

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

JORDANA TURECK CRUZ

ESTUDO PRELIMINAR DA SOLDAGEM TIG COM DUPLA PROTEÇÃO GASOSA

Joinville 2018

JORDANA TURECK CRUZ

ESTUDO PRELIMINAR DA SOLDAGEM TIG COM DUPLA PROTEÇÃO GASOSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha.

Joinville 2018

Jordana Tureck Cruz

ESTUDO PRELIMINAR DA SOLDAGEM TIG COM DUPLA PROTEÇÃO GASOSA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Tiago Vieira da Cunha
Presidente/Orientador

Dr. Carlos Enrique Niño Bohórquez
Membro

Eng. Zízimo Moreira Filho
Membro

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Veraluci e Braulio, que sempre foram fonte de motivação. Pessoas de origem humilde, jamais mediram esforços para que eu tivesse acesso oportunidades que nunca lhes foram ofertadas.

Aos meus amigos que me acompanharam durante a jornada da graduação: Leonardo, Vitoria, Mariana, Rafaella, Luiza, Frederico, Vanessa e Elizabeth. A amizade de vocês me foi essencial para perceber que em nenhum momento estive sozinha.

Aos amigos do ensino médio: Ana, Amanda, Brenda, Flávia, Kamila Jean, Lucas Barbosa, Lucas Brito, Lucas Lacerda e Rubens. Ainda que distantes fisicamente, se fazem presentes diariamente.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Tiago Vieira da Cunha, pela orientação recebida que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia da Soldagem, por sempre se demonstrarem solícitos para ajudar.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina Campus Joinville por viabilizar a realização de ensaios de soldagem e análise de resultados. Aos técnicos mecânicos Élvís Fernando de Oliveira e Rodrigo Voigt, pelo apoio prestado ao longo da realização deste trabalho e pela usinagem do bocal projetado.

RESUMO

O processo de soldagem TIG é empregado na união de materiais metálicos, em especial em aços inoxidáveis, ligas de titânio e ligas não ferrosas. Reconhecido pela alta qualidade do cordão de solda produzido, uma característica marcante é o comportamento estável do arco voltaico. No entanto, o processo também é caracterizado pela baixa penetração do cordão de solda e baixa produtividade. A adição de elementos ativos à poça de fusão, tal como oxigênio, é capaz de aumentar a penetração da solda. Contudo, a quantidade de elemento ativo adicionada deve ser controlada, pois quando em excesso, o efeito reverso é observado, ocasionando a diminuição da penetração. A inserção deste tipo de elemento diretamente através do gás de proteção leva à rápida perda de afiação do eletrodo de tungstênio, o que causaria a instabilidade do arco voltaico e perda de qualidade do cordão de solda. Atualmente uma nova abordagem vem sendo proposta: o processo TIG com dupla proteção gasosa, no qual dois gases são utilizados na soldagem por intermédio de dois bocais concêntricos. O gás interno é inerte, sendo que sua função é promover a proteção do eletrodo. O gás externo contém elemento ativo, o qual causa mudança no comportamento da poça de fusão. Por se tratar de uma abordagem nova, ainda não existem equipamentos comerciais que possibilitem a soldagem utilizando esta técnica, portanto, foi necessária a adaptação de uma tocha TIG convencional, a partir da qual foi projetado um bocal externo. Com a adição desta peça à tocha foi possível realizar soldagem utilizando o processo TIG com dupla proteção gasosa. Ensaios foram conduzidos com o intuito de observar a variação no comportamento do cordão de solda devido à variação da vazão do gás externo, diferentes quantidades de elemento ativo. O maior ganho em termos de penetração foi de 11,33%. Os resultados são coerentes com o comportamento esperado e indicam que a quantidade de elemento ativo adicionado pode ser controlada através da vazão do gás externo. Foi observado também que a utilização da mistura gasosa de argônio e dióxido de carbono e da mistura gasosa de argônio e oxigênio conduzem resultados semelhantes.

Palavras-Chave: TIG com dupla proteção gasosa, Elemento ativo, Aumento de penetração.

ABSTRACT

The TIG process is employed in the union of metals, especially in case of materials such as stainless steels, titanium alloys and non ferrous alloys. This process is known by the high quality of the weld bead obtained, due to a very stable electric arc. However, TIG is also characterized by the low penetration of the weld bead and a low productivity. The addition of active elements to the weld pool, such as oxygen, is capable of increasing the weld penetration. However, the quantity of active element added must be controlled, since if added in excess this components cause reverse effect by reducing the penetration. The addition of active element directly into the shielding gas leads to a fast degradation of the tungsten electrode tip, which causes instability of the arc and consequently the reduced quality of the weld bead produced. Nowadays, a new approach is proposed: the double shielded TIG, wherein two different shielding gases are used. Those gases flow along the torch by independent paths, specifically by two concentric nozzles. The intern gas is inert, and its main function is to promote the protection of the electrode. The extern gas contains active element, which can change the fluid flow in the weld pool. Since this is a new approach, there isn't commercial equipment available to weld using this technique, therefore, a conventional TIG torch was adapted. Based on the geometry of the ceramic nozzle of the torch, a extern nozzle was project and added to the torch, establishing two separated paths, one for each gas, making possible to weld using the double shielded TIG. Based on the results found on literature, welding parameters were defined and experiments were carried out using the double shielded TIG in order to investigate the changes in the weld bead due to the variation of the extern gas flow rate. The penetration reached an increase of 11,33%. The results agree with the expected behavior and also indicates that the amount of active element added can controlled by the extern flow rate. It was also observed that gas mixtures of argon and carbon dioxide and gas mixtures of argon can lead to similar results.

