconsiderados. A Tabela 8 mostra o resultado dessa análise feita no material.

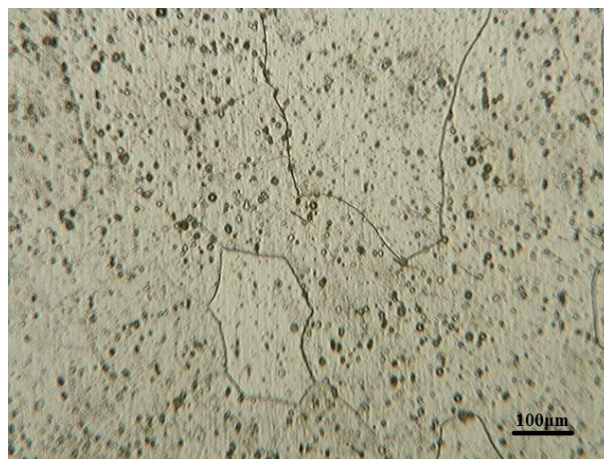
**Tabela 7 – Resultado da análise química do material dos corpos de prova.**

Elemento	Teste 1 (%)	Teste 2 (%)	Teste 3 (%)	Média (%)
<b>Al</b>	98,5	98,1	98,6	98,4
<b>Si</b>	0,508	0,659	0,562	0,573
<b>Fe</b>	0,312	0,273	0,238	0,266
<b>Cu</b>	0,0327	0,0644	0,0292	0,0384
<b>Mn</b>	0,0644	0,0634	0,0722	0,0674
<b>Mg</b>	0,393	0,392	0,424	0,407
<b>Zn</b>	0,0519	0,114	0,0146	0,048
<b>Cr</b>	0,0086	0,0089	0,0061	0,0074
<b>Ni</b>	0,0047	0,0164	0,0032	0,0067
<b>Ti</b>	0,0263	0,0258	0,0223	0,0276

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A micrografia do metal base, alumínio 6063 “in natura”, pode ser observada na Figura 17.

**Figura 17 – Micrografia do alumínio “in natura” usado nos corpos de prova.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

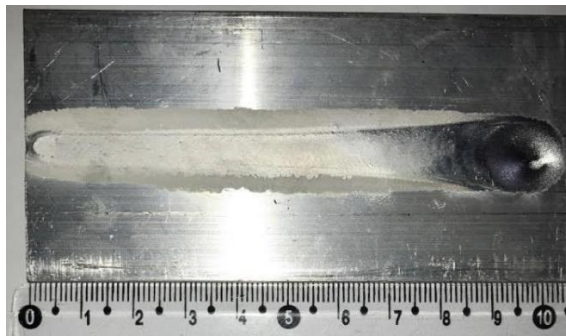
Observa-se na imagem alguns grãos bem definidos, um grão de aparência maior do que outro e alguns precipitados, que pode ser dos constituintes do material. O ataque parece não ter sido muito eficaz porque os contornos de grão não estão bem visíveis.

## 9.2 RESULTADO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Depois de realizado os sete procedimentos de soldagem, cada corpo de prova foi fotografado para análise da superfície soldada. As Figura 18 a 20 mostram as fotografias das superfícies soldadas.

**Figura 18 - Superfícies soldadas dos corpos de prova onde houve variação de corrente.**

**a) CP1, b) CP2, c) CP3.**



(a)



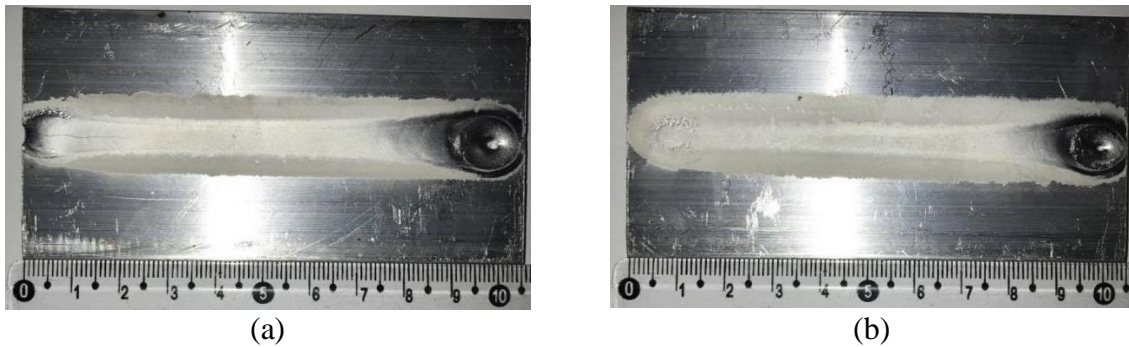
(b)



(c)

