



INSTITUTO FEDERAL
Santa Catarina

Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS LAGES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Vinicius Bet Reis

Influência do ângulo de afiação do eletrodo no processo de soldagem TIG

LAGES
2022

Vinicius Bet Reis

Influência do ângulo de afiação do eletrodo no processo de soldagem TIG

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa
Catarina como requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica
Orientador: Julio Azambuja da Silveira, (Mestre)

Lages
2022

Vinicius Bet Reis

Influência do ângulo de afiação do eletrodo no processo de soldagem TIG

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Lages, 16 de dezembro de 2022.

Prof. Natalia Boelter, Bela.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Julio Azambuja da Silveira, M.e.
Orientador(a)
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

Alisson Fernandes da Rosa, M.e.
Avaliador(a)
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Teran Muhl, M.e.
Avaliador(a)
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

A todos os meus colegas de curso, pela oportunidade do convívio e pela cooperação mútua durante estes anos.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Lages e o seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino e que tanto colaborou nos momentos de dificuldade, no desenvolvimento dos meus estudos e deste trabalho

Segue lista de docentes e colaboradores que auxiliaram para o desenvolvimento deste trabalho:

- ⇒ Ariton Araldi
- ⇒ Alisson Fernandes da Rosa
- ⇒ Eduardo Esmerio
- ⇒ Marlon Fillipe
- ⇒ Rafael Schreiber
- ⇒ Ricardo Muhl
- ⇒ Rogério da Silva
- ⇒ Vilma Karsbug

Agradeço também aos docentes colaboradores que não mencionei, mas que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica e sempre se dispuseram à auxiliar em quaisquer que fossem as minhas necessidades.

Ao Laboratório de Ecologia do Solo (Centro de Ciências Agroveterinárias - UDESC Lages) pelo uso do sistema fotográfico.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, meu muito obrigado.

RESUMO

A aplicação da solda TIG vem sendo realizada principalmente onde se necessita de soldagem específicas. No entanto, para que o cordão de solda saia como previsto nestas aplicações, é necessário que todos os parâmetros sejam bem controlados. E um dos parâmetros que pode gerar influência é o ângulo de afiação do eletrodo. Existem estudos visando entender a variação desse parâmetro, mas estes utilizam energia de soldagem alta. Assim, este trabalho tem como intuito compreender melhor qual é a influência deste ângulo no cordão de solda com baixa energia de soldagem. Para tal, foram realizados experimentos onde o único parâmetro variado foi o ângulo de afiação do eletrodo. Os outros parâmetros foram controlados por um braço robótico, gabaritos e fonte de energia regulável. Além disso, as análises macrográficas foram realizadas por meio do *software* ImageJ, que possibilitou a análise e medição da geometria dos cordões de solda feitas em microscópio. As análises demonstraram que para soldagens com pouca potência, a variação de profundidade e largura em função do ângulo de afiação do eletrodo, existem, mas são pequenas, na ordem centesimal.

Palavras chave: Macrografia. ImageJ. GTAW.

ABSTRACT

The application of TIG welding has been carried out mainly where specific welding is required. However, for the weld bead to come out as expected in these applications, it is necessary that all parameters are well controlled. And one of the parameters that can generate influence is the angle of sharpening of the electrode. There are studies aiming to understand the variation of this parameter, but these use high welding energy. Thus, this work aims to better understand the influence of this angle on the weld bead with low welding energy. For this, experiments were carried out where the only variable parameter was the electrode sharpening angle. The other parameters were controlled by a robotic arm, jigs and adjustable power source. In addition, the macrographic analyzes were carried out using the *ImageJ software*, which allowed the analysis and measurement of the geometry of the weld beads made under a microscope. The analyzes showed that for welding with low power, depth and width variations as a function of the electrode sharpening angle exist, but are small, in the centesimal order.

LISTA DE FIGURAS

Figura - Soldagem TIG.....	2
Figura - Dimensões e regiões de solda de topo	3
Figura - Seção transversal demonstrando as zonas de uma junta soldada	4
Figura -Demonstração dos ângulos de ataque e trabalho e altura entre a ponta do eletrodo e o metal base (la).....	5
Figura – Distância do ponto de tomada de corrente à peça (h), stickout (s) e altura entre a ponta do eletrodo e o metal base (la).....	5
Figura - Esquema simplificado dos equipamentos necessários para o processo TIG .	6
Figura - Ilustração do fluxo de elétrons, íons positivos e penetração por soldagem com corrente contínua de polaridade direta.....	7
Figura - Ilustração do fluxo de elétrons, íons positivos e penetração por soldagem com corrente contínua de polaridade reversa	8
Figura Representação simplificada das direções dominantes de fluxo de calor nas diferentes regiões do arco	9
Figura Relação entre a penetração e as variáveis primárias de soldagem.....	9
Figura Curvas esquemáticas de variação da tensão superficial com a temperatura em um metal líquido. (A) Material de alta pureza e (B) material contaminado com um elemento tenso-ativo.	11
Figura Fluxo de metal líquido induzido na poça de fusão para (a) Material de alta pureza e (b) material com elemento tenso-ativo.....	11
Figura Ângulo de afiação (ϑ).....	12
Figura Recomendação geral para afiação do eletrodo de tungstênio	12
Figura Efeito do ângulo de afiação no formato e na densidade de distribuição da energia. (a) ϑ menor gera arco com diâmetro maior. (b) ϑ menor = densidade de energia menor (c) ϑ maior gera arco com diâmetro menor. (d) ϑ maior = densidade de energia maior.	13
Figura - Montagem 1 - Dispositivo de afiação montado.....	14
Figura – (a) Vista explodida do dispositivo de afiação; (b) Dispositivo de afiação encaixado na esmerilhadeira angular.....	15
Figura – Subconjunto 1.1 - Encaixe do dispositivo de afiação para esmerilhadeira angular	16

Figura – Subconjunto 1.2 – (a) Medidas chapa metálica; (b) Vista real do subconjunto	16
Figura – Detalhamento de gabaritos de (a) afiação e (b) posicionamento do eletrodo na tocha e no metal base	17
Figura - Componente 2 - Suporte para tocha TIG.....	18
Figura - Suporte do braço robótico.....	18
Figura - Medidas dos corpos de prova	19
Figura – Montagem - Tocha TIG presa ao suporte	19
Figura – Submontagem .1 - Suporte para tocha TIG presa ao robô.....	20
Figura - Ajuste do ângulo de trabalho	20
Figura – Ajuste dos parâmetros (a) stickout (b) comprimento de arco	21
Figura - Estação de trabalho para realização dos testes	22
Figura - Cortes transversais.....	23
Figura – Seccionamento da região de interesse.....	23
Figura - Faces das seções reduzidas coladas e embutidas.....	24
Figura - Captação das imagens digitais.....	25
Figura - Eletrodos afiados $\vartheta =$ (a) 30°; (b) 60°; (c) 90°; (d) 120°; (e) 150° e (f) 180°	25
Figura - Corpos de prova soldados com eletrodos de $\vartheta =$ (1) 30°; (2) 60°; (3) 90°; (4) 120°; (5) 150°; (6) 180°.....	26
Figura - Amostras embutidas	26
Figura - Lâmina milimetrada.....	28
Figura - Imagem com zoom entre a zona fundida e zona termicamente afetada	28
Figura – Tratamento de imagens (a)Aumento do contraste e ajuste do brilho da imagem; (b)conversão para preto e branco; (c)inversão de tons	29
Figura – Ajuste da rotação (a) antes e (b) depois	30
Figura - Amostra 1 - $\vartheta=30^\circ$	31
Figura - Amostra 3 - $\vartheta = 90^\circ$	31
Figura - Amostra 5 - $\vartheta = 150^\circ$	32
Figura - Relação entre penetração do cordão de solda, adição de elementos tensoativos e ângulo de afiação do eletrodo encontrada por Key; Savage; Spiller; Glickstein; APUD Shiralli e Mills (1993).....	34
Figura - Profundidade/Largura.....	35

Figura - Delimitação dos pontos de interesse.....	36
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Cronograma de Realização.....	14
Tabela 2 - Composição química do aço carbono ASTM G10450	19
Tabela 3 - Energia de soldagem	27
Tabela 4 - Dados encontrados nos cordões de solda das amostras	32
Tabela 5 - Diferença entre as medidas do cordão de solda das amostras.....	32

SIMBOLOGIA

GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
Al	Alumínio
Se	Selênio
Ti	Titânio
Mn	Manganês
Si	Silício
S	Enxofre
O	Oxigênio
H	Energia de soldagem (J/cm)
TS	Tensão de soldagem (V)
I	Corrente de soldagem (A)
V	Velocidade de soldagem (cm/min)
J	Joule
V	Volt
A	Ampere
cm	Centímetros
min	Minutos
D	Diâmetro
∂_r	Ângulo de afiação recomendado
∂	Ângulo de afiação
l_a	Distância entre a ponta do eletrodo e o metal base
h	Distância do ponto de tomada de corrente à peça
s	Stickout
p	Penetração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS	1
1.1.1	Objetivo Geral.....	1
1.1.2	Objetivos Específicos	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	SOLDAGEM	2
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM	4
2.2.1	História da Soldagem	4
2.2.2	Fundamentos da Soldagem TIG/GTAW	4
2.2.3	Equipamentos utilizados na soldagem TIG.....	6
2.2.4	Características Elétricas	7
2.3	GTAW AUTÓGENO – GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA	8
2.3.1	Influncia dos parâmetros elétricos	8
2.3.2	Influncia da composição do metal base	10
2.3.3	Influência do eletrodo.....	11
3	MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS	14
3.2	CONFECÇÃO DOS DISPOSITIVOS AUXILIARES	14
3.2.1	Dispositivo para afiação e montagem do eletrodo	14
3.2.2	Dispositivo de suporta para a tocha	17
3.3	REALIZAÇÃO DOS TESTES PROPOSTOS.....	18
3.3.1	Preparação dos corpos de prova	18
3.3.2	Preparação do robô para realização dos testes.....	19
3.3.3	Realização dos testes.....	21
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	22
3.4.1	Preparação e análise das amostras.....	22

4	Resultados e discussão	25
4.1	Validação dos resultados	26
4.2	ANLISE DOS RESULTADOS	30
5	CONCLUSÃO.....	36
	APÊNDICE A – Afição dos Eletrodos de Tungstênio	38
	APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO BRAÇO ROBÓTICO	39

1 INTRODUÇÃO

A geometria do cordão de solda trata-se de um aspecto determinante nas características mecânicas de uma união soldada ao arco elétrico (HIBBELER, 2009). Alguns estudos, como (SHIRALLI, 1993; KEY 1980) analisam essa geometria a partir de uma taxa entre largura e penetração de solda, embora a análise individual desses parâmetros possa ser considerada importante, seja para especificar requisitos de espessura, seja para especificar requisitos de chanfro.

Aspectos intrínsecos não apenas ao processo empregado, mas ao metal de base também influenciam no resultado e desempenho em serviço (MARQUES et al., 2011). De acordo com os estudos, a geometria do eletrodo de tungstênio afeta o formato e a densidade da distribuição da energia do arco elétrico. (KOU, 2003). Uma análise mais criteriosa a respeito da influência do ângulo de afiação do eletrodo TIG, portanto, envolve uma definição adequada do corpo de prova. Considerando a influência tensoativa de alguns elementos químicos como oxigênio e enxofre (SHIRALLI, 1993), o emprego de um aço carbono baixa liga demonstra ser pertinente.

Talvez pela conveniência de se obter medições em cordões de maior seção transversal, grande parte dos estudos encontrados (SHIRALLI, 1993; SUNAMOTO et al., 2019; KEY, 1989) empregam parâmetros de soldagem com elevados níveis de energia. Efeitos adversos, como distorção térmica e transformação de fases indesejadas, no entanto, limitam os níveis de aquecimento, em especial em materiais com teores de carbono mais elevados e susceptíveis a fragilização por têmpera como o AISI 1045.

Com o intuito de preencher as lacunas supracitadas o objetivo geral desse trabalho é avaliar a influência do ângulo de afiação do eletrodo na largura e penetração da solda TIG em baixa potência.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do ângulo de afiação do eletrodo na largura e penetração da solda TIG em baixa potência

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir aspectos metodológicos: dispositivos e parâmetros de teste experimentais;
- Analisar por meio de macrografia a geometria do cordão de solda gerado pelo processo de soldagem GTAW autógeno variando somente o ângulo de afiação do eletrodo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta secção serão apresentados conceitos e estudos pertinentes ao processo de soldagem TIG, os quais influenciam colaboram para a escolha e metodologia, bem como na análise e compreensão dos resultados obtidos.

2.1 SOLDAGEM

No universo de processamento de materiais, onde se necessita realizar a fabricação, ou ainda, a recuperação de peças, equipamentos e estruturas, comumente utiliza-se o nome soldagem para execução de processos de união em nível microscópico. No entanto, ao longo do tempo vem sendo empregados diferentes utilizações dos procedimentos de soldagem, como por exemplo a deposição de material sobre uma superfície e revestimentos especiais.

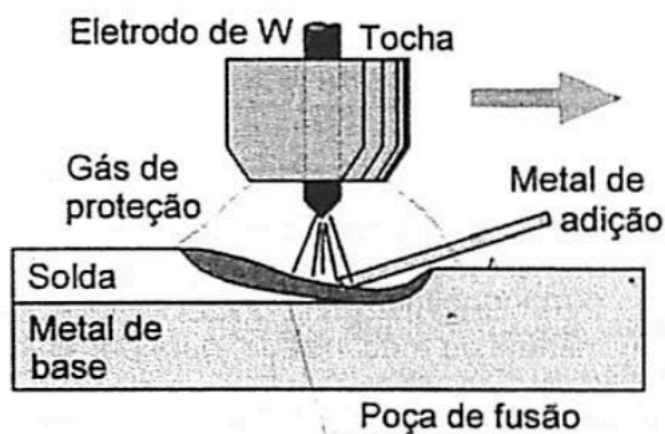
Assim, o termo soldagem, deixa de se referir simplesmente à união de duas ou mais peças. A definição de soldagem segundo é a seguinte: - “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”. Esta definição, toma maior amplitude por englobar o processo de brasagem, que pode ser considerada um processo de soldagem. (MARQUES et al., 2011)

Outras definições são importantes para a compreensão deste processo:

O material da peça, ou peças que está sendo soldado é chamado de metal de base como se ilustra na Figura 1. Durante a soldagem, o metal de adição é fundido pela fonte de calor e misturado com uma quantidade de metal base também fundido para formar a poça de fusão. (MARQUES et al., 2011). No caso deste trabalho, a poça de fusão será formada somente pelo metal base, pois se trata de uma solda autógena, ou seja, sem adição de metal.

O gás de proteção serve para a proteção da poça de fusão e do arco elétrico contra a contaminação pela atmosfera. A proteção é feita por uma nuvem composta por um gás inerte ou uma mistura de gases inertes. (MARQUES et al., 2011). (Figura 1)

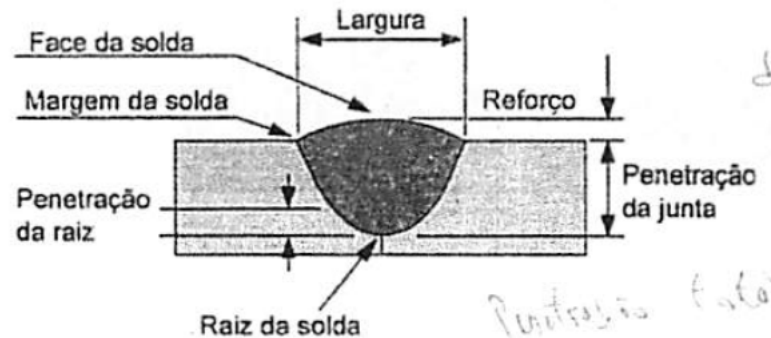
Figura 1 - Soldagem TIG



Fonte: Adaptado de Marques et al., 2011

A Figura 2 demonstra alguns termos para definir o formato e as características técnicas dos cordões de solda. Os parâmetros de interesse para este trabalho são a largura e a penetração da junta. Neste caso, é uma solda de topo, como a realizada no trabalho em questão.