Key words: Double shielded TIG. Active element. Increased penetration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Soldagem TIG	14
Figura 2 – Comportamento da poça de fusão: (a) $\partial\sigma\partial T < 0$ (b) $\partial\sigma\partial T > 0$	16
Figura 3 – Variação do coeficiente ($\partial\sigma\partial T$) sistema Fe-O.....	17
Figura 4 – Razão entre penetração e largura para diferentes concentrações de dióxido de carbono no gás de proteção	18
Figura 5 – Degradação do eletrodo após soldagem TIG com uso de gás ativo	19
Figura 6 – Esquema do Processo TIG com dupla proteção gasosa	20
Figura 7 – Tocha TIG a ser adaptada	23
Figura 8 – Modelagem tocha TIG (a) Convencional (b) Com bocal externo	24
Figura 9 – (a) Bocais posicionados (corte transversal) (b) regiões de saída do gás externo (vermelho) e gás interno (azul).....	24
Figura 10 – Usinagem bocal externo.....	25
Figura 11 – Peça obtida após usinagem	25
Figura 12 – Duto concebido a fim de melhorar a distribuição de gás no interior do bocal externo.....	26
Figura 13 - Bocal com duto	26
Figura 14 – Bocal com duto e camadas de tela posicionadas	27
Figura 15 – Detalhe da fixação do bocal externo junto a tocha.....	27
Figura 16 – Bancada concebida para a realização de ensaios	29
Figura 17 - Bancada (em detalhe).....	30
Figura 18 – Macrografias dos cordões de solda obtidos no grupo de ensaios 1	36
Figura 19 – Penetração obtida nos ensaios do grupo 1	37
Figura 20 - Largura obtida nos ensaios do grupo 1	39
Figura 21 - Razão entre Penetração e Largura (P/L) obtida nos ensaios do grupo 140	
Figura 22 - Macrografias dos cordões de solda obtidos no grupo de ensaios 2	40
Figura 23 - Penetração obtida nos ensaios do grupo 2.....	41
Figura 24- Largura obtida nos ensaios do grupo 2.....	42
Figura 25 - Razão entre Penetração e Largura (P/L) obtida nos ensaios do grupo 243	
Figura 26 - Macrografias dos cordões de solda obtidos no grupo de ensaios 3	43

Figura 27 - Penetração obtida nos ensaios do grupo 3.....	44
Figura 28 – Largura obtida nos ensaios do grupo 2	45
Figura 29 - Razão entre Penetração e Largura (P/L) obtida nos ensaios do grupo 3	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem	31
Tabela 2 – Grupo de ensaios 1	32
Tabela 3 - Grupo de ensaios 2	33
Tabela 4 - Grupo de ensaios 3	34
Tabela 5 – Resultados obtidos no grupo de ensaios 1	37
Tabela 6 - Resultados obtidos no grupo de ensaios 2	41
Tabela 7 - Resultados obtidos no grupo de ensaios 3	44
Tabela 8 – Eletrodos utilizados no grupo de ensaios 1	47
Tabela 9 - Eletrodos utilizados no grupo de ensaios 2	49
Tabela 10- Eletrodos utilizados no grupo de ensaios 3	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEP - Distância eletrodo-peça

TIG - Tungsten Inert Gas

P - Penetração

L - Largura

P/L - Razão entre penetração e largura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1.	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1.	A-TIG E ADIÇÃO DE ELEMENTOS ATIVOS.....	15
2.2	TIG COM DUPLA PROTEÇÃO GASOSA	19
3	ADAPTAÇÃO DA TOCHA DE SOLDAGEM TIG	23
4	METODOLOGIA EMPREGADA NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1.	ANÁLISE DOS CORDÕES DE SOLDA OBTIDOS	35
5.2.	AFIAÇÃO DOS ELETRODOS	46
6.	CONCLUSÕES	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Desenvolvido no ambiente industrial, na década de 1940, o processo Tungsten Inert Gas (TIG) é utilizado na união de materiais metálicos, em especial aços inoxidáveis, ligas de titânio e ligas não ferrosas. Reconhecido pela alta qualidade do cordão de solda produzido, uma das características marcantes é o comportamento estável do arco voltaico estabelecido entre o eletrodo de Tungstênio e a peça a ser soldada. No entanto, o processo possui uma relativa baixa produtividade e sua aplicabilidade está limitada a chapas finas, em decorrência da baixa penetração. Em função disso, há décadas são desenvolvidos estudos acerca de métodos para melhorar esta característica.