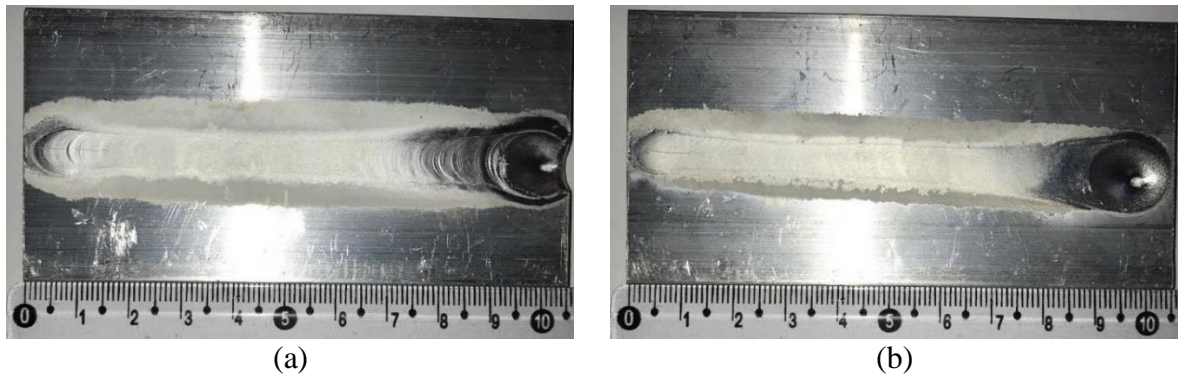
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 19 - Superfícies soldadas dos corpos de prova onde houve variação de velocidade.  
a) CP4, b) CP5.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 20 - Superfícies soldadas dos corpos de prova onde houve variação da distância.  
a) CP6, b) CP7.**



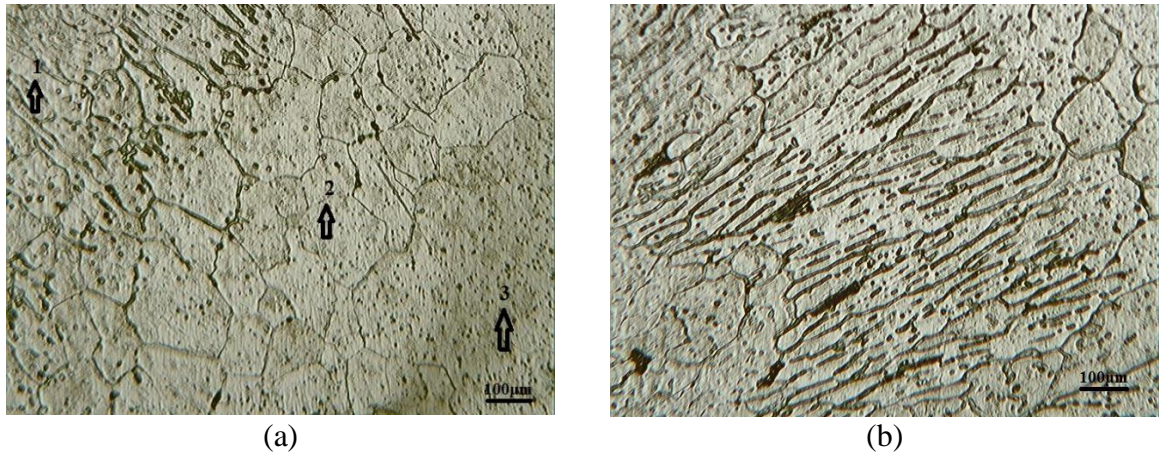
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Pela análise das superfícies soldadas não foi possível observar mudanças significativas nos cordões de solda de cada corpo de prova. A solda não apresentou porosidades e também não houve o aparecimento de trincas de solidificação. Isso se deve pelo pré-aquecimento da peça e por usar um gás inerte como proteção, nesse caso o argônio. A soldagem foi realizada da esquerda para a direita. Além disso, observa-se uma camada cinzenta de óxido em volta do cordão em todos os corpos de prova. Percebe-se que no final do cordão há uma maior profundidade, o material nesse ponto fundiu mais devido ao aumento da temperatura naquela região.

### 9.3 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

As micrografias obtidas pelo ensaio metalográfico do material dos corpos de prova estão apresentadas nas Figuras 21 e 22.

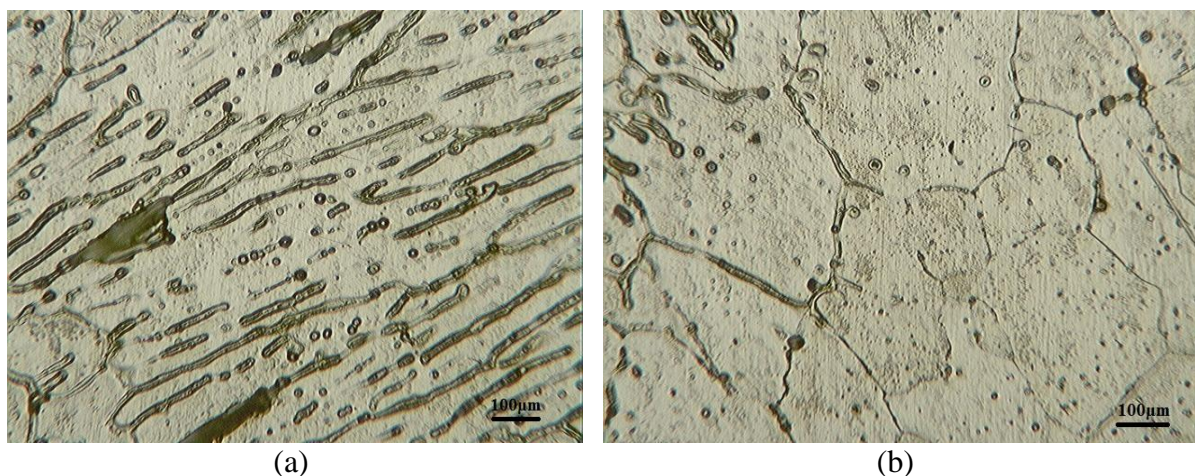
**Figura 21 – Micrografias com aumento de 100x.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A Figura 21 (a) apresenta uma imagem que representa a transição entre três regiões, sendo a zona fundida a região de número 1, a ZTA número 2 e o metal base número 3. Observa-se que na ZTA ocorre o fenômeno de crescimento de grão, grãos grosseiros foram formados devido ao aquecimento do material. Na Figura 21 (b) pode-se observar a região de zona fundida, onde precipitados foram formados e combinados com o alumínio formando os eutéticos na região de contorno de grão, além disso, nota-se que os grãos são menores quando comparados com os grãos localizados na ZTA.