Figura 2 - Dimensões e regiões de solda de topo

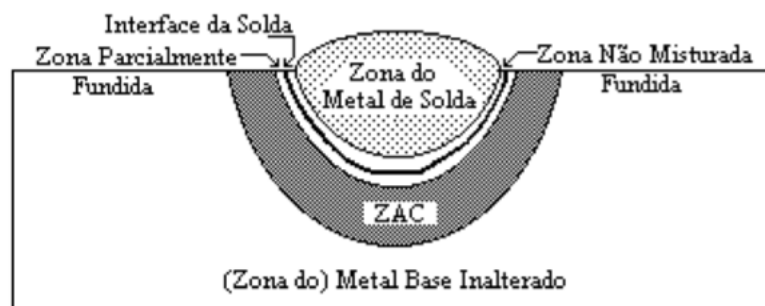


Fonte: Adaptado de Marques et al., 2011

A Figura 3 ilustra as seguintes zonas de uma junta soldada:

- ⇒ **Zona não misturada fundida:** é de espessura muito fina e composta unicamente pelo metal base fundido, o qual solidifica antes de ocorrer qualquer mistura com o metal de adição. (MACHADO, 2007)
- ⇒ **Zona do metal de solda:** é formada pela mistura homogênea (sob o ponto de vista macroscópico) do metal base fundido com o metal de adição normalmente empregada no estado bruto de fusão. É separada pela interface da solda que indica a fronteira entre o metal fundido na solda e o metal base. (MACHADO, 2007)
- ⇒ **Zona parcialmente fundida:** é produzida pela fusão de inclusões, impurezas, ou segregações nos contornos dos grãos com baixo ponto de fusão. Ocorre no metal base e imediatamente após a interface da solda. (MACHADO, 2007)
- ⇒ **Zona afetada pelo calor (ZAC):** é a consequência da máxima temperatura alcançada, do tempo de permanência do metal base nestas temperaturas e das taxas de aquecimento e resfriamento. Há toda uma zona onde não ocorre nenhum tipo de fusão, mas são produzidas alterações alotrópicas no estado sólido incluindo crescimento de grãos e transformações de fase. Geralmente essa zona apresenta diversas regiões, com características que dependem de cada metal base. (MACHADO, 2007)

Figura 3 - Seção transversal demonstrando as zonas de uma junta soldada



Fonte: Adaptado de Machado, 2007

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM

2.2.1 História da Soldagem

Segundo Marques et al., 2011, a soldagem como é normalmente conhecida, iniciou nos anos de 1801, depois que o Sir Humphrey Davy descobriu o arco elétrico e se desenvolveram também as fontes produtoras de energia. Desde então, foram sendo realizados diversos testes buscando uma soldagem satisfatória de materiais ferrosos e não ferrosos como alumínio e magnésio. Na década de 1920, foram realizadas diversas pesquisas com o intuito de aumentar a qualidade dos processos de soldagem utilizados anteriormente como o eletrodo revestido. Assim nesse período, os trabalhos tratavam sobre a geração de uma atmosfera de gases específicos aplicados externamente ao arco elétrico.

Em 1941 foi quando realizou-se o processo de soldagem utilizando gases não oxidantes para proteção do arco. Este com o nome ainda de *Heliarc* ou *Tungsten Inert Gas* (TIG), pois na época era utilizado o tungstênio como eletrodo e o hélio como gás de proteção, mas conforme foi se avançando no tempo, as tecnologias também avançaram até começar a utilizar corrente alternada nos processos. Além disso, o hélio foi substituído pelo argônio por ter um custo mais baixo. As fontes também foram se tornando cada vez mais compactas e os processos cada vez mais precisos. Isso é dado pela colaboração do avanço nos estudos da eletrônica.

Apesar de ser um processo antigo e já bem consolidado, ainda surgem algumas variáveis que podem ser analisadas. Uma delas é a influência do ângulo de afiação do eletrodo.

2.2.2 Fundamentos da Soldagem TIG/GTAW

A abreviação GTAW do processo de soldagem refere-se à: (*Gas Tungsten Arc Welding*) ou então TIG (*Tungsten Inert Gas*), que diz respeito a soldagem à arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa. Neste processo, é feito o aquecimento na região das peças a serem unidas, até a temperatura de fusão, por meio do arco elétrico gerado a partir de um eletrodo de tungstênio. Este aquecimento tem como resultado o que é conhecido como poça de fusão. (MARQUES et al., 2011)

Para que esta poça de fusão não seja contaminada por gases oxidantes e outras partículas da atmosfera é feita uma nuvem de um ou mais gases inertes como o argônio, hélio, hidrogênio, entre outros. Os gases inertes não reagem quimicamente à poça de fusão. Assim, esta nuvem envolve a poça de fusão por completo, formando uma cortina, o que permite a proteção desta.

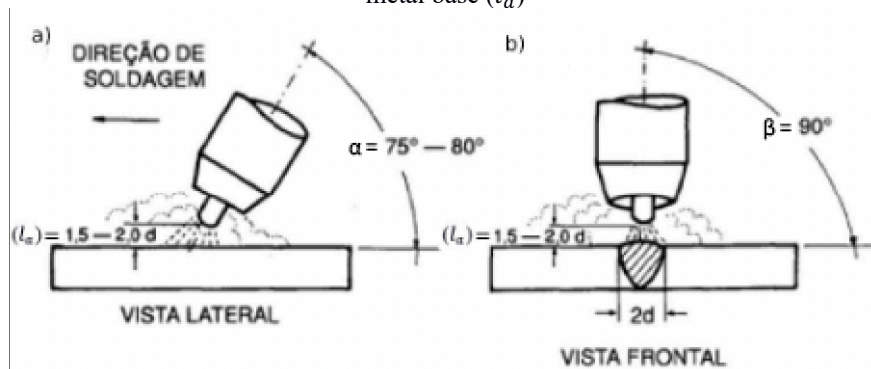
A soldagem TIG ou GTAW, é feita adicionando ou não um metal de adição. Este metal de adição normalmente tem as mesmas características das peças a serem soldadas. Neste

trabalho em questão será um processo de soldagem autógeno, ou seja, não é utilizado metal de adição. (ASM HANDBOOK, 2011).

Este é um processo geralmente utilizado quando se preza por qualidade na soldagem, ou quando se necessita muita precisão, como por exemplo para a soldagem de peças de pouca espessura. Essa característica é dada pelo excelente controle de energia a ser transferido para a peça e pela pouca geração de fumos e vapores, que permite maior visibilidade para o soldador. A possibilidade de se conseguir soldar sem adicionar metal também é algo positivo para soldagem de chapas finas. Como o eletrodo não é consumível, então pode-se somente fundir o metal de base, (MARQUES et al., 2011)

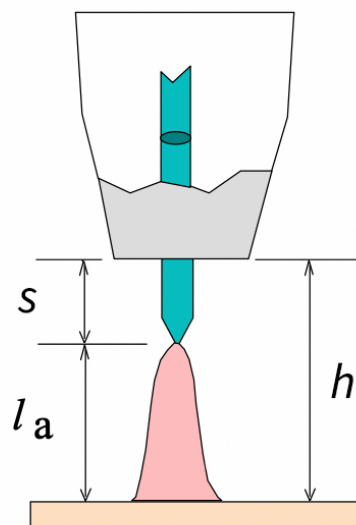
Para que a soldagem TIG ocorra da melhor maneira possível, ou seja, para que se forme uma boa poça de fusão, é necessário que se controlem alguns parâmetros. Dentre eles, serão destacados o ângulo de ataque, o ângulo de trabalho, a distância entre a ponta do eletrodo e o bocal da tocha TIG ou comprimento do eletrodo (*Stickout*) e a distância entre a ponta do eletrodo e o metal base que são apresentados nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - (a) Demonstração dos ângulos de ataque [α] e (b) trabalho [β] e altura entre a ponta do eletrodo e o metal base (l_a)



Fonte: Adaptado de (WAINER et al, 2004)

Figura 5 – Distância do ponto de tomada de corrente à peça (h), stickout (s) e altura entre a ponta do eletrodo e o metal base (l_a)



Fonte: Adaptado de (Modenesi, 2001)

2.2.3 Equipamentos utilizados na soldagem TIG

Conforme ilustrado na Figura 6, os equipamentos geralmente utilizados são os seguintes:

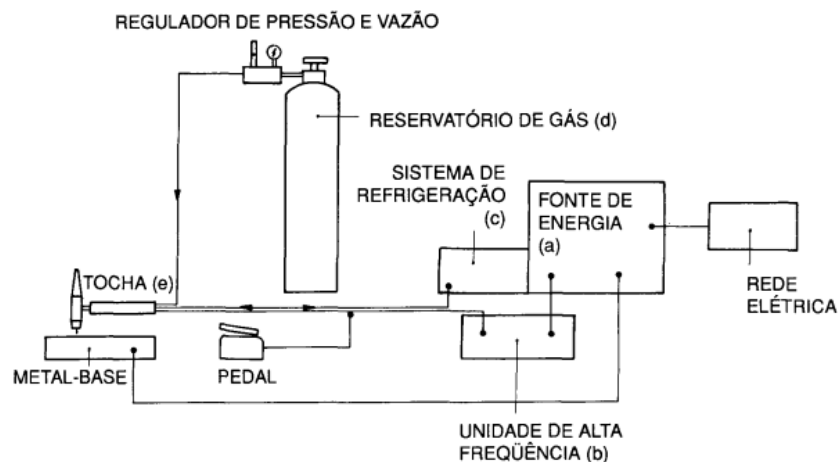
Fonte de energia – Esta fonte poderá ser um gerador, um retificador ou transformador, isto será determinado de acordo com o metal a ser soldado. Esta fonte deverá possuir a possibilidade de adaptar um pedal para o controle da corrente de acordo com a necessidade do soldador. Realizar este processo de maneira manual faz com que o rechupe, na cratera final seja minimizado (WAINER et al., 2004). O rechupe é a falta de metal causada pela contração na solidificação do metal.

Unidade de alta frequência - Com ela é possível controlar a intensidade, a vazão pré e pós do gás inerte (WAINER et al., 2004), abertura de arco em corrente contínua direta ou então para soldagem de alta frequência em corrente alternada (JEFFUS, 2012). É necessária caso não seja encontrado na fonte.

Reservatório de gás – Equipamento responsável por realizar o estoque de gás para soldagem. Em geral são cilindros de metal com reguladores de pressão e de vazão (WAINER et al., 2004). São desnecessários em casos onde existem central de gases.

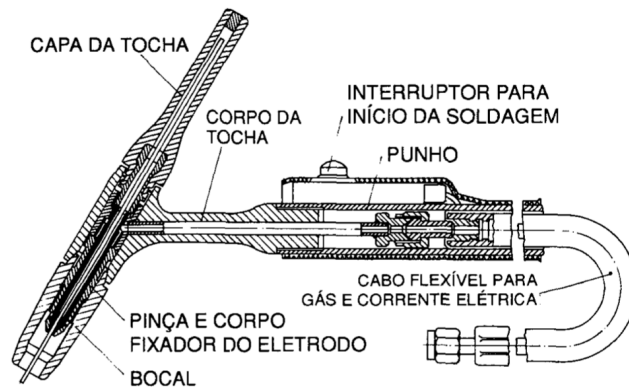
Tocha TIG – A tocha TIG é onde o eletrodo de tungstênio será fixado e por onde a corrente elétrica irá passar para ter contato com a peça a ser soldada. Ela possui também um bocal que permite a vazão de uma cortina de gás para proteger a poça de fusão. As tochas podem ser refrigeradas à água ou ar, caso seja utilizada por longos períodos de soldagem (WAINER et al., 2004). Os componentes da tocha TIG estão representados na Figura 7.

Figura 6 - Esquema simplificado dos equipamentos necessários para o processo TIG



Fonte: Adaptado de (WAINER et al, 2004)

Figura 7 - Itens de montagem da tocha TIG



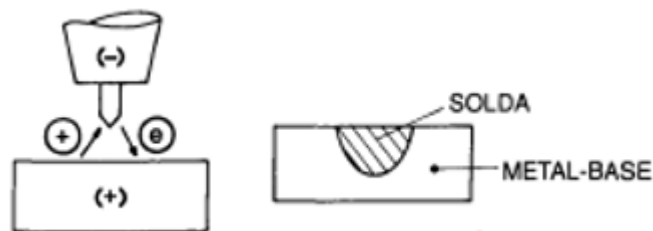
Fonte: Adaptado de (WAINER et al, 2004)

2.2.4 Características Elétricas

Segundo Modenesi (2001), O arco elétrico é "uma descarga elétrica entre eletrodos em um gás que tem uma queda de tensão, junto ao cátodo, da ordem do potencial de excitação do gás ou vapor (isto é, da ordem de 10 V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um valor mínimo de cerca de 100 mA"

Na soldagem de corrente contínua, existem duas maneiras distintas de ser empregada. Uma delas é a soldagem com corrente contínua de polaridade direta. Este modo diz respeito à utilização do tocha de soldagem no polo negativo da fonte de energia. Neste caso, o fluxo de elétrons ocorre em direção ao metal-base, já o fluxo de íons positivo, vai de encontro com o eletrodo. Por ocorrer um choque entre os elétrons e o metal-base, este tem um aquecimento superior ao eletrodo, o que possibilita uma penetração mais profunda e estreita conforme ilustrado na Figura 8 ao comparar a obtida na polaridade reversa, Figura 9. (WAINER et al., 2004).

Figura 8 - Ilustração do fluxo de elétrons, íons positivos e penetração por soldagem com corrente contínua de polaridade direta

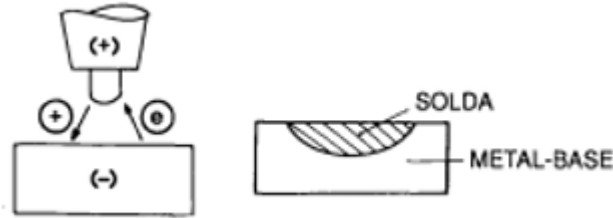


Fonte: Adaptado de Wainer et al., 2004

Também é possível que seja soldado com a corrente contínua de polaridade reversa, ou seja, o eletrodo é ligado ao polo positivo da fonte de energia. Ao contrário da soldagem de corrente contínua direta, o fluxo de elétrons viaja em direção ao eletrodo. Este fluxo faz com que o eletrodo aqueça mais que o metal-base, por consequência do choque gerado. Além disso, ocorre uma limpeza no metal base, seja pelo choque entre o fluxo de íons positivos e a camada de óxido formada na superfície, como é demonstrado na Figura 9 (WAINER et al., 2004) ou

então pelo desprendimento de elétrons acelerados que elevam os óxidos em direção ao eletrodo pela sua polaridade (JEFFUS, 2012). No entanto neste caso a penetração é baixa, mas larga.

Figura 9 - Ilustração do fluxo de elétrons, íons positivos e penetração por soldagem com corrente contínua de polaridade reversa



Fonte: Adaptado de Wainer et al., 2004

Energia de soldagem: Segundo Wainer et al. (2004) a energia de soldagem é um ponto importante na análise quantitativa do processo. Conforme se altera a polaridade, ou o tipo de corrente elétrica a ser empregada, alteram-se também as características do arco elétrico. Assim, existem fórmulas para se determinar a quantidade de calor aplicada ao processo. No caso da corrente contínua, o valor do calor é dado pela Equação 1:

$$H = \frac{60 \times V \times I}{v} \quad (1)$$

Onde:

H = energia de soldagem (J/cm)

V = tensão de soldagem (V)

I = corrente de soldagem (A)

v = velocidade de soldagem (cm/min)

2.3 GTAW AUTÓGENO – GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

2.3.1 Influência dos parâmetros elétricos

O arco é um eficiente transdutor de energia no qual a energia elétrica é convertida quase que totalmente em calor. A energia dissipada no arco é obtida multiplicando-se a tensão pela corrente de soldagem (Modenesi, 2001)

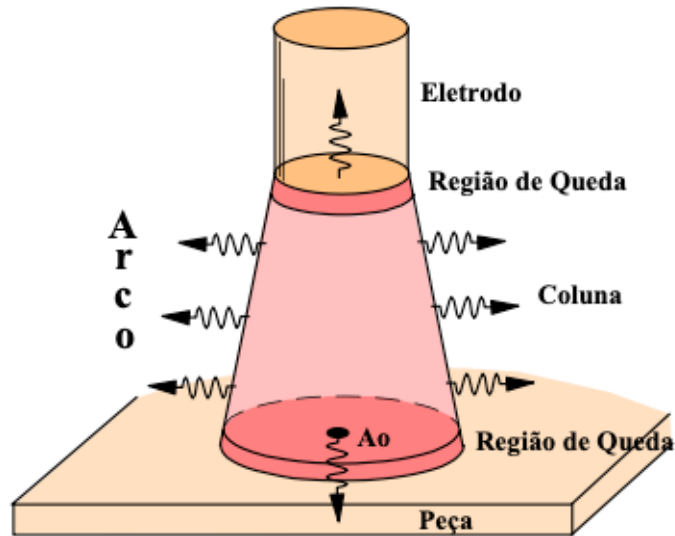
Segundo Modenesi (2001), a Figura 10 demonstra um modelo simplificado da estrutura do arco, considerando de maneira separada a transferência de calor em cada região. Na região de queda, o calor tende a se difundir principalmente na direção longitudinal para o eletrodo ou para a peça. O calor gerado na coluna do arco se difunde principalmente na direção radial para o ambiente. Assim, a potência específica (P_{exp}) do arco pode ser definida como:

$$P_{exp} = \frac{Q_{RQ}}{A_0} \quad (2)$$

Onde:

Q_{RQ} é o calor gerado por unidade de tempo na região de queda junto à peça e A_0 é a área de contato entre o arco e a peça.