Na década de 1980 surgiram as primeiras publicações sugerindo que a adição de elementos, determinados ativos, tais como oxigênio e enxofre, causaria mudança no comportamento da poça de fusão. Para realizar a adição de tais materiais, uma das alternativas seria o uso de gás ativo no processo, no entanto, o ambiente se torna altamente agressivo ao eletrodo de Tungstênio, que se desgasta rapidamente, perdendo assim a afiação e diminuindo drasticamente a estabilidade do arco voltaico.

Atualmente, uma nova técnica aplicada ao processo TIG vem sendo estudada, conhecida por TIG com dupla proteção gasosa. A proposta é fazer uso simultâneo de gás inerte e mais interno, que funciona como proteção ao eletrodo de Tungstênio, combinado com gás ativo, mais externo, que é responsável pela adição dos elementos ativos à poça de fusão. Trabalhos disponíveis na literatura demonstraram que tal estratégia de fato é efetiva na preservação do eletrodo. Tal proteção é diretamente dependente dos parâmetros de soldagem, tais como vazão de gás ativo e gás inerte, comprimento estendido do eletrodo, concentração do elemento ativo no gás e tipo de corrente utilizada. No entanto, ainda há relativamente poucas publicações acerca do assunto.

A fim de contribuir para melhor entendimento das implicações de variações dos parâmetros no processo, este trabalho aborda a influência da variação da vazão do gás externo, o que implica diretamente na quantidade de elemento ativo

adicionado à poça de fusão, com o objetivo de contribuir ainda mais para o entendimento desta técnica promissora, porém, ainda incipiente.

1.1. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar os efeitos da variação da vazão de gases no processo de soldagem TIG com dupla proteção gasosa.

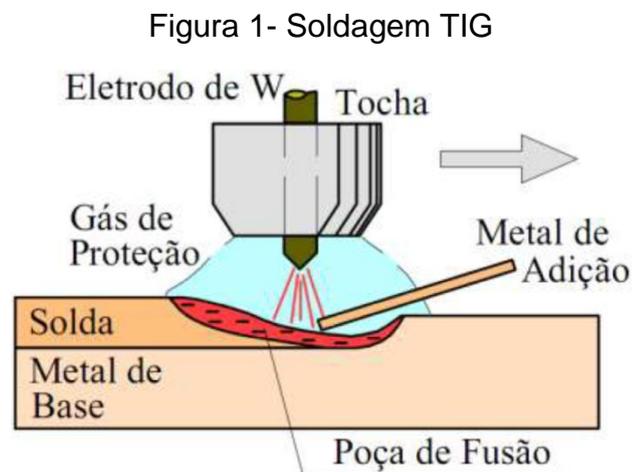
1.2.2 Objetivos Específicos

Como desdobramento do objetivo geral, podem ser listados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a adaptação de uma tocha TIG para o processo TIG com dupla proteção gasosa;
- Realizar a soldagem com o processo TIG com dupla proteção gasosa;
- Avaliar a influência da variação da vazão de gás externo sobre os cordões de solda obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No processo de soldagem TIG a fonte de calor se dá através do estabelecimento de um arco voltaico entre o eletrodo de tungstênio, não consumível, e a peça a ser unida. Durante a soldagem, o eletrodo, o arco voltaico e a poça de metal fundido são protegidos por um fluxo contínuo de gás inerte, em geral, Argônio ou Hélio. Pode haver a adição de material juntamente a poça de fusão, por meio de arames, por exemplo. A Figura 1 ilustra o processo.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2014).

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2014), o TIG é caracterizado pelo arco voltaico estável, o que leva a obtenção de cordões de solda de boa qualidade. Por este motivo, este processo é indicado para aplicações onde a qualidade da união é de extrema importância, como por exemplo, o passe de raiz em tubulações.

Além disso, a soldagem TIG pode ser empregue na união de diversos materiais considerados de difícil soldabilidade tais como aços inoxidáveis, ligas de titânio e metais não ferrosos.

Contudo, o processo é considerado de baixa produtividade e baixa penetração do cordão de solda, estando limitado a chapas finas, com espessuras de cerca de três milímetros. Neste contexto, desde a década de 1960 há pesquisas que

visam o aumento da penetração do cordão de solda obtido no processo TIG, entre as alternativas propostas esta a adição de elementos ativos.

2.1. A-TIG E ADIÇÃO DE ELEMENTOS ATIVOS

De acordo com Lu et al. (2010) o formato do cordão de solda obtido está diretamente relacionado com o fluxo de material líquido na poça de fusão durante a soldagem, o qual é dependente de um conjunto de fatores sendo que o de maior influência é a tensão superficial.