**Figura 22 – Micrografias com aumento de 200x.**



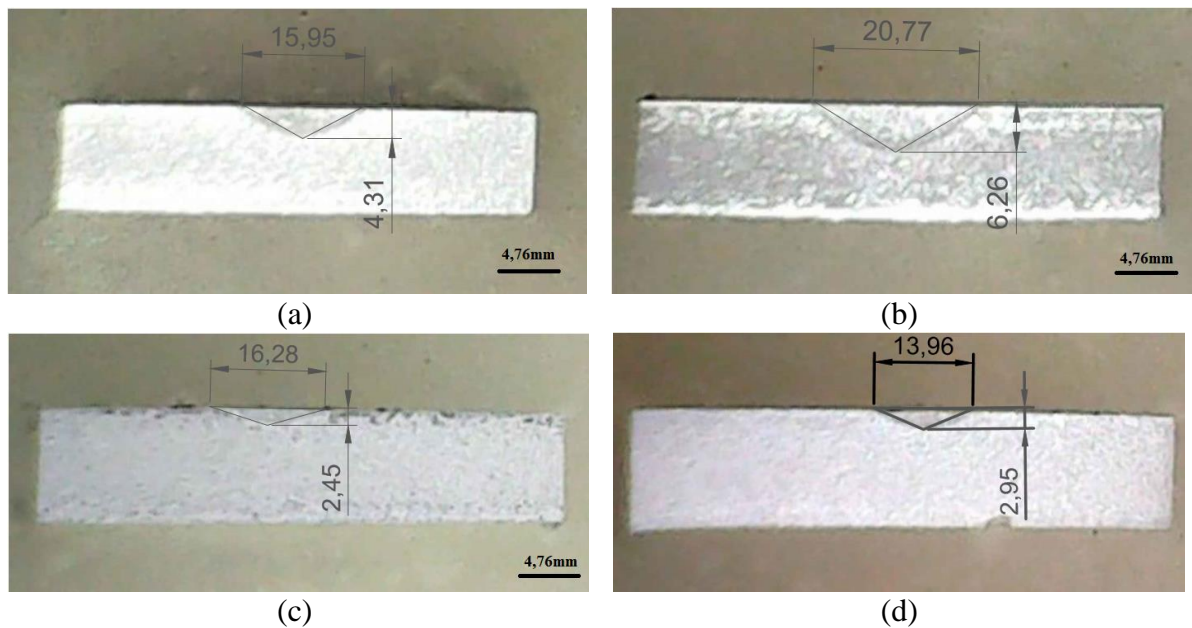
Fonte: Produzido pelo próprio autor

A Figura 22 (a) representa a zona fundida, foi possível observar com maior aproximação os eutéticos formados nos contornos de grãos e a Figura 22 (b) a saída da zona fundida, onde aparecem alguns eutéticos, para a entrada na ZTA, onde começa a aparecer grãos mais

grosseiros e contornos de grãos mais bem definidos. Percebe-se que os grãos na ZTA estão mais organizados e são maiores que os grãos no metal base.