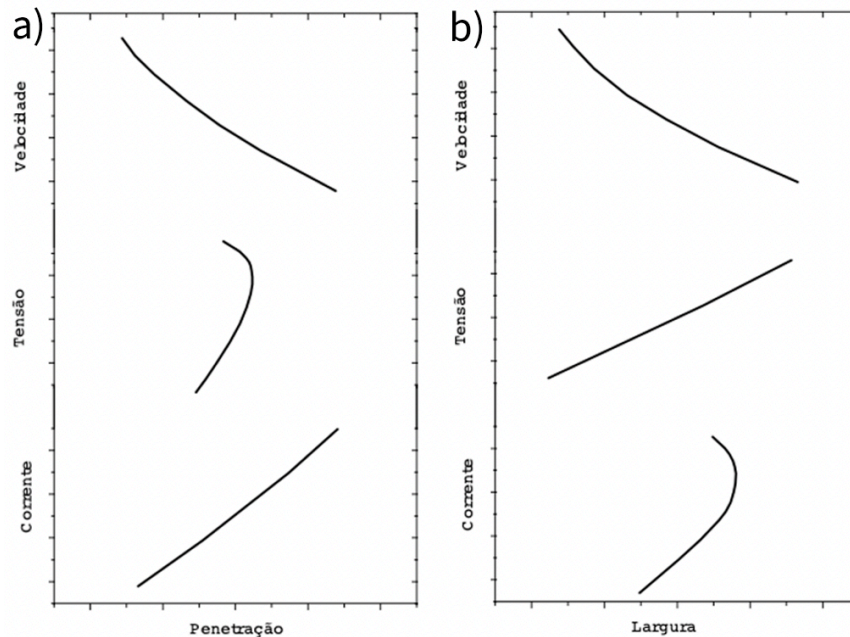
Figura 10 – Representação simplificada das direções dominantes de fluxo de calor nas diferentes regiões do arco



Fonte: Adaptado de Modenesi 2001

As indicações demonstradas por Modenesi (2001) afirmam que a corrente de soldagem tem uma relação direta com a quantidade de calor transferida para a peça, sendo, portanto, uma variável fundamental para determinar a quantidade de fusão no metal de base e a penetração da solda. Por outro lado, a tensão tem um menor efeito na penetração pois variações desta causam maiores efeitos na coluna do arco cujo calor gerado é transmitido principalmente na direção radial. Assim, conforme indicado na Figura 11, pode-se concluir que a tensão de soldagem afeta principalmente a largura do cordão.

Figura 11 – Relação entre a penetração (a) e largura (b) e as variáveis primárias de soldagem



Fonte: Adaptado de Modenesi 2001

2.3.2 Influência da composição do metal base

Foram observadas, na década de 1960 a 1970 que o uso do processo TIG autógeno, ou seja, sem utilização de metal de adição, pode sofrer alterações na relação entre profundidade e a largura do cordão de acordo com os teores de elementos, como Al, Se, Ti, Mn, Si e principalmente S e O, no metal base. (MODENESI, 2013)

Observou-se que conforme variam a quantidade destes elementos, cordões mais largos e rasos apresentavam uma cor um pouco azulada, ou seja, com temperaturas mais baixas, no entanto, os cordões que tinham como característica serem mais finos e profundos, apresentavam um tom mais amarelado, ou seja, com temperaturas mais altas. O último caso foi observado em ligas com teores mais elevados de Se, S e O e teores mais baixos de Al, Ti, Mn e Si. Vale ressaltar que as quantidades apresentadas estavam dentro da faixa permitida pelas normas técnicas. (MODENESI, 2013)

Assim, entendeu-se que ocorre uma variação na penetração da soldagem de acordo com a composição química do metal base. Os mecanismos propostos envolvem alterações na poça de fusão ou no arco elétrico. Isto ocorre pelo teor de elementos tenso-ativos, que são substâncias que diminuem a tensão superficial ou influenciam a superfície de contato entre dois líquidos. (MODENESI, 2013)

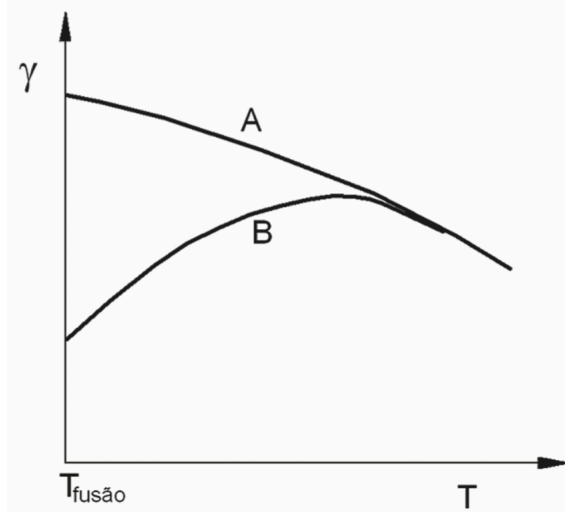
Heiple e Roper (1982) propuseram que o teor de elementos tenso-ativos como O, S e Se seriam responsáveis por alterar o sentido do movimento de convecção do metal líquido na poça de fusão. Segundo eles, esta alteração na movimentação seria o motivo da alteração na penetração da poça. Já os elementos como Al, Mn e Ti atuariam de forma indireta controlando o teor livre dos elementos tensoativos. Atualmente, este modelo é bastante conhecido, sendo considerado, pela maioria dos pesquisadores, o principal mecanismo controlador de variações no formato do cordão por pequenas mudanças no teor de elementos químicos presentes na poça de fusão.

A alteração no sentido de movimento do metal líquido na poça de fusão ocorreria, portanto, em ligas com a possibilidade de que elementos tenso-ativos pudessem se combinar com outros elementos e acabaram sendo retirados da solução encontrada no metal líquido da poça de fusão. A tensão superficial do metal em estado líquido é diminuída conforme se eleva a temperatura, assim, o centro da poça de fusão é local com menor tensão superficial. (MODENESI, 2013)

Tendo isso em vista, o fluxo de metal deveria ocorrer do centro para as bordas da poça de fusão, o que resultaria em um cordão de baixa penetração, porém largo. Mas quando os teores de elementos tenso-ativos são elevados suficientemente, a tensão superficial acaba sendo diminuída para temperaturas próximas da temperatura de fusão do material e seria aumentada conforme a temperatura aumenta como ilustrado na Figura 12. Logo, os materiais da borda possuiriam uma tensão superficial menor que o centro da poça de fusão e assim o fluxo ocorreria das bordas para o centro. Esse movimento teria como consequência um movimento que forçaria o metal líquido para a raiz da solda, gerando assim um cordão de solda mais profundo e mais estreito se comparado com ligas metálicas com baixo teor de elementos químicos tenso-ativos. Tais movimentos são demonstrados na Figura 13.

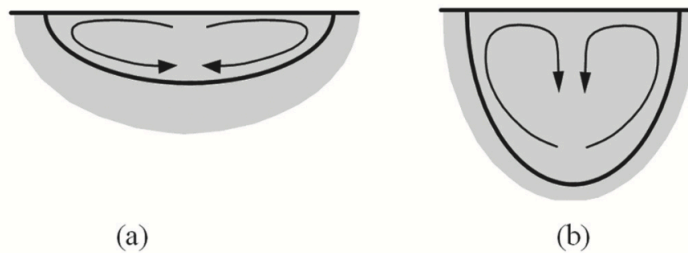
Assim, em ligas metálicas mais puras, ou seja, com baixos teores de elementos tenso-ativos, o que se espera no cordão de solda é que este tenha uma penetração maior e a largura menor.

Figura 12 – Curvas esquemáticas de variação da tensão superficial com a temperatura em um metal líquido. (A) Material de alta pureza e (B) material contaminado com um elemento tenso-ativo.



Fonte: Adaptado de Modenesi, 2013

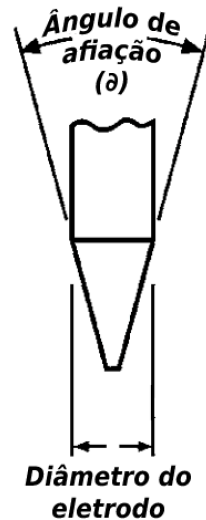
Figura 13 – Fluxo de metal líquido induzido na poça de fusão para (a) Material de alta pureza e (b) material com elemento tenso-ativo



Fonte: Adaptado de Modenesi, 2013

2.3.3 Influência do ângulo de afiação do eletrodo

Um dos parâmetros que têm influência na qualidade da soldagem é a afiação do eletrodo, este ângulo é ilustrado na Figura 14. Quando é feita de forma errada, pode gerar instabilidade no arco elétrico por conta da orientação das linhas formadas, que são resultado da abrasão gerada pela ferramenta de afiação, que normalmente é uma pedra de esmeril. Assim, o eletrodo deve ser afiado no sentido longitudinal, para que as linhas favoreçam o fluxo de elétrons.

Figura 14 – Ângulo de afiação (ϑ)

Fonte: Traduzido e adaptado de ASM Handbook, 2011

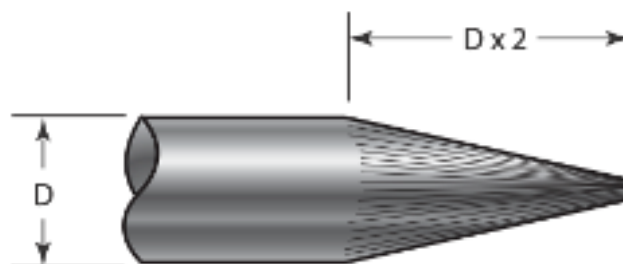
O ângulo de afiação (ϑ) indicado na Figura 14, tem influência sobre a geometria da coluna de arco, e assim, a pressão que o arco exerce na poça, o que gera variação na largura e no perfil da penetração. Normalmente, se sugere que o comprimento de afiação do eletrodo, para soldas em aço de baixo a médio carbono ou aço inoxidável, seja duas vezes maior que seu diâmetro como demonstrado na Figura 15. (JEFFUS, 2012). Essa recomendação resulta em um ângulo aproximado de 30° de acordo com a demonstração matemática:

$$\tan^{-1} \vartheta_r = 2 \left(\frac{\frac{D}{2}}{2D} \right) \quad (3)$$

$$\tan^{-1} \vartheta_r = 2 \left(\frac{D}{4D} \right)$$

$$\vartheta_r \approx 28,072^\circ$$

Figura 15 – Recomendação geral para afiação do eletrodo de tungstênio



Fonte: Adaptado de Jeffus, 2012

Ângulos menores, ou seja, $5^\circ < \vartheta < 30^\circ$ podem ser utilizados para juntas de solda de filete com o intuito de eliminar a geração de arco elétrico nas paredes laterais da peça. No entanto,

ângulos maiores, $30^\circ < \theta < 120^\circ$, provém estabilidade e boa penetração (ASM HANDBOOK, 2011).

Os eletrodos com tório, lantânio e cério não formam uma semi-esfera na sua ponta ao serem aquecidos, sendo empregados em soldagem de corrente contínua com a ponta em ângulo.

O valor de (θ) influencia a geometria da poça de fusão. Em geral, quanto menor for o (θ) , maior será a penetração e menor a largura do cordão. (MACHADO, 1996)

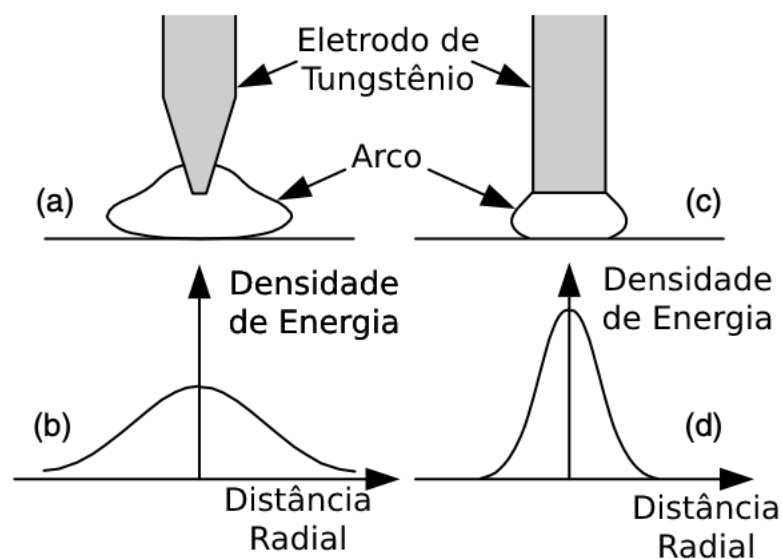
De acordo com estudos, na solda TIG em corrente contínua direta, a ponta do eletrodo afeta o formato e a densidade da distribuição de energia do arco elétrico. Conforme (θ) aumenta, o diâmetro do arco diminui e assim, a área de contato também diminui, o que aumenta a densidade de energia do arco. Tal aspecto é ilustrado na Figura 16. (KOU, 2003) (GOODARZI 1997). Portanto, (θ) menores tem como consequência uma densidade de corrente máxima mais baixa. Ao considerar o efeito do (θ) nas distribuições de fluxo de calor e densidade de corrente sobre a superfície da poça de fusão, a força eletromagnética é maior para eletrodos afiados com (θ) maiores.

Além disso, forças eletromagnéticas mais fortes, produzem velocidades mais altas no fluxo de metal da poça de fusão. Uma velocidade mais alta causa penetrações mais profundas no cordão de solda. (GOODARZI, 1997)

Conforme estudos realizados por Shirali e Mills, (1993) estudos foram realizados utilizando (θ) entre 15° e 90° , constatou-se então que conforme se aumenta (θ) , há um aumento na penetração até por volta dos 45° , posteriormente, a penetração começa a diminuir. Este fenômeno é dado principalmente por conta da dimensão da raiz do anodo. Assim, o que pode se esperar são gradientes de temperatura mais baixos e, portanto, forças termocapilares e forças de Lorentz mais baixas.

Sunamoto, (2019) realizou seus testes com três ângulos de variação (30° , 60° e 90°) e variou também a corrente para cada um destes ângulos. No entanto, como demonstra o estudo de Shirali e Mills, (1993) o aumento da penetração ocorre somente até um (θ) de 90° . Assim, este trabalho visa verificar, comparar e avançar mais profundamente nestes dados relacionados ao ângulo de afiação.

Figura 16 – Efeito do ângulo de afiação no formato e na densidade de distribuição da energia. (a) θ menor gera arco com diâmetro maior. (b) θ menor = densidade de energia menor (c) θ maior gera arco com diâmetro menor. (d) θ maior = densidade de energia maior.



Fonte: Traduzido e adaptado de Kou, 2003

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 1 – Cronograma de Realização

	Ação
2 – Revisão Bibliográfica	Pesquisa sobre o tema
3 – Materiais e Métodos	3.1 – Determinação dos parâmetros
	3.2 – Confeccção dos dispositivos auxiliares
	3.3 – Realização dos testes propostos
	3.4 – Caracterização dos corpos de prova
4 -Resultados e Discussão	4.1 – Validação dos resultados
	4.2 – Análise dos resultados
Considerações Finais	Conclusão

3.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

Os parâmetros foram determinados de acordo com os métodos recomendados por Wainer et al., (2004). Assim,

- Velocidade de soldagem = 70 cm/min (Parâmetro determinado por conta da espessura, pelo material do metal-base e pelo tipo de processo de soldagem recomendado).