A tensão superficial varia de acordo com a temperatura. Na superfície da poça de fusão, entre o centro e as regiões periféricas há uma grande variação de temperatura, indicando uma grande variação de tensão superficial.

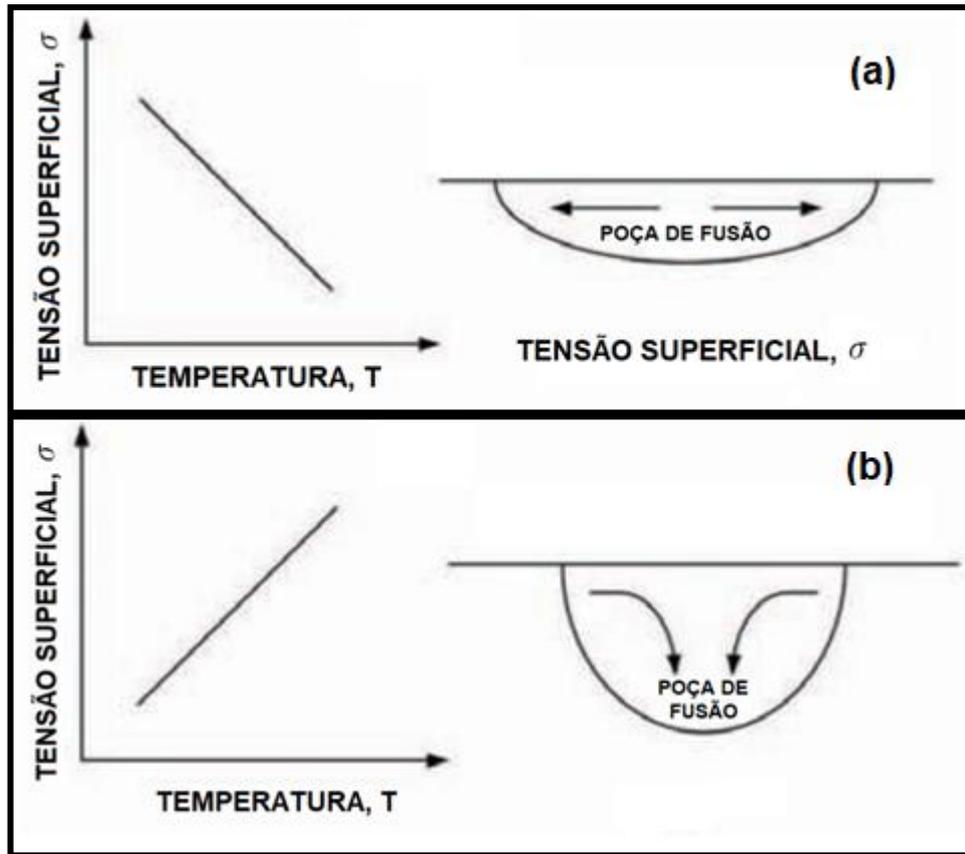
O fluxo de material líquido tende a ir de regiões de menor tensão superficial para regiões de maior tensão superficial. Tal comportamento é conhecido como efeito Marangoni (Lu et al. (2004)).

De uma forma geral, o aumento da temperatura implica na redução da tensão superficial ($\partial\sigma/\partial T < 0$), portanto, a região central da poça apresenta menor tensão superficial. Sendo assim o fluxo de metal líquido tende a ocorrer do centro para as extremidades, e como consequência um cordão de solda largo e raso é formado, tal como mostra a Figura 2 (a).

Segundo Heiple e Roper (1982), a adição de pequenas quantidades de elementos ativos, tais como enxofre e oxigênio, vem a influenciar o comportamento da poça de fusão, de forma a aumentar a penetração do cordão de solda.

A adição de elementos ativos vem a modificar o gradiente de tensão superficial da poça de fusão. O valor de tensão superficial passa a ser maior com o aumento da temperatura, ($\partial\sigma/\partial T > 0$). Essa mudança faz com que o fluxo de metal se dê em direção ao centro da poça, o que contribui para aumento da profundidade da poça de fusão, e, portanto, o aumento da penetração cordão de solda, tal como ilustra a Figura 2 (b).