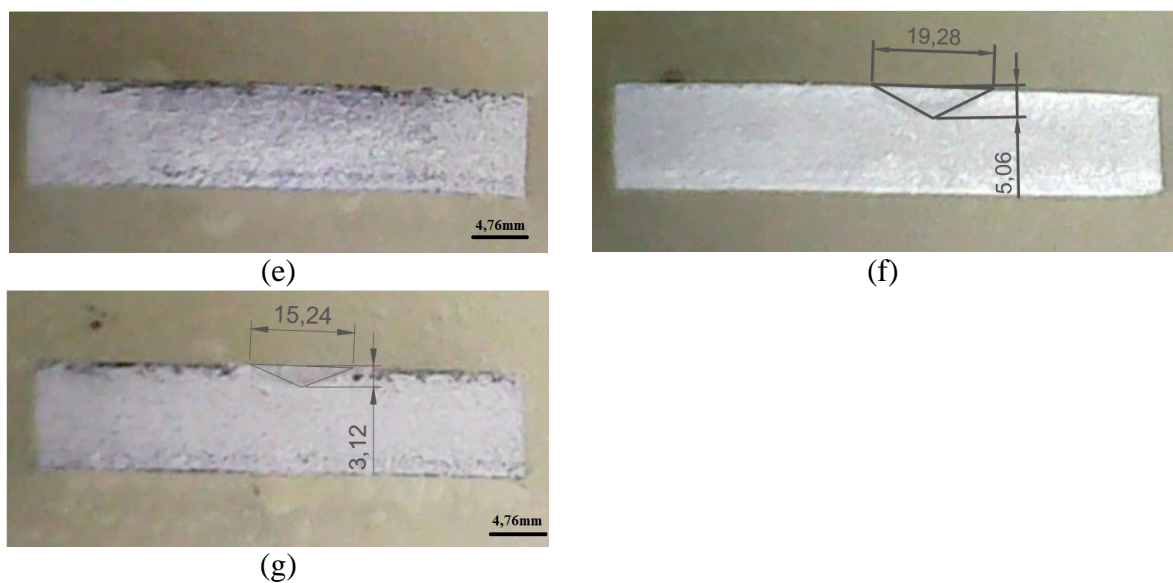
As imagens de macrografia do material dos corpos de prova podem ser observadas nas Figuras 23 e 24.

**Figura 23 – Imagens de macrografia dos corpos de prova. a) CP1, b) CP2, c) CP3, d) CP4.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 24 – Imagem de macrografia dos corpos de prova. e) CP5, f) CP6, g) CP7.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Com essas imagens de macrografia foi medida a área relativa a zona fundida em cada amostra. Com esses valores de área é possível observar qual a influência que as variáveis de soldagem usadas neste trabalho têm sobre a região fundida. O software AutoCAD foi utilizado para realizar os cálculos de área, foi criado sólidos geométricos que representam de uma forma mais aproximada o tamanho da zona fundida, observa-se que o triângulo foi a figura geométrica utilizada.

Antes de calcular a área, foi calculado o fator de escala que é o tamanho do corpo de prova medido a mão dividido pelo tamanho do corpo de prova medido pela tela do computador, para obter um valor mais próximo do real. Portanto, os valores que aparecem nas imagens foram multiplicados por esse fator para, assim, realizar os cálculos de área.

O fator de escala calculado foi 0,25, a área do triângulo, figura geométrica usada, pode ser obtida pela fórmula:

$$A = \frac{b \cdot h}{2} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

A (mm<sup>2</sup>) = área;

b (mm) = base;

h (mm) = altura.

A partir dessa fórmula a área de cada triângulo foi calculada e os resultados estão representados na Tabela 9 abaixo. É importante ressaltar que esses valores são uma aproximação do valor real e foram mensurados a olho nu, sendo assim deve-se considerar possíveis erros de medição.



**Tabela 8 – Área aproximada da zona fundida em cada corpo de prova.**

	Área (mm <sup>2</sup> )
<b>CP1</b>	2,153
<b>CP2</b>	4,063
<b>CP3</b>	1,247
<b>CP4</b>	1,287
<b>CP5</b>	N/A
<b>CP6</b>	3,049
<b>CP7</b>	1,490

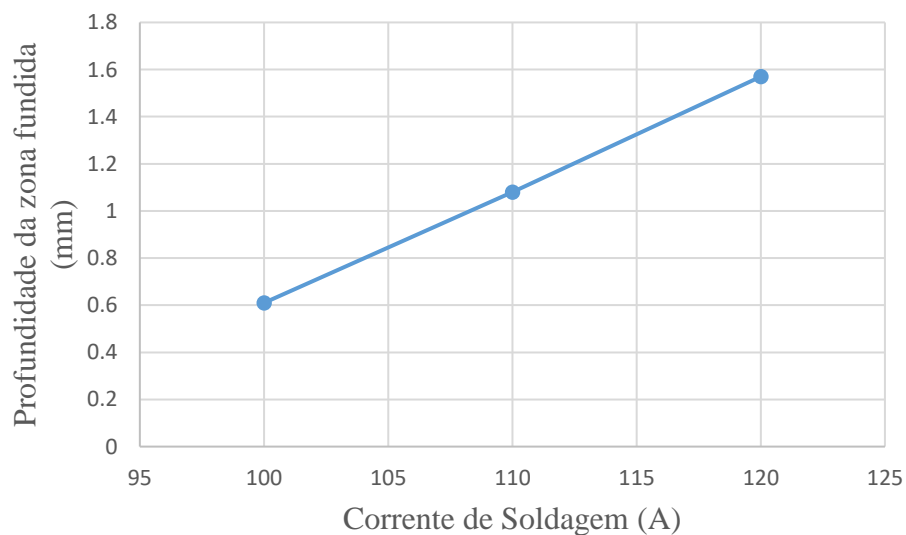
Fonte: Produzido pelo próprio autor

Observa-se que o CP5 não tem uma área relativa a zona fundida. Isso pode ter acontecido porque a velocidade de soldagem utilizada nessa amostra foi a maior, a passagem do arco elétrico pela peça foi tão rápida que pouca energia foi depositada na peça e não foi possível observar a formação de uma zona termicamente afetada nesse corpo de prova.