- Eletrodo com 2% de tório e $\varnothing 1,6\text{mm}$; (Eletrodos com tório são empregados em soldagem com corrente contínua por não formarem uma semi-esfera ao receber calor (MACHADO, 1996). Assim, o ângulo se mantém uniforme por mais tempo).

- Corrente de Soldagem = 90A (Corrente continua de polaridade direta);

- Gás de proteção: Argônio puro;

- Vazão do Gás de Proteção = 7 l/min (para eletrodos de $\varnothing 1,6\text{mm}$ e bocal número 6);

- Ângulo de Ataque = 75° ;

- Ângulo de trabalho = 90° ;

- Distância Entre o Bocal da Tocha e a Ponta do Eletrodo (Stickout)= 2,4mm

(Recomendação de $1,5d$ sendo d = diâmetro do eletrodo);

- Comprimento de arco = 2,4mm (Recomendação de $1,5d$ sendo d = diâmetro do eletrodo);

3.2 CONFECÇÃO DOS DISPOSITIVOS AUXILIARES

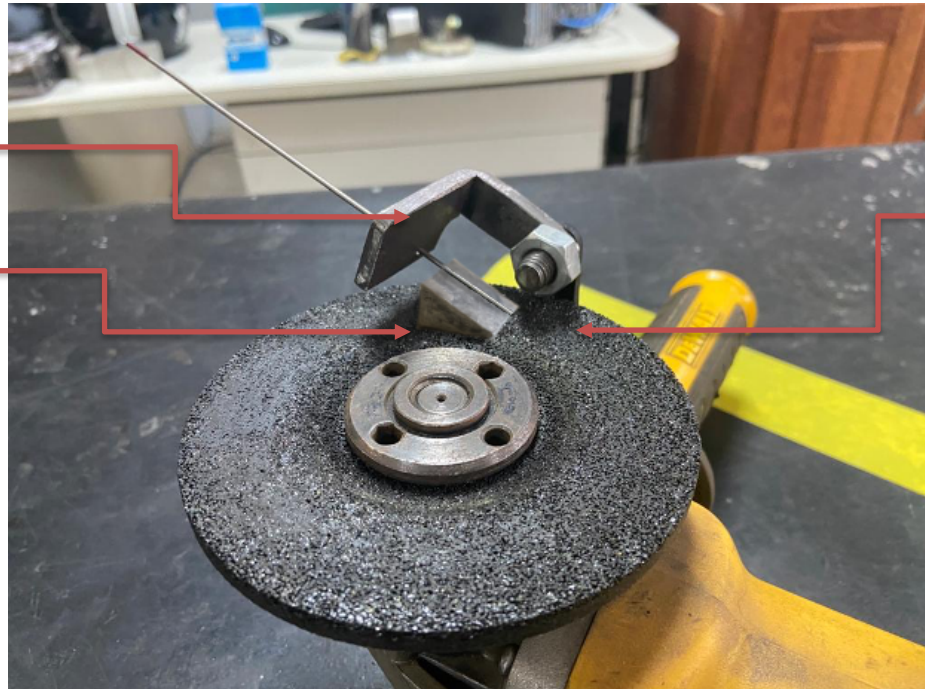
3.2.1 Dispositivo para afiação e montagem do eletrodo

Foi elaborado um suporte para esmerilhadeira angular DeWalt 4 ½” que permite a variação do ângulo ao qual o eletrodo será afiado conforme ilustrado na Figura 17. Além disso, para tornar o ajuste do ângulo mais preciso foram desenvolvidos gabaritos com ângulos pré-estabelecidos conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 17 - Montagem 1 - Dispositivo de afiação montado

Subconjunto 1.2

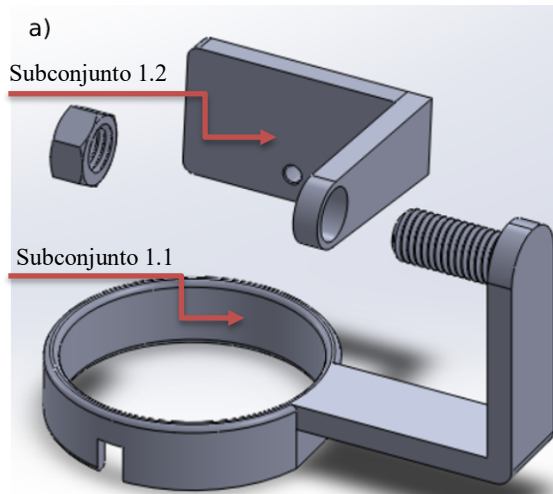
Gabarito para Afição



Subconjunto 1.1

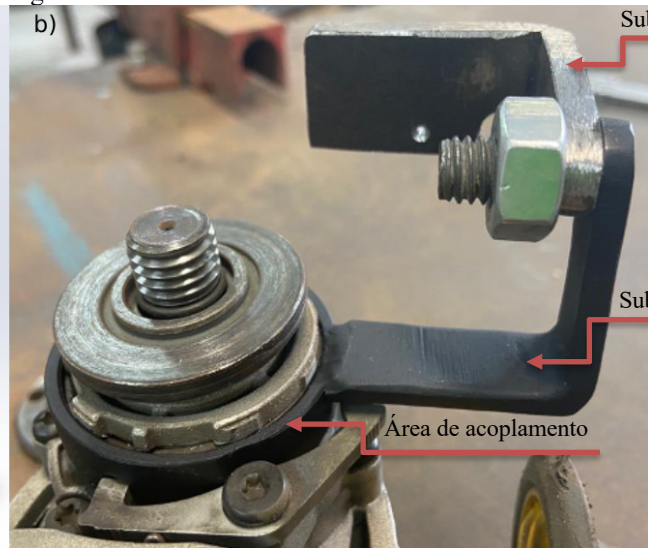
Fonte: Próprio autor

Figura 18 – (a) Vista explodida do dispositivo de afiação; (b) Dispositivo de afiação encaixado na esmerilhadeira angular



Subconjunto 1.2

Subconjunto 1.1



Subconjunto 1.2

Subconjunto 1.1

Área de acoplamento

Fonte: Próprio autor

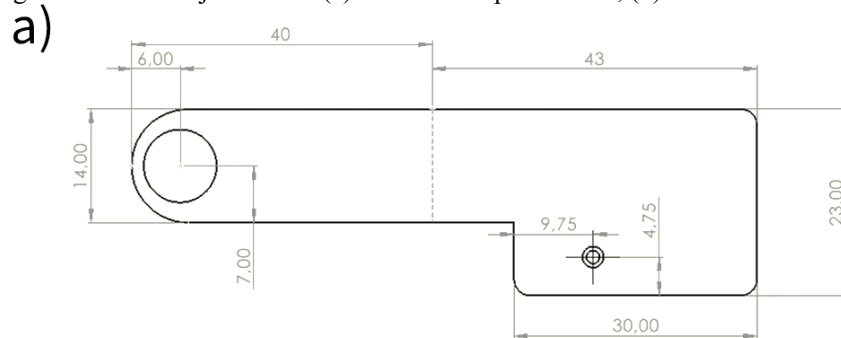
Figura 19 – Subconjunto 1.1 - Encaixe do dispositivo de afiação para esmerilhadeira angular



Fonte: Próprio autor

Conforme indicado na Figura 19, três componentes soldados constituem o subconjunto 1.1. A partir do encaixe na esmerilhadeira, o parafuso M9 é o que possibilita o ajuste de inclinação do eletrodo em relação a face do disco de desbaste

Figura 20 – Subconjunto 1.2 – (a) Medidas chapa metálica; (b) Vista real do subconjunto



Fonte: Próprio autor

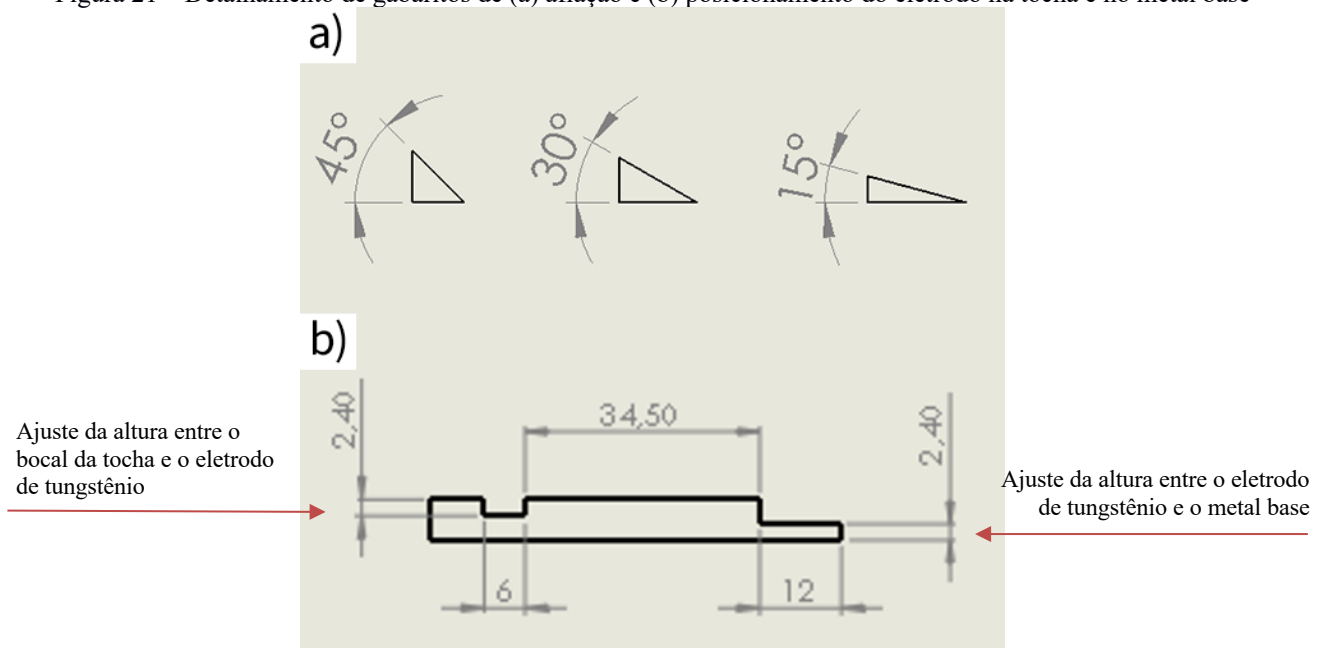
O subconjunto 1.2 trata-se do suporte do eletrodo de tungstênio e encontra-se ilustrado na figura 22. Confeccionada a partir de uma chapa de aço dobrada, constitui-se por dois furos,

um para encaixe do parafuso M9 do subconjunto 1.1 e outro para encaixe do eletrodo de tungstênio ($\varnothing 1,6$ mm)

Para que houvesse uma minimização de erro nos ângulos de afiação, foram fabricados três gabaritos em alumínio na forma de prismas triangulares com: 45° , 30° e 15° , conforme ilustrado na Figura 21 (a). Além disso foi fabricado um gabarito em aço carbono para ajustar e verificar o stickout e a altura entre a ponta do tungstênio e o metal-base, conforme ilustrado na Figura 21 (b).

Estas peças foram fabricadas em duas fresadoras. Para os gabaritos em alumínio foi utilizada a fresadora da marca Millmaster e modelo 3VM. Já para o gabarito em aço foi utilizada a fresadora da marca Diplomat e modelo FU360, ambas com uma fresa de topo de 4 cortes com $\varnothing=6$ mm, no laboratório de usinagem do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Campus Lages.

Figura 21 – Detalhamento de gabaritos de (a) afiação e (b) posicionamento do eletrodo na tocha e no metal base



Fonte: Próprio autor

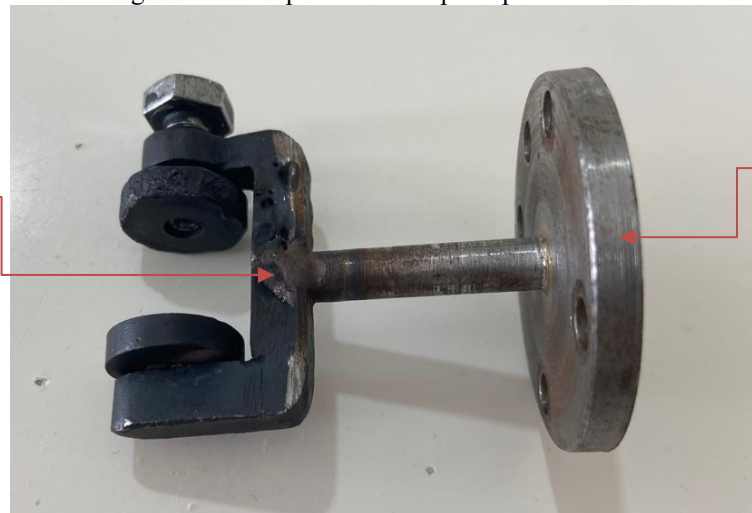
Posteriormente a afiação dos eletrodos foi realizada conforme os passos descritos no APÊNDICE - A

3.2.2 Dispositivo de suporta para a tocha

A (Figura 22) demonstra a união dos subconjuntos 2.1 e 2.2 para formar o Componente 2 – Suporte para tocha TIG que é utilizado para interligar o braço robótico com a tocha TIG.

Figura 22 - Componente 2 - Suporte para tocha TIG

Subconjunto 2.2 – Sargento tipo “C” para tocha TIG



Subconjunto 2.1 – Encaixe para suporte do braço robótico

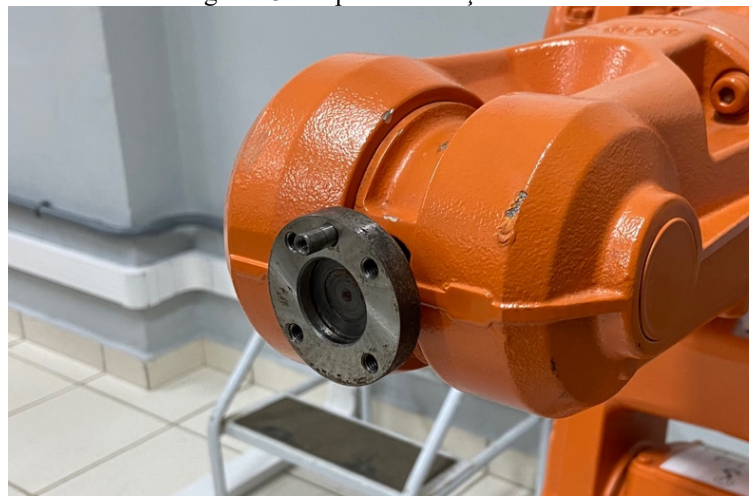
Fonte: Próprio Autor

O Subconjunto 2.1 foi usinado conforme as medidas retiradas do suporte do braço robótico indicado na Figura 23.

O subconjunto 2.2 foi elaborado para que pudesse fixar de uma maneira firme a tocha TIG. O formato desenvolvido seguiu como inspiração os sargentos tipo “C” comerciais com uma medida personalizada para a dimensão da tocha.

Após a elaboração dos subconjuntos 2.1 e 2.2, os mesmos foram soldados para se tornar o Componente 2.

Figura 23 - Suporte do braço robótico



Fonte: Próprio Autor

3.3 REALIZAÇÃO DOS TESTES PROPOSTOS

3.3.1 Preparação dos corpos de prova

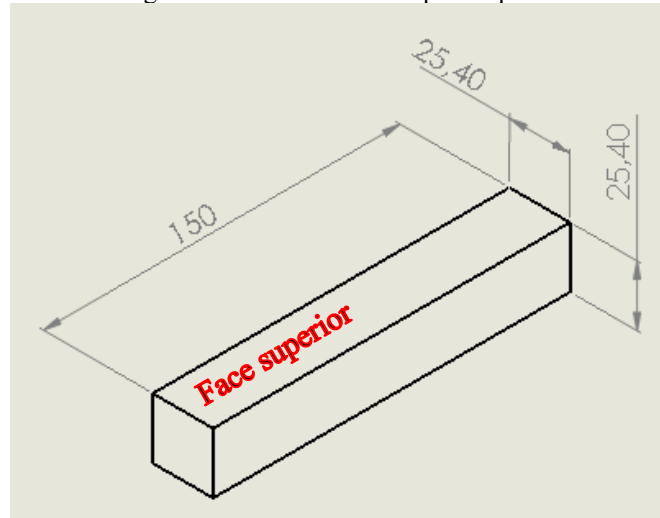
Utilizando uma serra fita semiautomática, 06 corpos de prova foram obtidos por meio do seccionamento de uma barra quadrada de 1" do aço ASTM G10450. A composição química desse material encontra-se na Tabela 2 e a geometria dos corpos de prova encontra-se ilustrada na Figura 24. O contato elétrico da garra da fonte de soldagem foi estabelecido nas faces superior e inferior. Foi realizado lixamento com esmerilhadeira e disco flap de granulometria 120 nessas faces a fim de minimizar perdas no fluxo da corrente elétrica.