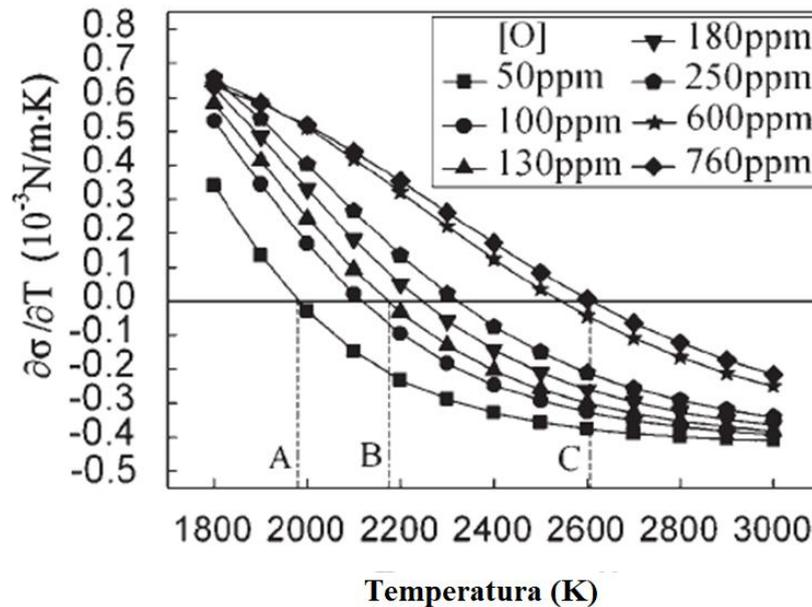
Figura 2 – Comportamento da poça de fusão: (a) $\partial\sigma/\partial T < 0$ (b) $\partial\sigma/\partial T > 0$



Fonte: adaptado de Lu et al. (2010).

De acordo com Li et al. (2013), para um sistema Fe-O com o aumento da temperatura o valor do gradiente de tensão superficial, ($\partial\sigma/\partial T$), diminui. Tal como mostra a Figura 3, com maiores concentrações de elemento ativo, no caso oxigênio, o valor do gradiente de tensão superficial atinge o valor negativo em temperaturas cada vez mais altas.

Figura 3 – Variação do coeficiente ($\partial\sigma/\partial T$) sistema Fe-O



Fonte: adaptado de Li et al. (2013).

Desta forma, quanto mais átomos de oxigênio na poça, maior a temperatura na qual o gradiente de tensão superficial passará a ser negativo. No entanto, de acordo com Lu et al. (2004), quando há excesso de elemento ativo ocorre formação de uma camada óxidos na superfície de metal fundido, o que vem a interferir na transferência de calor para a poça e no fluxo de metal líquido, diminuindo a penetração do cordão de solda.

Visando introduzir o elemento ativo na soldagem TIG, o processo A-TIG foi proposto pela primeira vez por Gurevich e Zamkov (1966), pelo *E.O. Paton Institute of Electric Welding*.

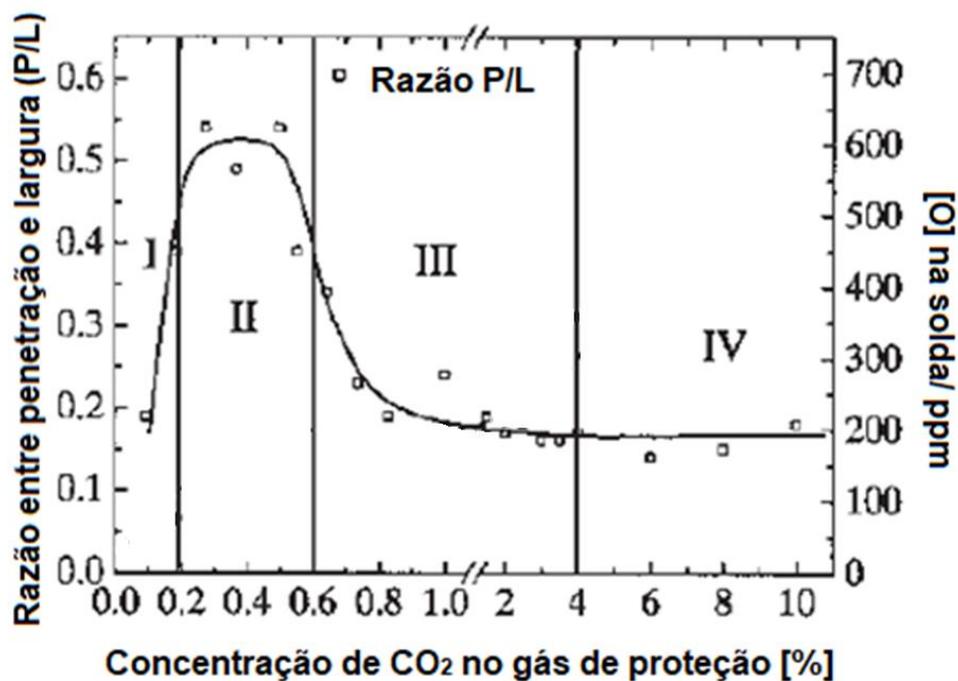
Esta técnica aplicada ao TIG fundamenta-se na introdução de elementos ativos a poça de fusão através do uso de fluxos sólidos. Uma fina camada de fluxo é depositada sobre a superfície do metal de base. Publicações tais como Xu et al. (2007), demonstram que este processo é capaz de efetivamente levar a cordões de solda com maior penetração.