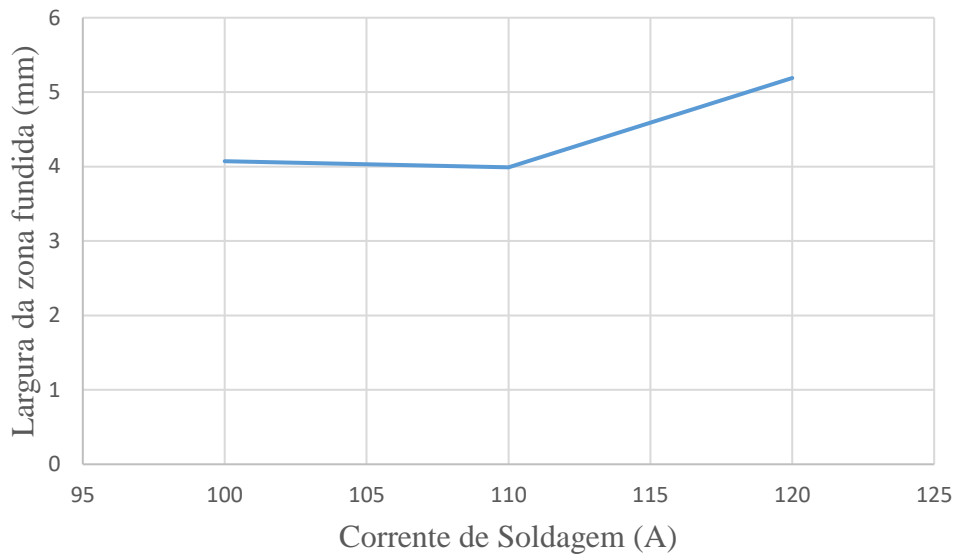
As imagens de macrografia revelam que as variáveis usadas para a soldagem dos corpos de prova influenciam tanto na largura quanto na profundidade do cordão.

As Figuras a seguir mostram os gráficos onde aparece a relação dos parâmetros de soldagem que foram variados neste trabalho com a profundidade da zona fundida.

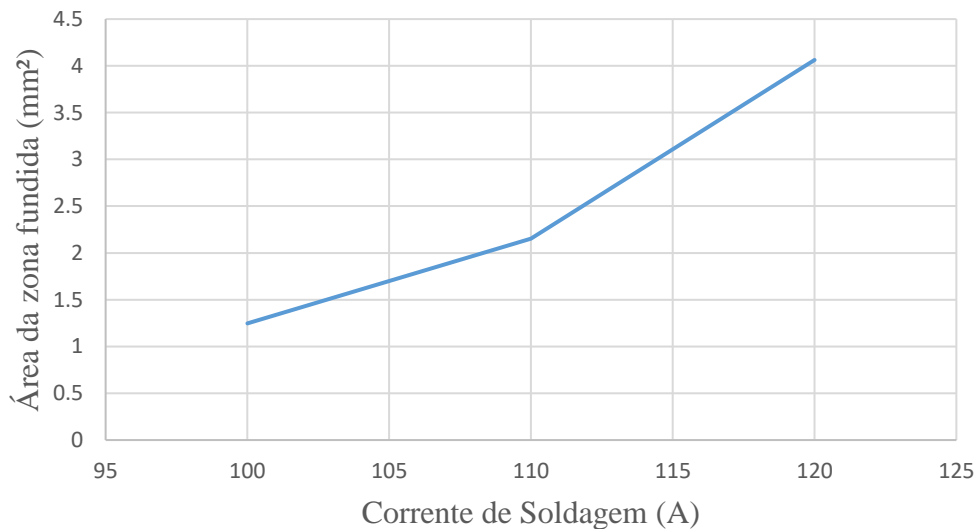
**Figura 25 - Gráfico de Corrente de Soldagem x Profundidade da zona fundida.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 26 - Gráfico de Corrente de Soldagem x Largura da zona fundida.**

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

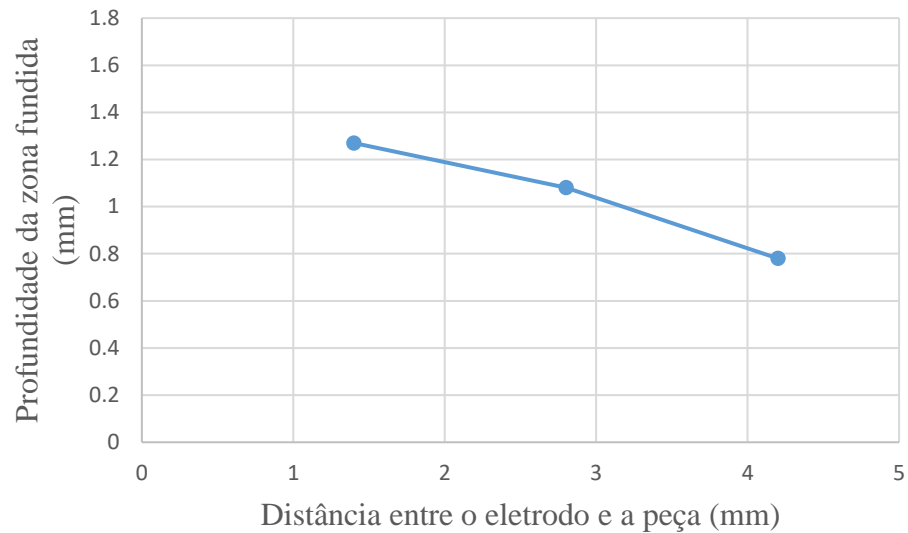
**Figura 27 - Gráfico de Corrente de Soldagem x Área da zona fundida.**