Tabela 2 - Composição química do aço carbono ASTM G10450

Designação UNS	Designação de Grau	Carbono, %	Manganês, %	Fosforo, %	Enxofre, %
G 10450	1045	0.43 - 0.50	0.60 – 0.90	0.040 máx	0.050 máx

Fonte: Traduzido e adaptado de American Society for Testing and Materials, 2000

Figura 24 - Medidas dos corpos de prova



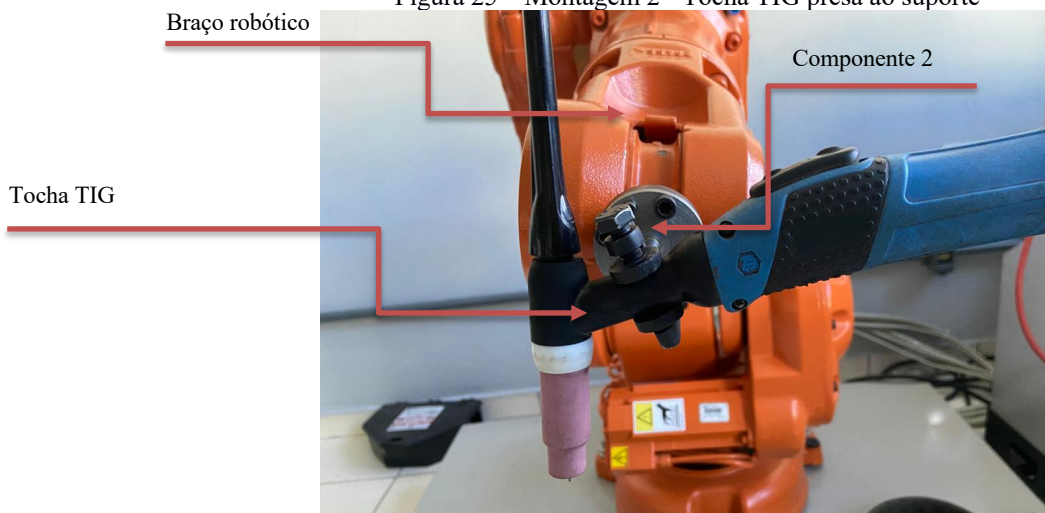
Fonte: Próprio Autor

3.3.2 Preparação do robô para realização dos testes

Para execução dos cordões de solda, um braço robótico modelo IRB140 da fabricante ABB, foi empregado. O suporte detalhado na Figura 26, auxiliou a montagem entre esse braço robótico e a tocha TIG, conforme ilustrado na Figura 25.

Demonstra-se abaixo a Montagem 2, referente a união entre o Componente 2, o braço robótico e a tocha TIG -Figura 25.

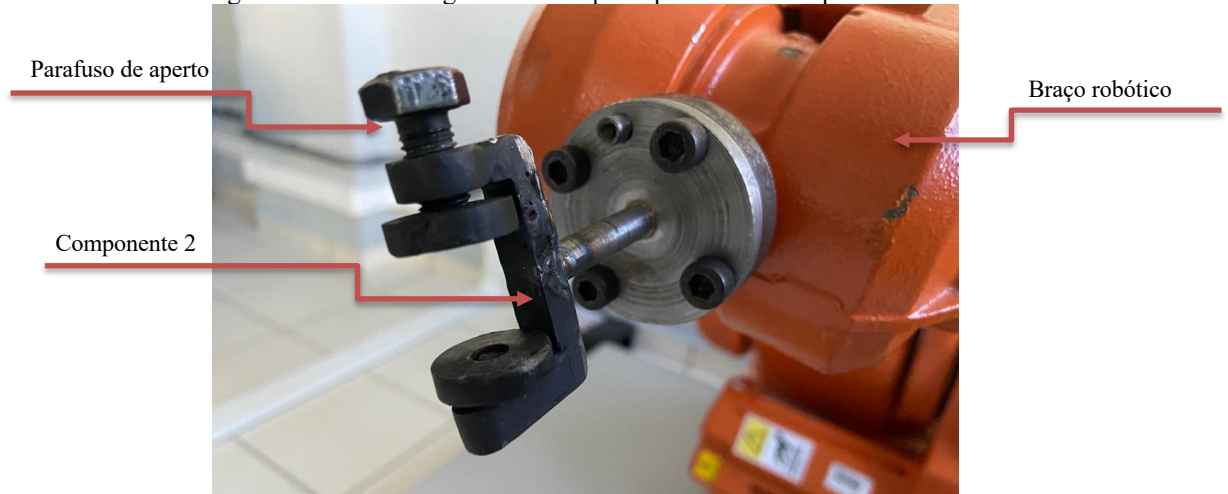
Figura 25 – Montagem 2 - Tocha TIG presa ao suporte



Fonte: Próprio autor

Para realizar tal união, o primeiro passo foi prender o Componente 2 ao suporte do robô utilizando quatro parafusos e um pino guia como se demonstra na Figura 26. Depois, foi presa a tocha TIG ao Componente 2 utilizando o parafuso de aperto.

Figura 26 – Submontagem 2.1 - Suporte para tocha TIG presa ao robô



Fonte: Próprio autor

Assim como se demonstra na Figura 27, foi possível realizar o ajuste do ângulo de trabalho (90°) que foi ajustado rotacionando o eixo do braço robótico e calibrado com um esquadro de precisão. Já o ângulo de ataque (75°) foi ajustado rotacionando a tocha e calibrado utilizando um goniômetro digital da marca Insize com resolução de $0,10^\circ$.

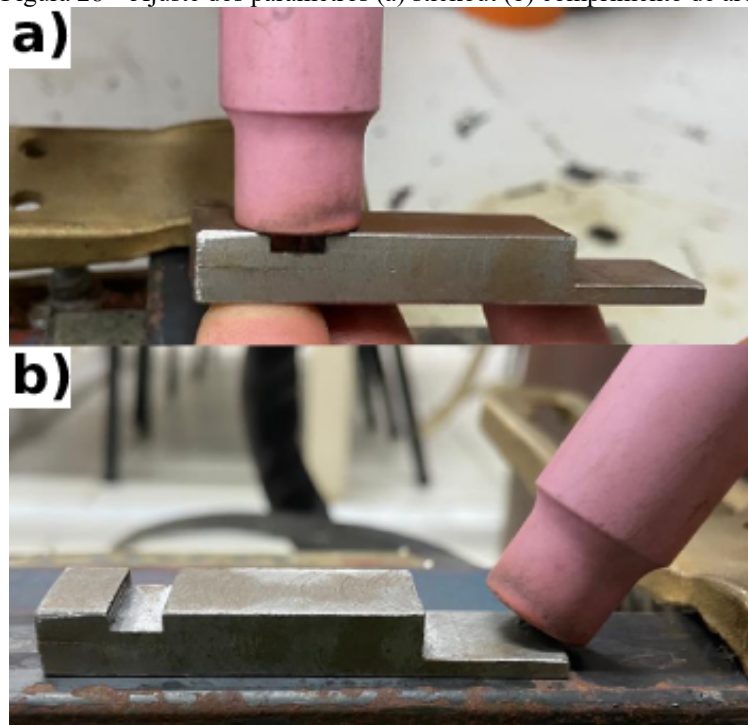
Figura 27 - Ajuste do ângulo de trabalho



Fonte: Próprio autor

Então, conforme ilustração da Figura 28, realizou-se o correto posicionamento dos eletrôdos conforme os gabaritos fabricados. As posições foram verificadas em cada procedimento de soldagem.

Figura 28 – Ajuste dos parâmetros (a) stickout (b) comprimento de arco



Fonte: Próprio autor

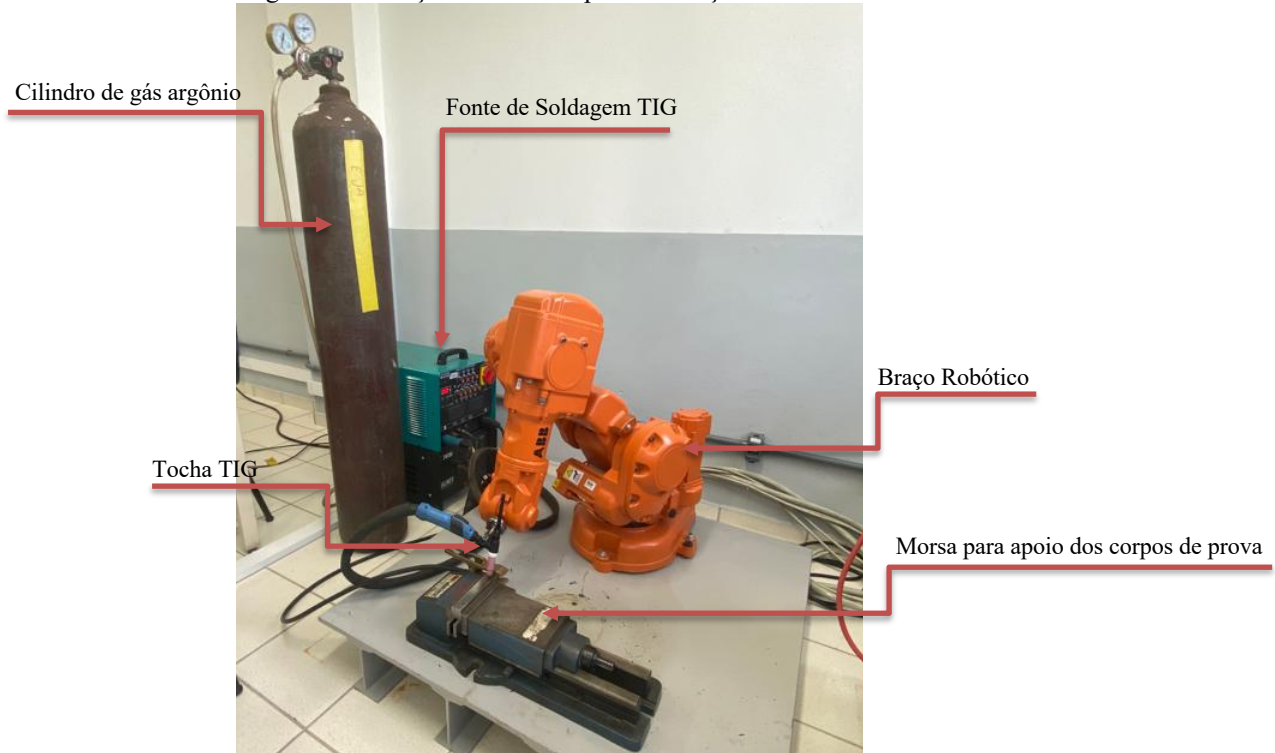
Posteriormente, iniciou-se a programação do braço robótico conforme APÊNDICE B. A cada teste o ponto inicial e final do cordão de solda foi ajustado para manter o comprimento de arco constante.

3.3.3 Realização dos testes

Após a montagem da estação de trabalho, os corpos de prova foram nivelados e presos a morsa. Assim, iniciaram-se os testes repetindo todo o processo para troca de cada eletrodo (Figura 29).

O nivelamento dos corpos de prova foi necessário para evitar que o ângulo de ataque fosse alterado.

Figura 29 - Estação de trabalho para realização dos testes



Fonte: Próprio autor

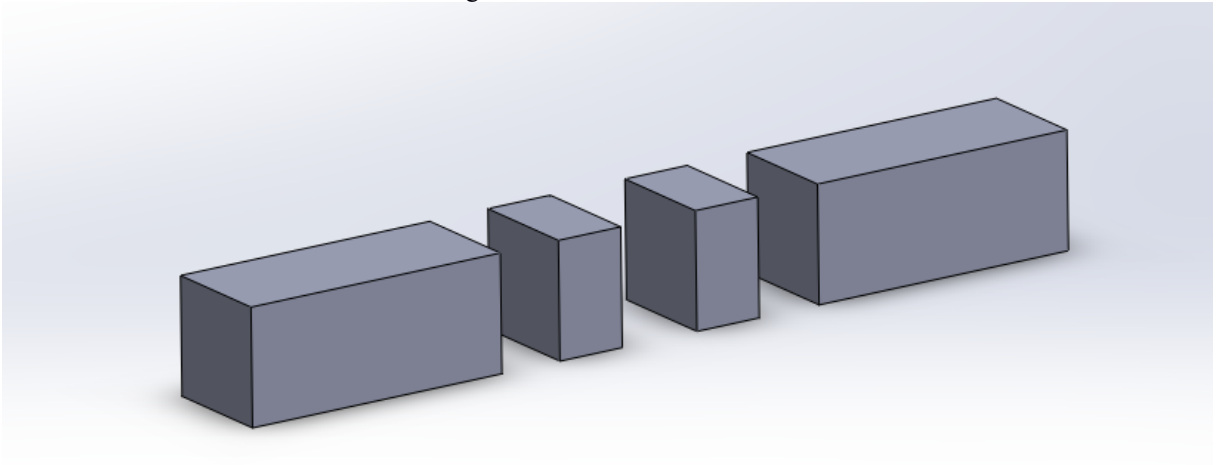
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.4.1 Preparação e análise das amostras

Após a realização do processo de soldagem, foram feitos três cortes transversais bem no centro de cada corpo de prova (Figura 30) utilizando a serra fita semiautomática com refrigeração constante durante o corte, para evitar aquecimento e alterações na microestrutura da amostra e com o intuito de evitar a coleta de dados em pontos onde poderia ter instabilidade do arco, como no início ou no fim do cordão.

Nestes cortes foram geradas duas amostras para cada ângulo de soldagem realizado.

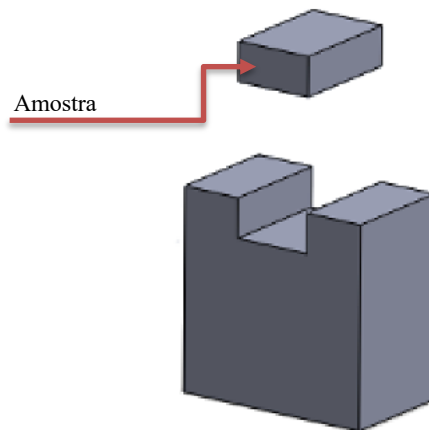
Figura 30 - Cortes transversais



Fonte: Próprio autor

Então, cortou-se o corpo de prova para diminuir a secção. Isso foi feito para que as amostras fossem embutidas e posteriormente preparadas para análise. A diminuição da área da secção faz com que a amostra caiba na embutidora e também colabora com o procedimento metalográfico de lixamento e polimento, permitindo assim que o procedimento seja mais rápido e preciso, ou seja, sem abaulamento ou variação de ângulo no plano de análise (formação de planos). A Figura 31 ilustra a amostra obtida, delimitada à região de interesse

Figura 31 – Seccionamento da região de interesse



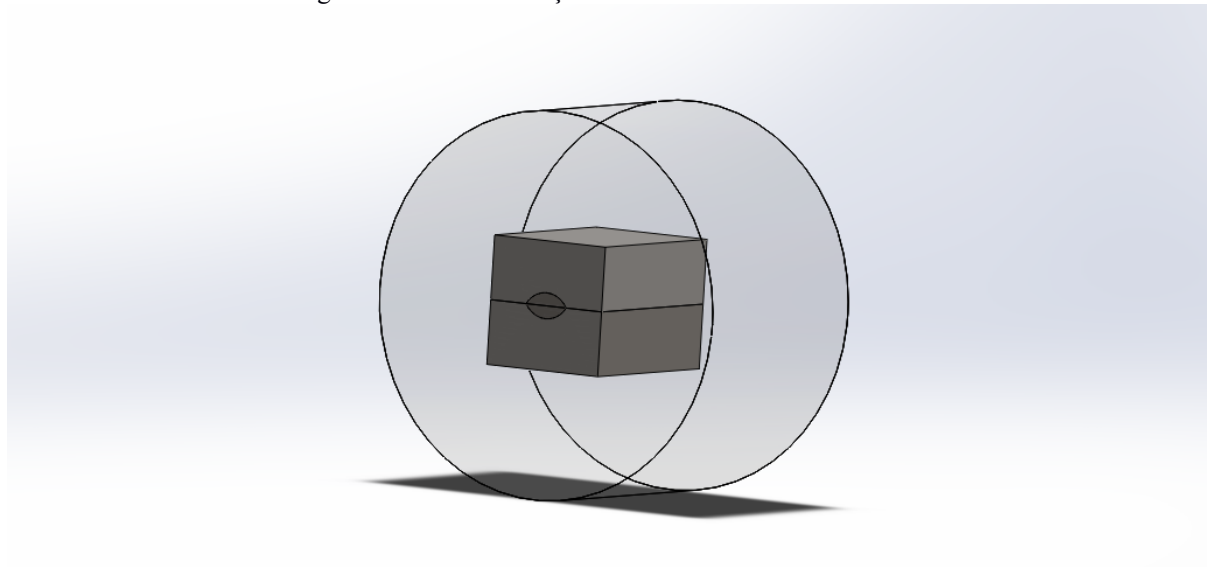
Fonte: Próprio autor

Feito o procedimento do corte, realizou-se a colagem das suas faces superiores. De forma com que a área de interesse (seção transversal do cordão de solda), se mantivesse no centro da peça. Este procedimento foi realizado para evitar o possível abaulamento do plano da área de interesse causado pelo lixamento.