Contudo, apesar de efetivo, a adaptação do processo A-TIG no ambiente industrial é difícil, pois, a quantidade de fluxo aplicada sobre a superfície deve ser extremamente controlada para que a concentração de elemento ativo adicionada à poça de fusão leve de fato ao aumento da penetração, sendo esta característica a principal desvantagem.

Uma alternativa aos fluxos, como fonte de elemento ativo, é a inserção direta através do gás de proteção. O primeiro trabalho publicado sobre esta abordagem foi o de Heiple e Burgardt (1985), no qual a abordagem proposta foi a adição de pequenas quantidades de dióxido de enxofre ao gás de proteção. Os resultados obtidos, em termos de penetração do cordão de solda, foram satisfatórios, no entanto, o gás ativo em questão é tóxico, o que novamente representaria dificuldades à aplicação industrial.

No trabalho de Lu et al. (2004) é proposta a adição de dióxido de carbono ao gás de proteção, neste caso argônio. Os melhores resultados, em termos da razão entre profundidade e largura do cordão, se dão com uma mistura de argônio e dióxido de carbono, com variação de 0.2 a 0.6% de gás ativo. De acordo com a Figura 4, nota-se que em concentrações superiores a 0.6% ocorre rápida diminuição da razão entre profundidade e largura do cordão, o que é atribuído à formação de uma camada de óxidos sobre a superfície da poça de fusão.

Figura 4 – Razão entre penetração e largura para diferentes concentrações de dióxido de carbono no gás de proteção



Fonte: adaptado de Lu et al. (2004)

Ainda de acordo com Lu et al. (2004), a adição do gás oxigênio, como elemento ativo, ao argônio apresenta resultados favoráveis para as mesmas porcentagens obtidas com a adição de dióxido de carbono, de 0.2 a 0.6%, considerando o uso dos mesmos parâmetros de soldagem.

Embora a adição de elemento ativo por meio da mistura direta no gás proteção tenha se provado efetiva no aumento da penetração do cordão de solda, a afiação do eletrodo é altamente comprometida, tal como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Degradação do eletrodo após soldagem TIG com uso de gás ativo

Gás de proteção	Tocha TIG tradicional	Gás de proteção	Tocha TIG tradicional
He- 0.2%CO ₂		He- 0.5%CO ₂	

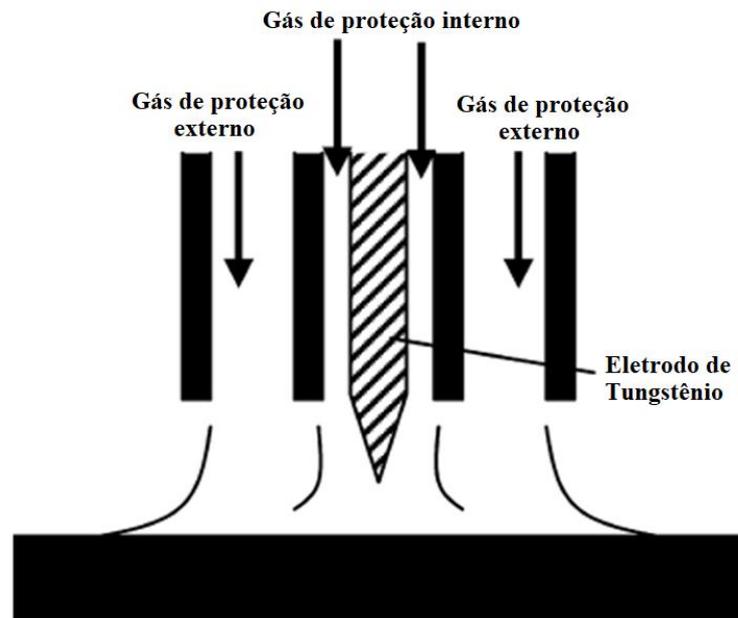
Fonte: adaptado de Fujii et al. (2008).

A presença do gás ativo, ainda que em baixa concentração, em contato direto com o eletrodo de tungstênio causa degradação do mesmo, que acaba perdendo sua afiação e trazendo instabilidade ao arco voltaico, o que é altamente indesejável uma vez que isto vem a comprometer a qualidade do cordão de solda obtido.

2.2 TIG COM DUPLA PROTEÇÃO GASOSA

Atualmente uma nova técnica, o TIG com dupla proteção gasosa, do inglês *Double Shielded TIG*, vem sendo proposta visando à introdução de elemento ativo a poça de fusão. A ideia é fazer uso de dois gases, um inerte e uma mistura de gás inerte e gás ativo. A passagem dos gases pela tocha ocorre separadamente, por meio de dois bocais concêntricos, como pode ser visto na Figura 6. O trabalho de Fujii et al. (2008) é uma das primeiras publicações sobre o tema.

Figura 6 – Esquema do Processo TIG com dupla proteção gasosa



Fonte: adaptado de Fujii et al. (2008).