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A corrente de soldagem é diretamente proporcional a profundidade da zona fundida. Quando se aumenta a corrente mais profundo será o alcance da zona fundida e vice-versa. Isso ocorre, porque o fluxo de corrente é o responsável pela energia de soldagem necessária para formar a poça de fusão, além de controlar a magnitude e a distribuição da energia térmica no arco elétrico, portanto uma maior corrente confere maior energia para a peça, assim a zona fundida

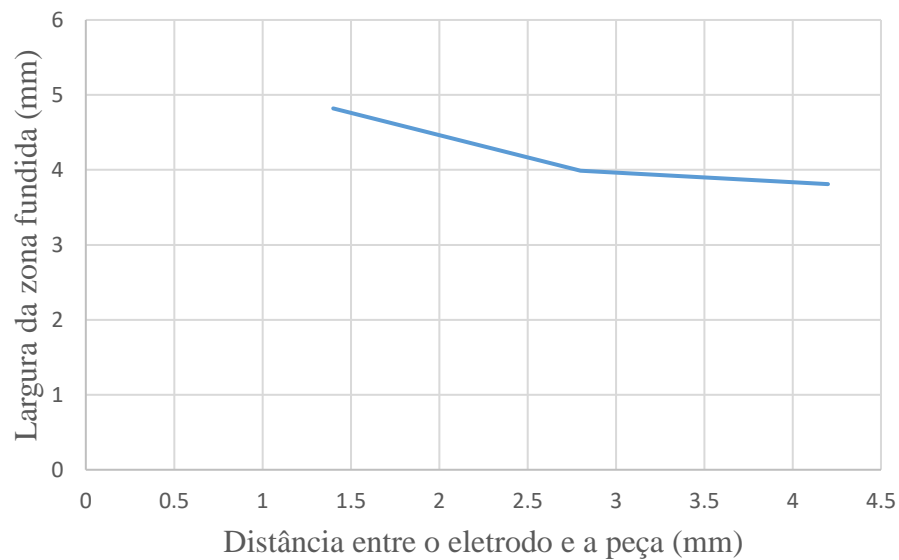
será maior. Pode-se perceber que quando há um aumento de 10% na corrente de soldagem a profundidade quase dobra de tamanho, ou seja quase um aumento de 100%.

**Figura 28 - Gráfico da Distância entre o eletrodo e a peça x Profundidade da zona fundida.**



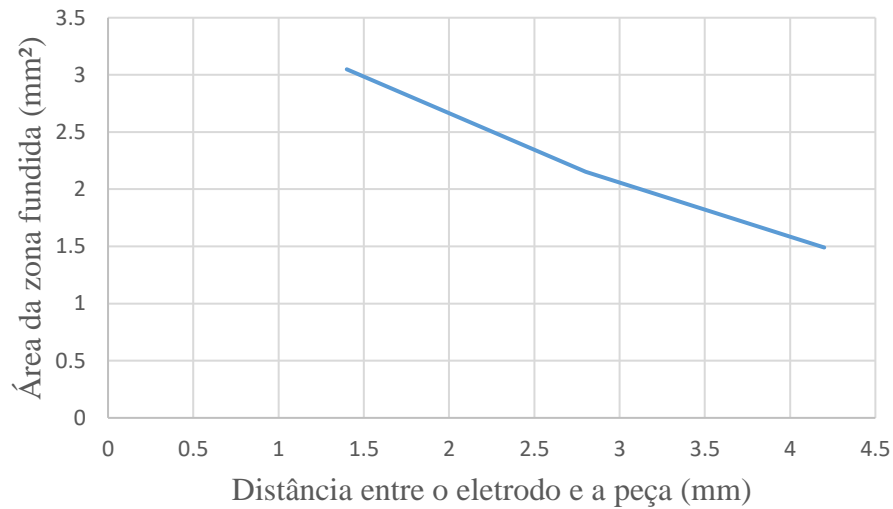
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 29 - Gráfico da Distância entre o eletrodo e a peça x Largura da zona fundida.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