Após a colagem das faces, as amostras foram para o embutimento. (Figura 32). O embutimento foi realizada em uma embutidora da marca Arotec, modelo PRE-30Mi, com os seguintes parâmetros:

- Temperatura alta: 170°C por 3 minutos
- Pressão: Entre 100 e 150kgf/cm²
- Resina: Resina Acrílica

Figura 32 - Faces das seções reduzidas coladas e embutidas



Fonte: Próprio autor

Assim que o embutimento foi realizado, iniciou-se o lixamento manual e refrigerado à água utilizando lixas d'água com granulometrias de 220 a 1200. Posterior ao lixamento, realizou-se o polimento utilizando uma politriz metalográfica marca Teclago, modelo PL02E, em velocidade baixa, montada com um disco de feltro embebido com alumina em suspensão com granulometria de 1µm.

Após o polimento, a face polida das amostras foi limpa com álcool 75%, seca com soprador térmico e então atacada por 5 segundos em submersão de Ácido Nítrico 5% (conhecido comercialmente como Nital). Ao final do tempo, cada uma das amostras foram limpas imediatamente com detergente e água corrente para interromper a reação química. Após essa limpeza, todas as amostras foram limpas novamente com álcool 75% e secas com soprador térmico e algodão, evitando umidade sobre a face, que ocasionaria interferências na visualização do cordão de solda. Todo este processo foi realizado no laboratório de metrologia do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Campus Lages

Assim, logo após realizar a preparação das amostras, elas foram protegidas com fita adesiva e então transportadas ao laboratório de Ecologia do Solo no Centro de Ciências Agroveterinária – UDESC Lages. Onde foram realizadas as análises metalográfica, utilizando um estereomicroscópio óptico da marca Zeiss modelo Stemi 508 com ampliação de 2,5x e uma câmera da marca Zeiss modelo AxioCam 208 Color para o registro fotográfico. (Figura 33)

Figura 33 - Captação das imagens digitais

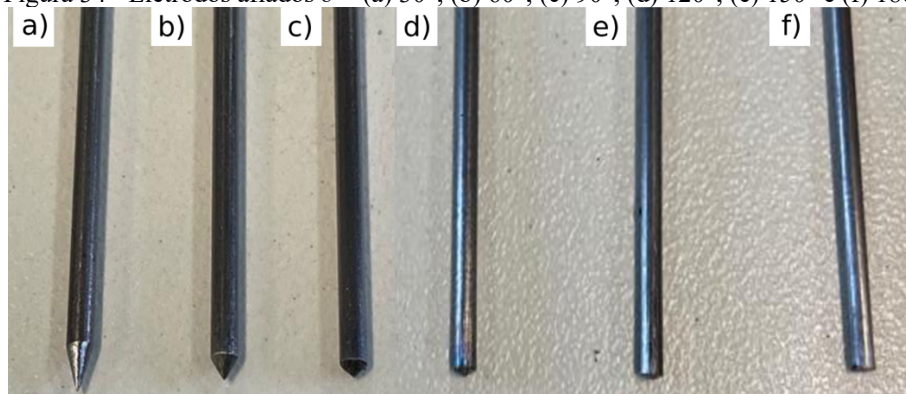


Fonte: Próprio autor

Posteriormente, com as fotos documentadas, as medições foram realizadas com o auxílio do *software* ImageJ, comumente empregado em trabalhos relacionados ao assunto como em (SUNAMOTO et al., 2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os eletrodos de tungstênio foram afiados conforme procedimento descrito no APÊNDICE – A. O resultado desse procedimento encontra-se ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Eletrodos afiados $\vartheta =$ (a) 30°; (b) 60°; (c) 90°; (d) 120°; (e) 150° e (f) 180°

Fonte: Próprio autor

Os testes resultaram em 6 corpos de prova soldados (Figura 35).

Figura 35 - Corpos de prova soldados com eletrodos de $\theta =$ (1) 30°; (2) 60°; (3) 90°; (4) 120°; (5) 150°; (6) 180°.



Fonte: Próprio autor

Figura 36 - Amostras embutidas



Fonte: Próprio autor

4.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Cada um dos trabalhos de referência apresentou uma maneira diferente de realizar a medição de suas amostras. Os parâmetros de soldagem empregados nesses estudos são apresentados na Tabela 3. O diferencial deste trabalho encontra-se na energia de soldagem expressa pela Equação 1 indicada na última coluna desta tabela. Esses valores são dados em função da tensão porque este é um parâmetro variável e se regula automaticamente nas fontes de soldagem. A tensão varia conforme a eficiência do arco, e está é afetada por: comprimento de arco, gás de proteção, configuração do eletrodo, adição de elementos ao eletrodo. (ASM HANDBOOK, 2011)

Tabela 3 - Energia de soldagem

Autor	I – (A)	v – (cm/min)	H – ($J/v.cm$)
Mills & Shiralli (1993)	150	15	600
Sunamoto (2019)	100	14,4	416,67
Key (1980)	150	18	500
Este trabalho	90	70	77,14

Fonte: Próprio autor

Shiralli e Mills (1993) utilizou três amostras com condições idênticas de soldagem em cada uma delas. E seccionou cada uma dessas amostras em 5 partes, o que gerou então 15 amostras ao todo. Foi utilizado aqui, um procedimento estatístico para determinar a significância da variação na geometria da solda. No entanto, ele utilizou uma régua com resolução de 0,5mm para retirar as medidas. O que por demonstrar falta de precisão resultaria na necessidade de um tratamento matemático.

Já Sunamoto (2019) utilizou apenas uma amostra para cada experimento. Difere do trabalho de Shiralli e Mills (1993) pois neste caso ele utilizou o software ImageJ que conta com recursos gráficos para a medição. No entanto, o mesmo cita que realizou a calibração do software de acordo com a espessura do corpo de prova, o que poderia gerar divergência nas medidas por conta da variação da espessura deste corpo de prova.

A utilização de instrumentos de medição com alta resolução ou utilização de apenas uma amostra empregados pelos autores poderiam ser justificados pela utilização de uma energia de soldagem mais elevada, que resulta em cordões de solda maiores. No entanto, esta condição não garante que a variação da geometria do cordão de solda também seja maior, e este aspecto poderia ser percebido ao utilizar um instrumento com baixa resolução.

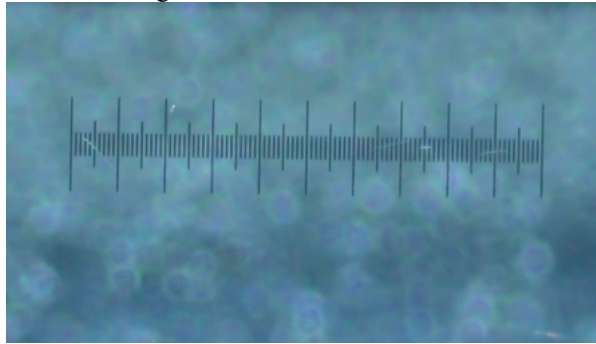
Tendo em vista que Sunamoto (2019), realizando uma medição gráfica, e calibrando de forma que poderiam haver incertezas, utilizou somente uma amostra para cada teste, então para este trabalho foi decidido utilizar duas amostras para cada experimento. O que permitiria realizar um breve tratamento estatístico e gráfico por meio do desvio padrão e então analisar o quanto realmente seriam significantes as variações encontradas e quão preciso seria o método de medição empregado.

Além disso, notou-se que para evitar a possibilidade de variação pela calibração como pode ter ocorrido no trabalho de Sunamoto (2019) e também por utilizar energias mais baixas que acarretam em geometrias do cordão de solda menores, seria necessário calibrar o software com um instrumento de medida com resolução menor. Para tal, utilizou-se uma lâmina milimetrada com resolução de 0,01mm (Figura 37).

Com o intuito de aumentar a precisão nas medições, foram determinados alguns pontos de incerteza.

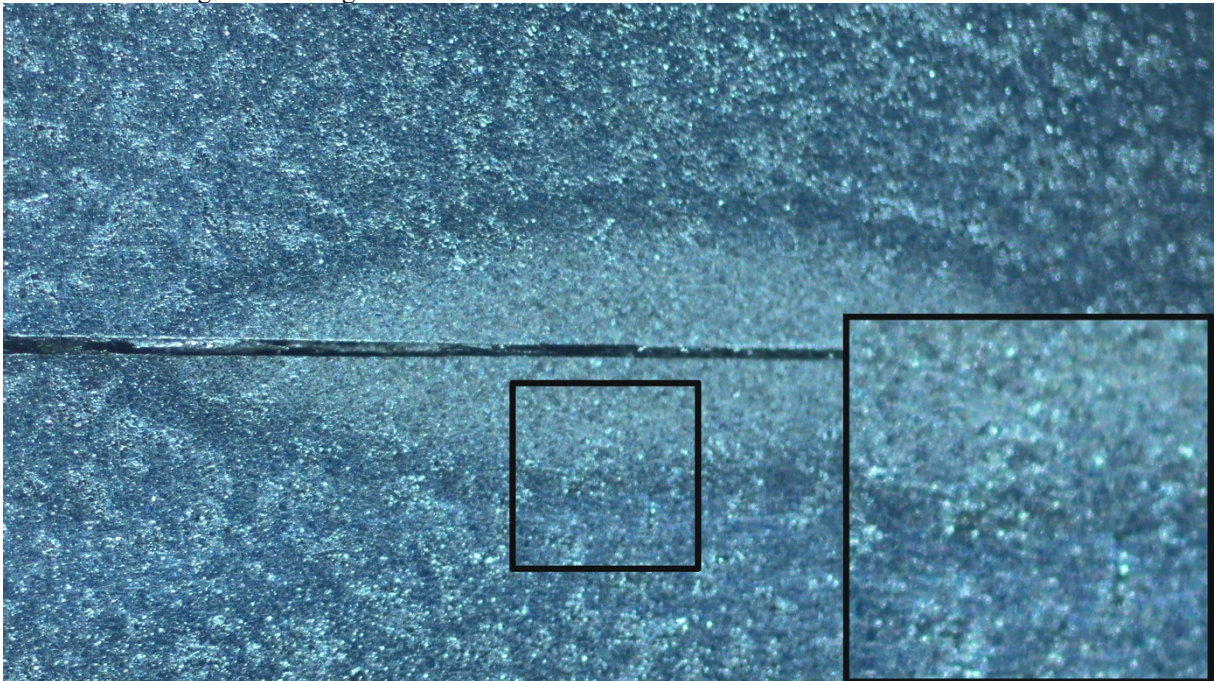
O primeiro observado, foi a dificuldade em determinar com clareza as fronteiras entre a zona fundida e a zona termicamente afetada, pois a imagem apresentava falta de contraste entre as zonas (Figura 38).

Figura 37 - Lâmina milimetrada



Fonte: Próprio autor

Figura 38 - Imagem com zoom entre a zona fundida e zona termicamente afetada

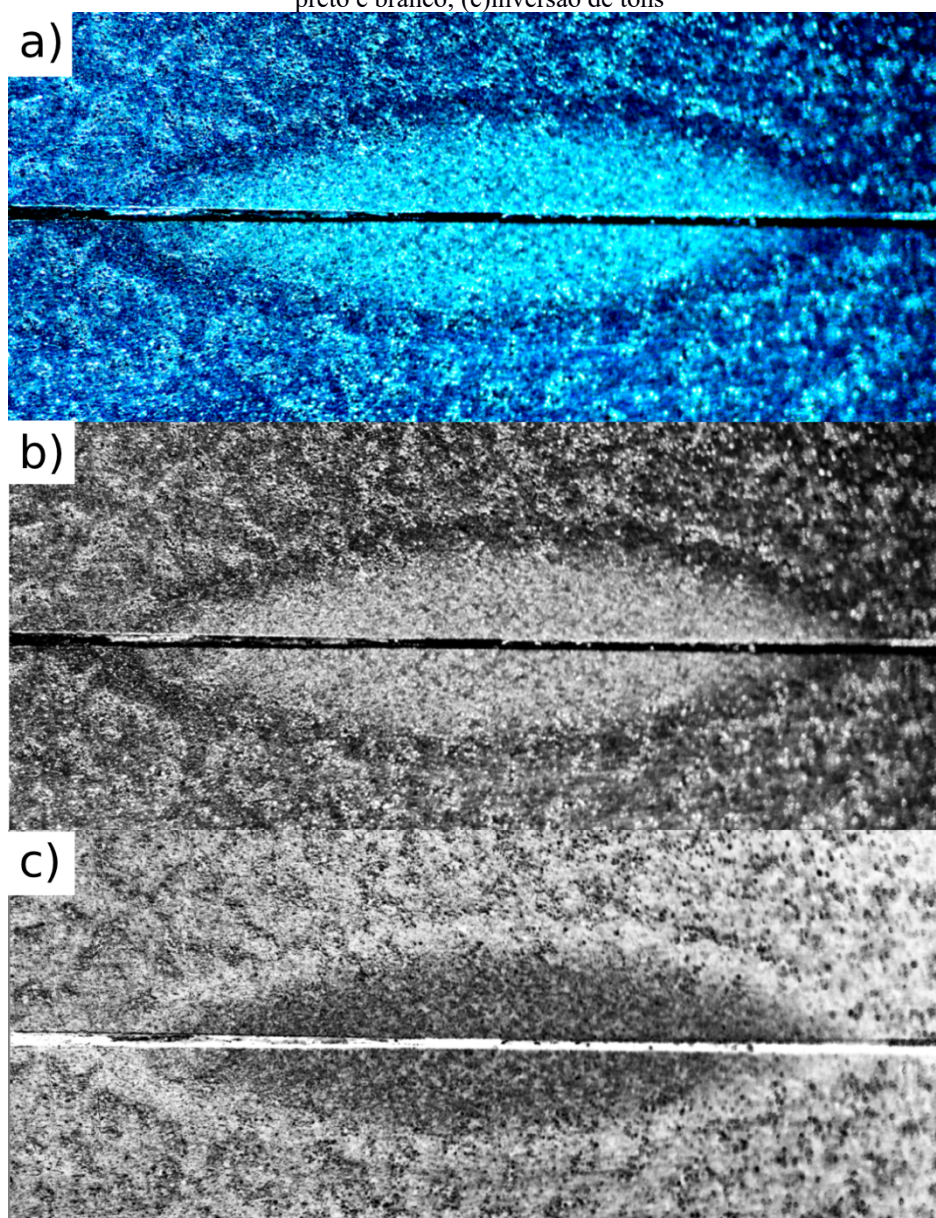


Fonte: Próprio autor

Para corrigir esse problema, foi-se utilizado dos recursos gráficos de tratamento de imagem do software ImageJ.

Então o primeiro passo foi aumentar o contraste e ajustar o brilho da imagem. Depois a imagem foi convertida para preto e branco. Com esses passos feitos, por ultimo inverteu-se os tons, o que era branco ficou preto e vice-versa (Figura 39).