O bocal externo é utilizado para a condução do gás com elemento ativo. Já o bocal interno é utilizado para a condução do gás inerte, com o intuito de formar uma atmosfera de proteção ao eletrodo de tungstênio.

No trabalho de Li et al. (2010), dois experimentos distintos foram realizados, ambos fazendo uso do processo TIG com dupla proteção gasosa. Em ambos os casos foi utilizado hélio como gás interno e uma mistura de hélio e gás oxigênio como gás externo.

No primeiro caso, foi utilizado hélio como gás interno, com vazão de 5 L/min e como gás externo uma mistura de hélio com 5% de oxigênio, com vazão de 20 L/min. Já no segundo caso, o gás interno se manteve hélio, no entanto, a vazão foi aumentada para 10 L/min e o gás externo passou a ser hélio com 20% de oxigênio, a 10 L/min.

No primeiro caso a razão entre profundidade e largura do cordão de solda atingiu valor de 0,75, sendo que no segundo caso o valor obtido foi de 0,84, ambos superiores ao obtido com o processo TIG convencional, o qual foi de 0,28. Este resultado indica que é possível variar a concentração de gás ativo no gás externo,

desde que haja devida compensação na vazão para que quantidade apropriada de elemento ativo seja adicionada à região da superfície da poça de fusão.

Uma análise da influência de parâmetros de soldagem no processo TIG com dupla proteção gasosa foi realizada por Li et al. (2013). Os gases utilizados são hélio e oxigênio. Os parâmetros variados são velocidade de soldagem, comprimento do arco voltaico e corrente de soldagem.

O aumento da velocidade de soldagem implica na diminuição da penetração do cordão de solda. Isso ocorre, pois quanto maior a velocidade, menor energia de soldagem, sendo assim, a variação de temperatura na superfície diminui e como consequência, o gradiente de tensão também irá diminuir, uma vez que a tensão superficial varia com a temperatura. Em decorrência disto, um menor fluxo de calor é transferido para a região central da poça de fusão, diminuindo assim a penetração.

O comprimento do arco influencia o comportamento da poça de fusão de duas formas distintas sendo elas a diluição de elemento ativo e o gradiente de temperatura na superfície da poça de fusão. Quanto maior a altura do arco, maior área de contato com o gás que contém de elemento ativo, permitindo que ocorra sua dissociação e introdução à poça de fusão. Portanto, inicialmente espera-se um aumento na penetração com o aumento do comprimento do arco. Por outro lado, o aumento do arco voltaico causa um aumento na área da superfície da poça, levando a um menor $\partial T/\partial r$ o que vem a diminuir o gradiente de tensão, uma vez que este é dependente da variação de temperatura na superfície. Levando em consideração estes dois fatores, de acordo com os resultados obtidos por Li et al. (2013), a DEP deve ser cerca de 3 mm, para que dessa forma os efeitos citados acima contribuam para o aumento da penetração.

Com relação à corrente de soldagem, quanto maior o seu valor maior é o poder calorífico do arco voltaico, conseqüentemente maior quantidade de oxigênio é adicionado à poça de fusão. Como resultado, há uma maior penetração. No entanto, caso haja excesso de elemento ativo na poça ocorre a formação de óxidos que, tal como mencionado anteriormente, leva à diminuição da penetração.

O trabalho de Lima et al. (2017) também aborda o processo TIG com dupla proteção gasosa, no entanto é uma das únicas publicações que aborda o uso dos gases argônio e dióxido de carbono. O parâmetro variado entre os ensaios realizados é a concentração de gás ativo no gás externo.

O melhor resultado foi obtido com a mistura de argônio com 2,5% de dióxido de carbono no gás externo, onde a razão entre profundidade e largura do cordão de solda atingiu o valor de 0,37. Foi observado que o eletrodo de tungstênio utilizado no ensaio não apresentou perda de afiação.

3 ADAPTAÇÃO DA TOCHA DE SOLDAGEM TIG

O processo TIG com dupla proteção gasosa é uma abordagem relativamente nova e atualmente ainda não existem equipamentos disponíveis no mercado para a soldagem por meio desta técnica. Portanto, foi necessário o desenvolvimento da adaptação de uma tocha TIG convencional (Figura 7) para o TIG com dupla proteção gasosa.