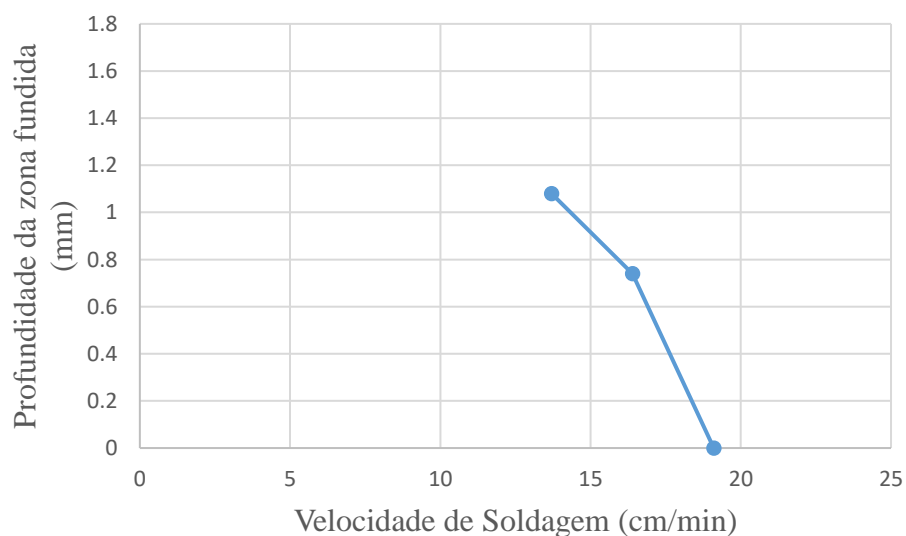
**Figura 30 - Gráfico da Distância entre o eletrodo e a peça x Área da zona fundida.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

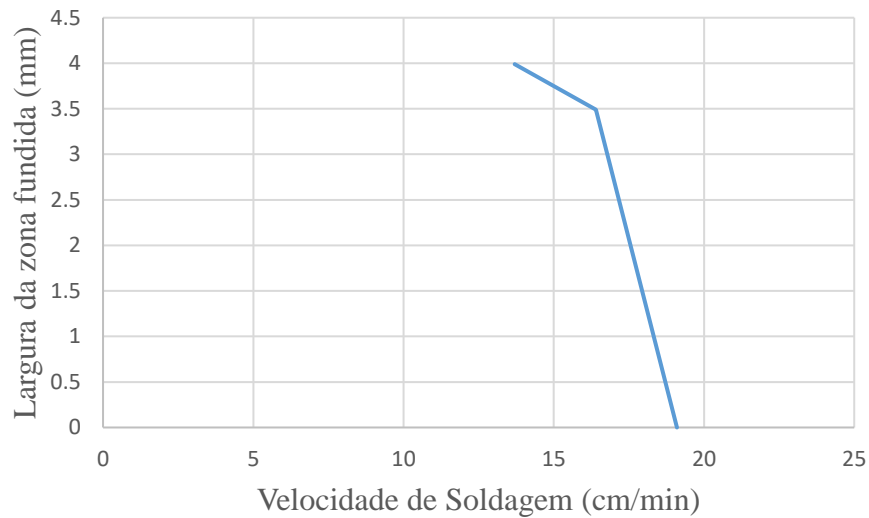
A distância do eletrodo para a peça é inversamente proporcional a profundidade da zona fundida. Quanto mais distante o eletrodo fica da peça menor será a profundidade da zona fundida e quanto mais perto mais profundo. A medida que o eletrodo se distancia da peça, a temperatura máxima atingida diminui, portanto menos calor é aplicado no material e, com isso, a região da zona fundida diminui e a profundidade alcançada é menor.

**Figura 31 - Gráfico de Velocidade de Soldagem x Profundidade da zona fundida.**



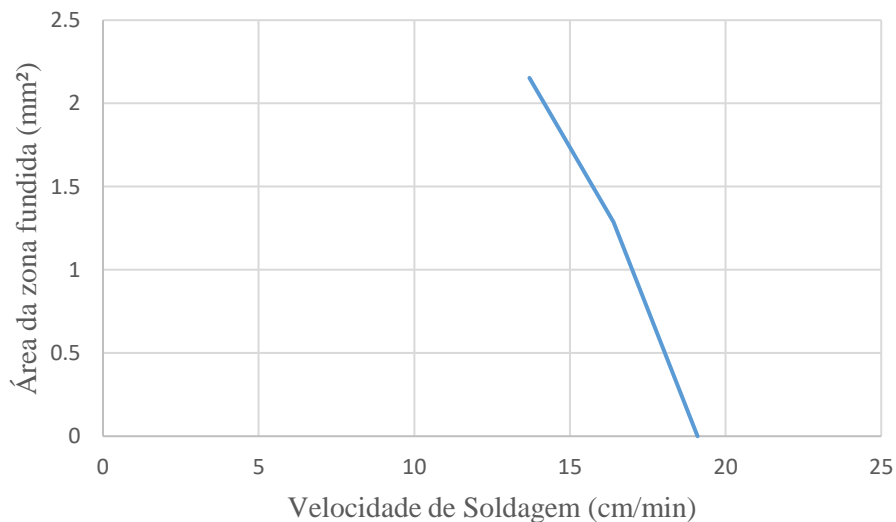
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 32 - Gráfico de Velocidade de Soldagem x Largura da zona fundida.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

**Figura 33 - Gráfico de Velocidade de Soldagem x Área da zona fundida.**



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Assim como a distância entre o eletrodo e a peça, a velocidade de soldagem é inversamente proporcional a profundidade da zona fundida. O aumento da velocidade diminui a profundidade da zona fundida. Quando a soldagem ocorre com uma velocidade mais rápida, o arco elétrico passa rápido pela peça gerando pouca energia sobre a mesma e, com isso, atingindo temperaturas não muito elevadas. Isso pode levar até o não aparecimento de zona fundida no corpo de prova, como aconteceu em um procedimento neste trabalho.