Figura 39 – Tratamento de imagens (a)Aumento do contraste e ajuste do brilho da imagem; (b)conversão para preto e branco; (c)inversão de tons



Fonte: Próprio autor

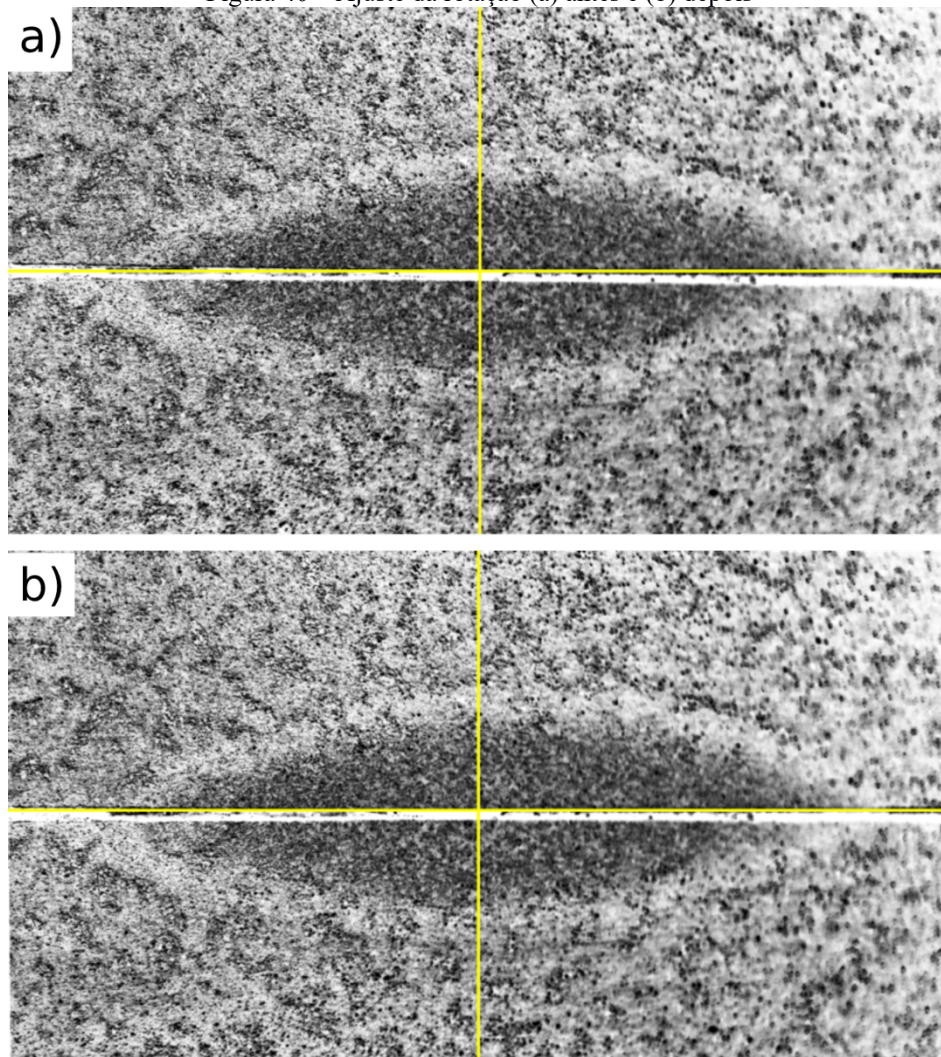
Assim, a fotografia das amostras apresentou maior clareza entre as zonas evitando a medição de pontos que fogem do interesse do estudo.

Outra característica que poderia gerar incerteza é referente a horizontalidade da imagem.

Notou-se que para realizar uma medida precisa do ponto máximo de profundidade da curva gerada pelo cordão de solda, seria necessário que essa medida fosse a mais perpendicular possível em relação a face superior da amostra.

Então, para corrigir este possível problema, optou-se por rotacionar a imagem até que a face superior da amostra se tornasse paralela à linha horizontal de base do programa ImageJ. (Figura 40)

Figura 40 – Ajuste da rotação (a) antes e (b) depois



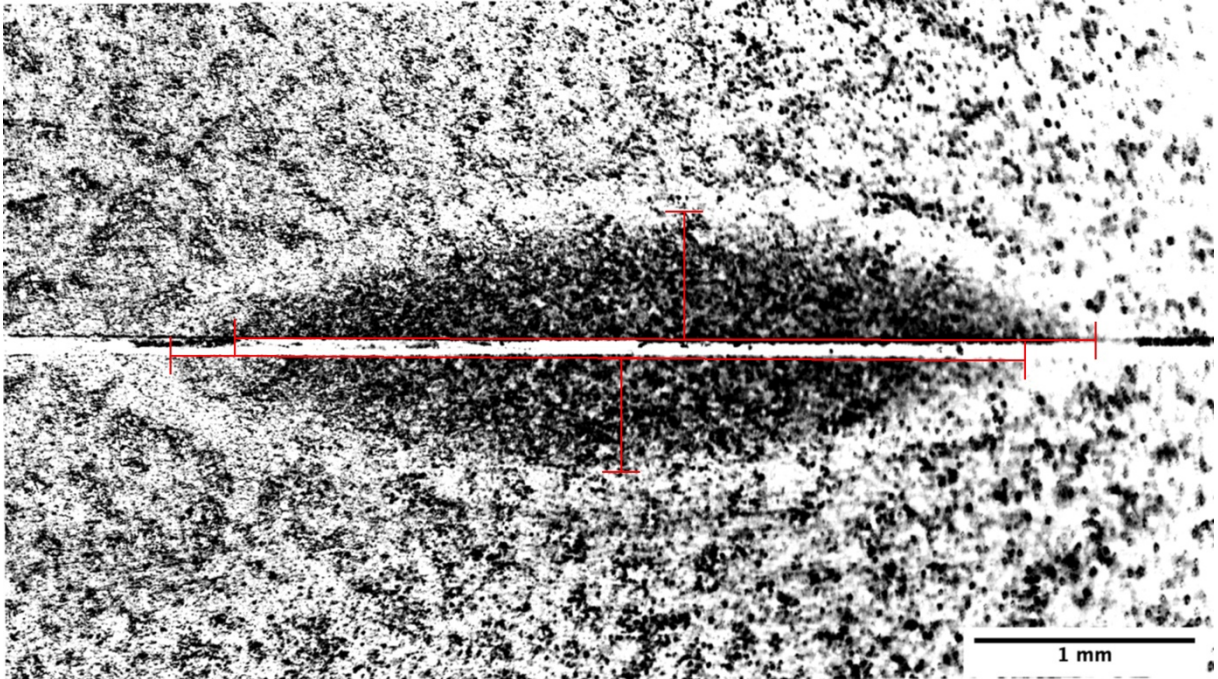
Fonte: Próprio autor

Desta forma, após retiradas as possíveis incertezas, mediu-se a penetração e a largura do cordão de solda de cada um dos corpos de prova.

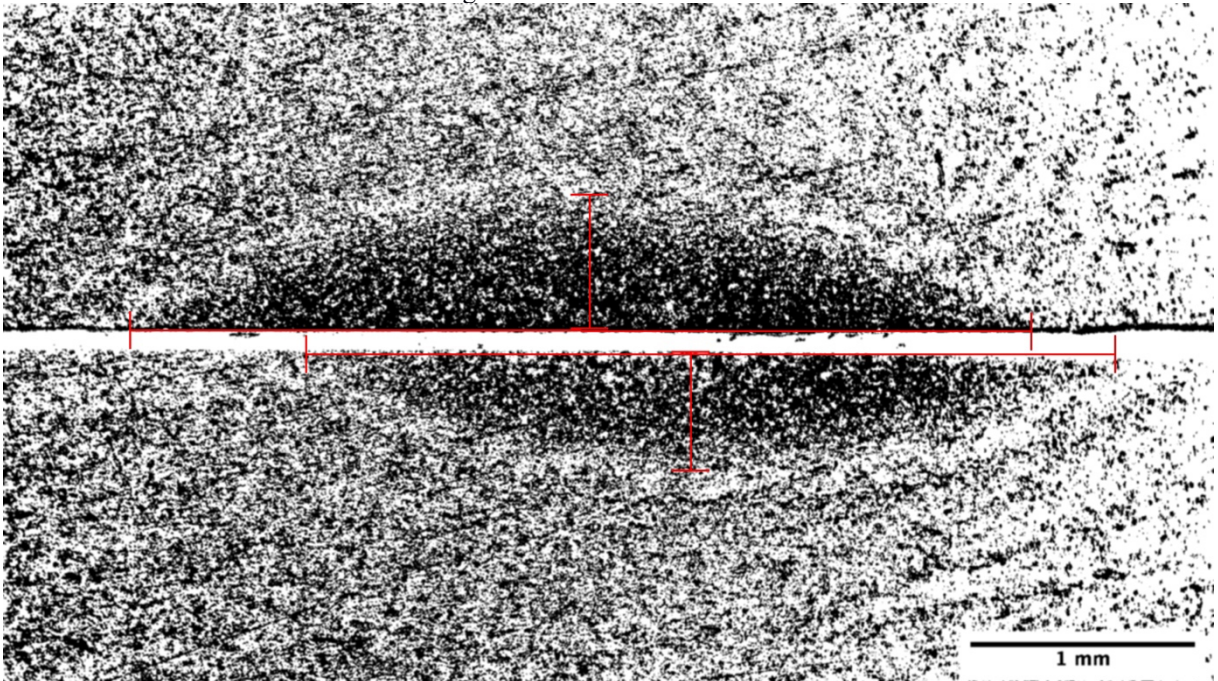
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Considerando a diferença pouco significativa entre amostras obtidas de alguns corpos de prova. A análise de resultados limitou-se aos cordões de solda obtidos por um ângulo de afiação do eletrodo de $\vartheta = 30^\circ$; 90° e 150° .

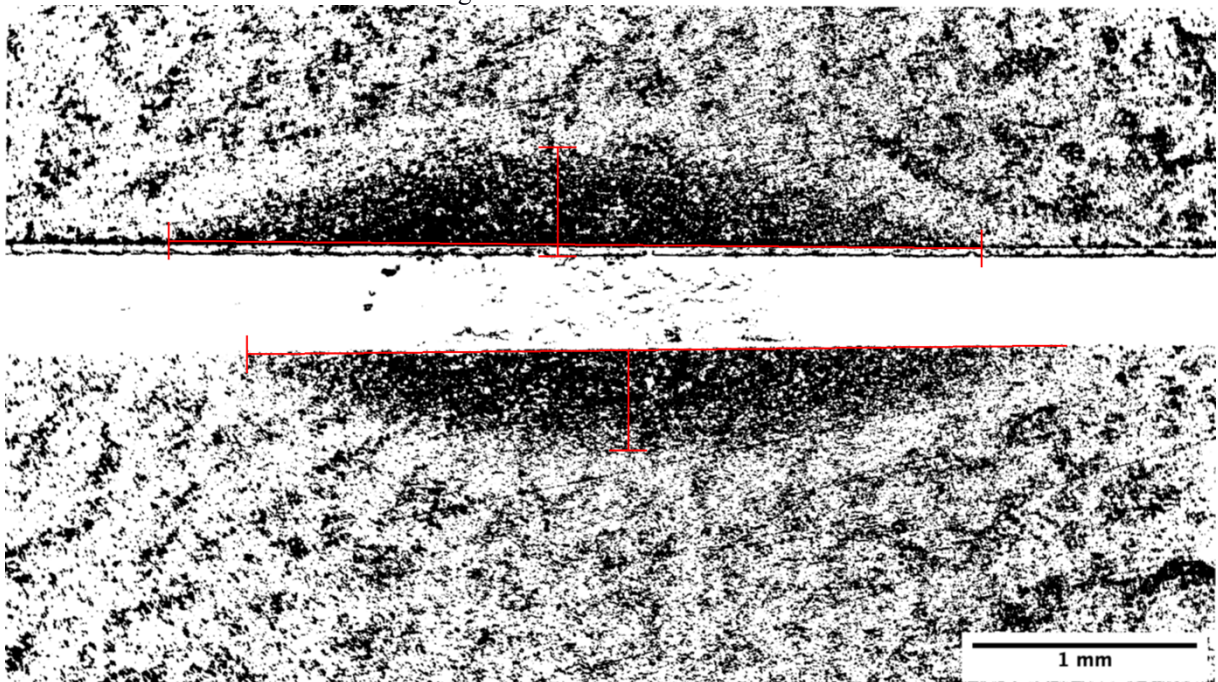
As imagens em microscopia da seção transversal desses cordões de solda encontram-se nas Figuras Figura 41, Figura 42 e Figura 43, respectivamente. As medidas obtidas encontram-se na Tabela 4.

Figura 41 - Amostra 1 - $\delta=30^\circ$ 

Fonte: Próprio autor

Figura 42 - Amostra 3 - $\delta = 90^\circ$ 

Fonte: Próprio autor

Figura 43 - Amostra 5 - $\delta = 150^\circ$ 

Fonte: Próprio autor

Após a medição ser realizada, encontraram-se os seguintes resultados descritos na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Dados encontrados nos cordões de solda das amostras

δ	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Média (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Média (mm)
30°	0,516	0,578	0,547	3,811	3,84	3,8255
90°	0,528	0,657	0,593	3,665	3,946	3,8055
150°	0,455	0,494	0,4745	3,671	3,626	3,6485

Fonte: Próprio autor

Para ficar mais clara as diferenças entre cada cordão de solda realizado, gerou-se uma nova tabela com a diferença e o desvio padrão entre cada média obtida (Tabela 5).

O desvio padrão neste caso foi empregado para analisar a precisão do método de medição, pois as medidas das amostras se encontram na mesma seção transversal.

Tabela 5 - Diferença entre as medidas do cordão de solda das amostras

δ	Altura Média (mm)	Desvio Padrão Altura	Diferença de Altura (mm)	Largura média (mm)	Desvio Padrão Largura	Diferença de Largura (mm)
30°	0,547	0,044	-	3,8255	0,021	-
90°	0,570	0,091	0,023	3,8995	0,199	0,074
150°	0,475	0,028	-0,095	3,6485	0,032	-0,251

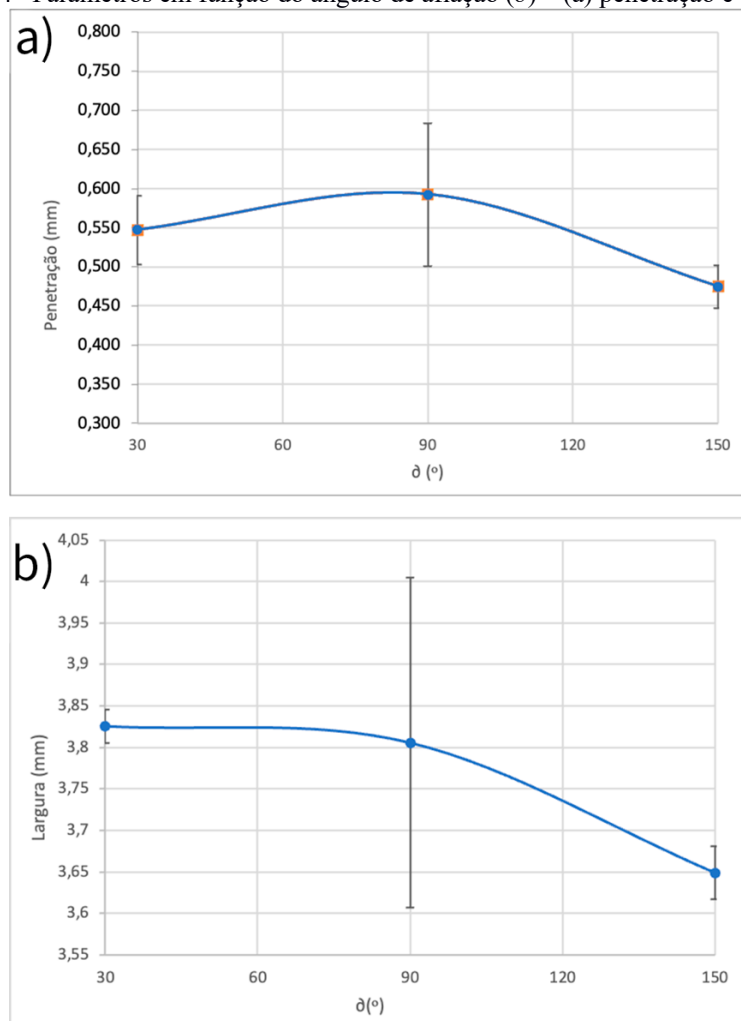
Fonte: Próprio autor

De acordo com o gráfico em função da penetração (– A) é possível notar variação entre a medida das amostras 1 e 5 e entre as amostras 3 e 5. A variação entre as amostras 1 e 3 não pode ser considerada pois os desvios padrões sofrem interferência. Isso demonstra que a medida pode estar compreendida pelas incertezas na medição. A curva apresentada demonstra um leve aumento na penetração até $\vartheta = 90^\circ$ e depois uma queda.