Analisando os três gráficos apresentados, percebe-se que o parâmetro que mais influenciou na área da zona fundida foi a velocidade de soldagem, variando esse parâmetro a queda no tamanho da região fundida foi muito grande, chegando até a não formação da mesma. A variação da corrente de soldagem foi linear e pode-se considerar que dos parâmetros analisados é o segundo que mais tem influência na zona fundida. A distância entre o eletrodo e a peça foi a variável que teve menor impacto das consideradas neste trabalho. É possível afirmar que mesmo a uma distância grande, sem extinguir o arco elétrico, pode haver a formação de zona fundida, basta controlar os outros parâmetros, como aumentar a corrente e usar uma velocidade mais baixa.

## 10 CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados obtidos e em suas análises foram obtidas as seguintes conclusões:

- A soldagem TIG se mostrou bastante eficaz na soldagem do alumínio, material utilizado no trabalho;
- Por processos que utilizam gás inerte como proteção, o alumínio pode ter uma boa soldabilidade;
- A corrente de soldagem está diretamente relacionada com a área da zona fundida, quanto maior a corrente maior será a zona fundida. Mantendo velocidade e distância constantes;
- O aumento da velocidade de soldagem diminui a área da zona fundida, portanto são inversamente proporcionais. Mantendo corrente e distância constantes;
- Quanto maior a distância do eletrodo para a peça, menor será a zona fundida. Mantendo corrente e velocidade constantes;
- O parâmetro que mais influenciou na zona fundida é a velocidade de soldagem;
- Após a soldagem, é na zona fundida onde há a formação da maior quantidade de eutéticos;
- É na ZTA onde pode-se observar o crescimento e organização dos grãos;
- Sabendo variar os parâmetros de soldagem, o processo mecanizado mostrou-se bastante eficiente para este tipo de trabalho.

## 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anon., 2016. *Olho na Web*. [Online]

Available at: <http://www.olhonaweb.net/soldagem-tig-para-profissionais/>

[Acesso em 6 Maio 2016].

Barbosa, C., 2014. *Metais não ferrosos e suas ligas: Microestrutura, propriedades e aplicações*. 1ª ed. Rio de Janeiro: E-papers.

Bracarense, A. Q., 2000. *Processo de Soldagem TIG - GTAW*. Belo Horizonte: s.n.

Buzinelli, D. V., 2000. *DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS*. São Carlos: s.n.

Cary, H. B. & Helzer, S. C., 2005. *Modern Welding Technology*. 6ª ed. Columbus: Pearson Prentice Hall.

Dos Santos, F. J., 2009. *SOLDAGEM DE ALUMÍNIO: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PULSO*. Bauru: s.n.

Gibson, G. J. & Rothschild, G. R., 1948. The effects of DC component in AC inert-gas-arc welding of aluminum. *Welding Journal*, p. 496.

Guile, A. E., 1970. Arc cathode and anode phenoma. *International Institute of Welding*.

Guile, A. E. & Juttner, B., 1980. Basic erosion processes of oxidized and clean metal cathodes by eletric arcs. *IEEE trans. Plasma Sci*, September, pp. 259-269.

Júnior, M. J. D. A., 2014. *Produção de Nanopartículas de Silício Embebidas em uma Matriz de Alumínio via Técnica de Melt Spinner*. Porto Alegre: s.n.

Juttner, B., 2001a. Characterization of the cathode spot. *IEEE trans. On Plasma Science*, Outubro, pp. 474-479.

Marques, P. V., Modenesi, P. J. & Bracarense, A. Q., 2005. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG.

McKelliget, J. & Szekely, J., 1986. Heat Transfer and Fluid Flow in the Welding Arc. *A Metallurgical Transactions*, pp. 1139-1148.

Mello, S. R., Souza, C. O. & Citeli, N. L., 2009. *ALumínio e Suas Ligas*. Rio de Janeiro: s.n.

Modenesi, P. J., 1990. *Statistical modelling of the narrow gap gas metal arc welding process*. England: s.n.



Modenesi, P. J., 2007. *Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. Belo Horizonte: s.n.

Modenesi, P. J. & Bracarense, A. Q., 2012. *Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. Belo Horizonte: s.n.

Monteiro de Souza Costa, M. C., 2006. *Fenômenos de Instabilidade do Arco na Soldagem GMAW com Gases de Baixo Potencial de Oxidação*. s.l.:s.n.

Pattee, H. E., Anno, J. N. & Randall, M. D., 1968a. Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc. *Welding Journal Research Supplement*, Abril, p. 12.

Pumphrey, W. I., 1955. Researches into the welding of aluminum and its alloys. *Aluminum Development Association Report*, Julho.

Rick, C. F., 2006. *ESTUDO DA LIGA À BASE DE Zn-Al-Cu-Mg APLICADA NA FABRICAÇÃO DE JÓIAS FOLHADAS*. Porto Alegre: s.n.

Scheid, A., 2010. *Diagramas de Fase*. Curitiba: s.n.

Tarng, Y. S., Tsai, H. L. & Yeh, S. S., 1999. Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 9 Setembro, pp. 1427-1438.