Ao observar a Figura 45, é notável que alguns trabalhos também apresentam um aumento na penetração até certo ângulo e posteriormente uma queda. No entanto estes outros trabalhos utilizaram aço inoxidável em seus testes, e estes são influenciados pelos elementos tenso-ativos. Este pode ser o motivo de existir um ponto de inflexão e este estar em ângulos de afiação menores.

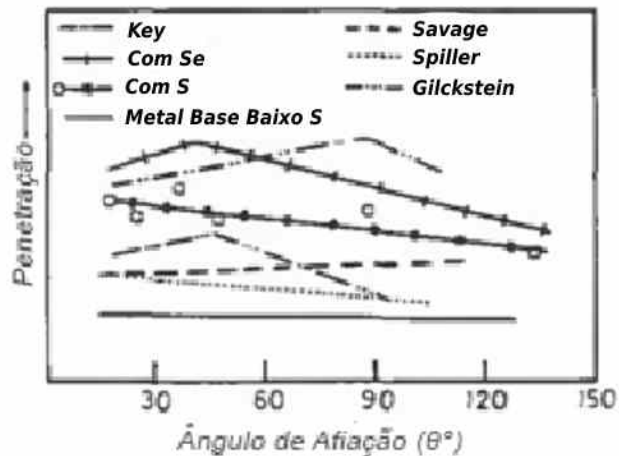
Já o gráfico em função da largura (– B) demonstrou variação somente entre as medidas 1 e 5 pois são as medidas em que os desvios padrões não sofrem interferências.

Figura 44 –Parâmetros em função do ângulo de afiação (ϑ) – (a) penetração e (b) largura



Fonte: Próprio autor

Figura 45 - Relação entre penetração do cordão de solda, adição de elementos tenso-ativos e ângulo de afiação do eletrodo encontrada por Key; Savage; Spiller; Glickstein; APUD Shiralli e Mills (1993)

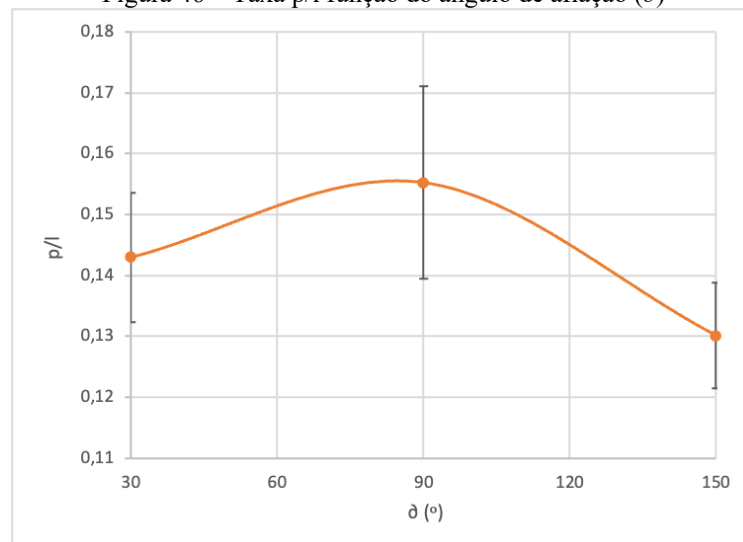


Fonte: Traduzido e adaptado de Shiralli e Mills (1993, p. 351-s)

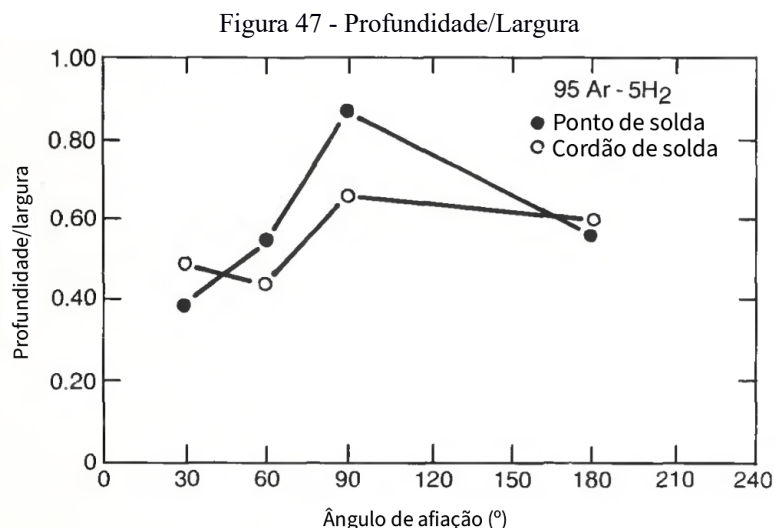
Assim, o gráfico em função da taxa p/l (penetração/largura) tem suas incertezas dadas de acordo com as incertezas geradas pelos valores de penetração e largura. Este gráfico demonstra a interligação entre as duas variáveis, porém não descreve o comportamento isolado, que é de grande valia para cordões de solda com geometrias específicas. Mas, neste é possível considerar variação de medida entre a amostra 3 e 5.

O formato da curva do gráfico p/l tem semelhança com a curva encontrada no trabalho de Key (1980) (Figura 47), onde há um aumento até $\theta = 90^\circ$ e então uma queda até $\theta = 180^\circ$.

Figura 46 – Taxa p/l função do ângulo de afiação (θ)



Fonte: Próprio autor



Fonte: Traduzido e adaptado de Key, 1980

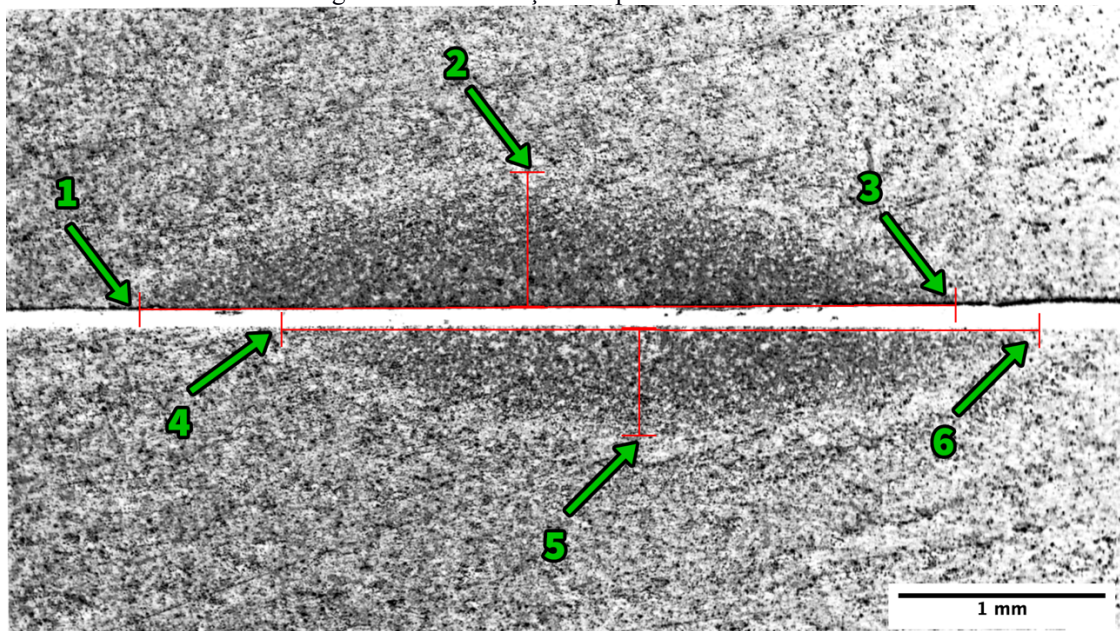
Key (1980) utilizou aço carbono em seu trabalho e demonstra um aumento na taxa (p/l) até um ângulo de afiação de 90° e depois um decréscimo até 180° (Figura 47). Os resultados encontrados aqui neste trabalho também demonstram uma curva semelhante. No entanto no trabalho deste autor, foi utilizado 95% Ar – 5% H_2 como gás de proteção. Diferente deste trabalho que utilizou 100% Ar.

Segundo Machado (1996) a adição de H_2 ao Ar torna o arco mais quente, porque diminui o poder de ionização do gás e assim é necessário o aumento na potência aplicada ao processo, o que possibilita até mesmo o aumento da velocidade de soldagem. Além disso, nota que a geometria do cordão na seção transversal tende a ser retangular e também mais estreita. Recomenda-se que essa mistura não seja utilizada para aços carbono ou baixa liga porque podem causar trincas e porosidades.

Com estes resultados é possível perceber que a precisão do método empregado foi maior para as medições efetuadas nas amostras 1 e 5. Os pontos que delimitam largura e penetração do cordão de solda ilustrado na Figura 42, referente à amostra 3 encontram-se indicados na Figura 48. Nota-se que nos pontos “4” e “2” há uma incerteza na delimitação da zona fundida, o que pode ter influenciado em um maior desvio padrão. Tal aspecto pode estar relacionado com o processo de soldagem, com o preparo e ataque da amostra, a captação da imagem ou ainda com o tratamento da imagem.

Mas considerando a reprodutibilidade da metodologia aplicada, poderiam ser descartados os efeitos causados por diferentes maneiras de preparação e ataque. Então, duas possíveis causas inerentes a este trabalho são: o paralelismo entre os planos da amostra que causam interferência no foco do microscópio ou então uma característica do processo ao utilizar $\theta = 90^\circ$.

Figura 48 - Delimitação dos pontos de interesse



Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÃO

As análises demonstraram que é possível que haja uma diferença entre os cordões de solda variando o ângulo de afiação do eletrodo. No entanto, para os parâmetros utilizados nesse trabalho, com baixa energia de soldagem, a variação é muito pequena e difícil de ser mensurada de forma precisa mesmo com a minimização das incertezas. A maior variação encontrada na penetração foi de 0,095mm e na largura, foi de 0,251mm.

A maior dificuldade encontrada foi diferenciar uma zona da outra em especial com ângulo de afiação de 90°. E neste trabalho o intuito era observar a variação da zona fundida. Porém, a formação dessas zonas é muito gradual e ao observá-las dentro de uma escala muito ampliada essa formação se demonstra ainda mais gradual, ou seja, não demonstra um contraste claro entre o início e o fim de cada uma delas.

Além disso, foi possível observar que o software ImageJ aliado a uma boa metodologia pode ser de grande utilidade para realizar análises de cordões de solda, pois este tem uma grande gama de tratamentos e medições de imagem.

Uma melhoria para a realização de trabalhos com os mesmos parâmetros utilizados neste, seria o aumento da quantidade de amostras. Com mais amostras é possível realizar um tratamento estatístico melhor e então verificar de maneira mais significativa a variação da penetração e da largura do cordão de solda de acordo com os ângulos de afiação do eletrodo.

REFERÊNCIAS

- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3ª Edição. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- SUNAMOTO, Diogo Yoshiaki et al. *Análise da influência do ângulo de afiação do eletrodo de tungstênio na penetração do cordão de solda no processo TIG*, São Paulo: Faculdade de Tecnologia (FATEC) Sertãozinho, 2019
- SHIRALI, A. A.; MILLS, K. The effect of Welding Parameters on Penetration in GTA Welds. *Welding Journal*. USA, v. 72, n. 7, p.347s-353s, jul. 1993.
- WAINER, Emilio et al. Soldagem - Processos e Metalurgia. 4ª Edição. Rio Grande do Sul: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), 2004.
- MACHADO, Ivan Guerra Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, 1996.
- MODENESI, Paulo J. A química da formação do cordão na soldagem TIG. *Soldag. insp.*, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 287-300, set. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/si/v18n3/11.pdf>. Acesso em: 03 maio 2019
- MODENESI, Paulo J. Introdução à Física do Arco Elétrico. UFMG, Belo Horizonte, jan. 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, A 108 – 99, Standard Specification for Steel Bars, Carbon Cold-Finished, Standard Quality. Barr Harbor Dr., West Conshohocken. 2000.
- ASM HANDBOOK. Welding Fundamentals and Processes. Volume 06A. Ohio. 2011.
- GOODARZI, Massoud et al. The effect of the cathode tip angle on the gas tungsten arc welding arc and weld pool: II. The mathematical model for the weld pool, Toronto: University of Toronto, 1997.
- KOU, Sindo. *Welding Metallurgy*, 2nd ed. Hoboken, New Jersey 2003.
- JEFFUS, Larry. *Welding and metal fabrication*. Canada: Delmar, Cengage Learning, 2012.
- KEY, J. F., Anode/Cathode geometry and shielding gas interrelationships in GTAW. *Welding Journal* 59(12):364-s. ,1980
- MILLS, G.S. Fundamental Mechanisms of Penetration in GTA Welding. *Welding Research Supplement*. 1979
- HIBBELER, Russel Charles. *Resistência dos Materiais*. 7ª Edição. São Paulo: Pearson, 2009.

APÊNDICE A – AFIAÇÃO DOS ELETRODOS DE TUNGSTÊNIO

- ⇒ Separação das máquinas e materiais necessários;
- ⇒ Limpeza dos eletrodos de tungstênio;
- ⇒ Encaixe do dispositivo de afiação do tungstênio na esmerilhadeira angular;
- ⇒ Encaixe da esmerilhadeira angular na morsa para evitar possíveis movimentos indevidos;
- ⇒ Encaixe do disco de desbaste na esmerilhadeira angular;
- ⇒ Aperto da porca de travamento do disco de desbaste da esmerilhadeira angular;
- ⇒ Afrouxamento da porca responsável por travar o movimento rotacional do suporte do eletrodo de tungstênio;
- ⇒ Separação do primeiro gabarito de ângulo, com ângulo de 15°;
- ⇒ Encaixe do eletrodo de tungstênio no furo do suporte do eletrodo de tungstênio;
- ⇒ Ajuste da rotação do suporte do eletrodo de tungstênio fazendo com que o eletrodo se torne paralelo à face com ângulo de 15° do gabarito já separado;
- ⇒ Aperto da porca responsável por travar o movimento rotacional do suporte do eletrodo de tungstênio garantido que não haja variação na angulação.
- ⇒ Desencosto do eletrodo de tungstênio no disco de desbaste para evitar possíveis desbastes indevidos ao ligar a máquina;
- ⇒ Abertura do mandril da parafusadeira para que o eletrodo de tungstênio se encaixe;
- ⇒ Encaixe do eletrodo de tungstênio no mandril da parafusadeira;
- ⇒ Aperto do mandril da parafusadeira;
- ⇒ Conectar a esmerilhadeira angular na tomada;
- ⇒ Ligar esmerilhadeira para iniciar o desbaste;
- ⇒ Ligar a parafusadeira para iniciar a rotação do eletrodo de tungstênio ao longo do seu próprio eixo;
- ⇒ Encostar a ponta livre no disco de desbaste para iniciar a afiação;
- ⇒ Término da afiação ao se observar um desbaste uniforme ao longo do eletrodo de tungstênio.

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO BRAÇO ROBÓTICO

```
PROC main ()  
Move L, pv001, v100, z10, tool10; //Envia o robô à um ponto alto  
Move L, pv23, v100, z10, tool10; //Aproxima rapidamente o robô da posição de soldagem  
Move L, pv3, v10, fine, tool10 //Robô faz a abertura do arco, aproximadamente 1mm de  
altura do metal base  
WaitTime 0.5; //Mantém na posição para garantir abertura do arco  
Move L, pv3, v10, fine, tool10; //Eleva-se o conjunto até atingir 2,4mm de altura a ponta do  
eletrodo de tungstênio e o metal base  
Move L, pv4, v10, fine, tool10; //Movimento de 10mm no eixo Y para realizar o cordão de  
solda  
WaitTime 3; //Mantém-se na posição por 3 segundos para realizar o fechamento do arco  
  
Move L, pv6, v100, fine, tool10; //Elevação do conjunto para finalizar a soldagem  
Stop; //Para na posição pv6 para finalizar a rotina
```

Fonte: Próprio Autor