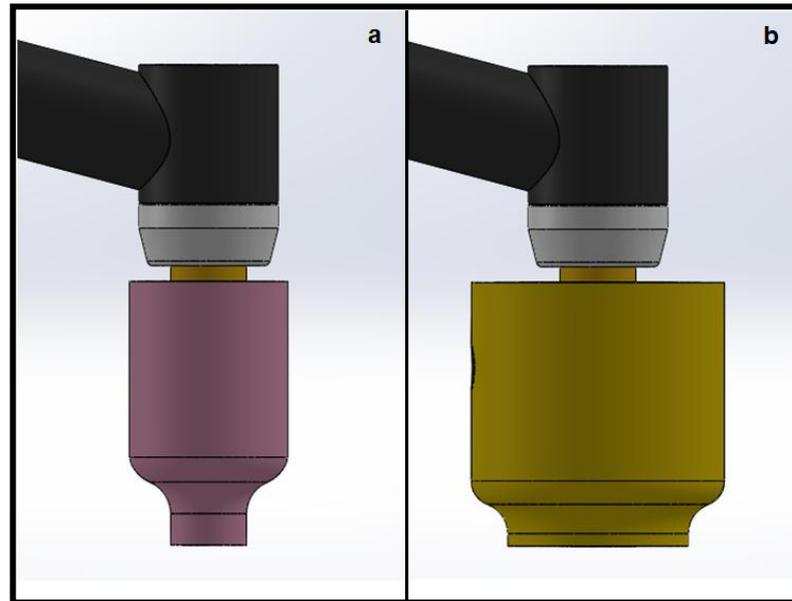
Figura 7 – Tocha TIG a ser adaptada



Fonte: A Autora.

Tal como mencionado anteriormente, e o próprio nome indica, este processo é fundamentado na utilização de dois gases, de forma que sua passagem pela tocha de soldagem ocorra por caminhos distintos. Para isso foi desenvolvido um bocal adicional a ser fixado de forma externa e concêntrica ao bocal já existente na tocha. A Figura 8 (a) representa a tocha TIG convencional e na Figura 8 (b) é possível observar o bocal externo proposto, já posicionado.

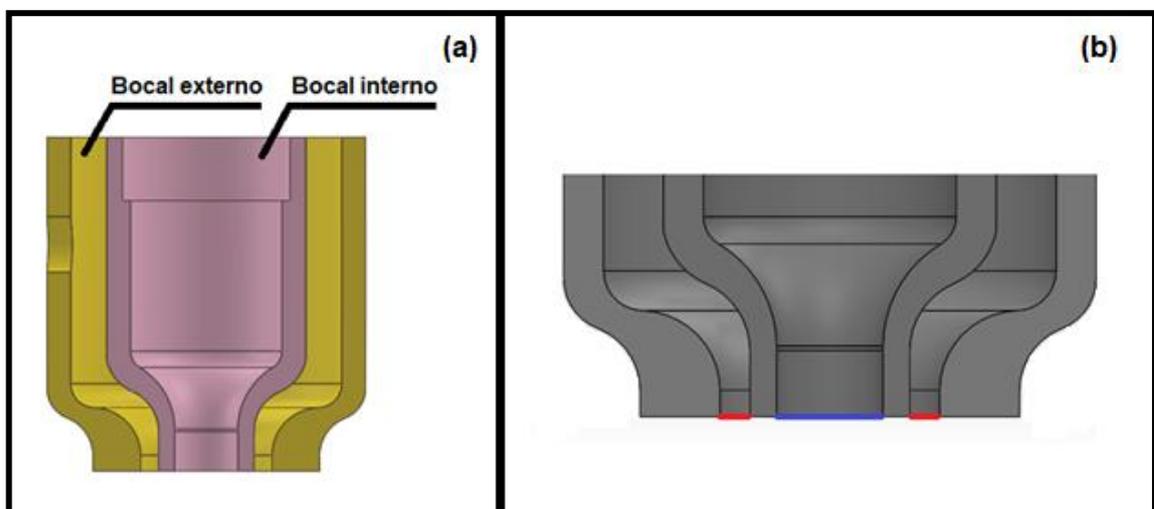
Figura 8 – Modelagem tocha TIG (a) Convencional (b) Com bocal externo



Fonte: A Autora.

O formato deste novo bocal foi definido com base no formato do bocal cerâmico original da tocha, dessa forma, a geometria da nova peça é coerente com o componente já existente, o que garante a não interferência entre as peças, tal como mostra a Figura 9.

Figura 9 – (a) Bocais posicionados (corte transversal) (b) regiões de saída do gás externo (vermelho) e gás interno (azul)



Fonte: A Autora.

Durante a soldagem, devido a proximidade com o arco voltaico, o bocal é exposto a altas temperaturas, portanto, o material empregue na fabricação do componente deve resistir a esta condição, além de dissipar calor facilmente. Dessa forma, optou-se pelo uso de latão para a fabricação da peça, pois além de atender os requisitos, é também um material de relativo baixo custo.

Dada a definição da geometria, a peça foi fabricada por meio de um processo de usinagem. A partir de um cilindro maciço de material, o componente foi usinado em torno mecânico (Figura 10).

Figura 10 – Usinagem bocal externo



Fonte: A Autora.

Na Figura 11 é possível observar a peça usinada.

Figura 11 – Peça obtida após usinagem



Fonte: A Autora.

Em seguida, foi posicionado um duto de cobre para a passagem do gás, com 11 furos de cerca de 1 mm de diâmetro cada, igualmente espaçados, tal como mostra a Figura 12. A função deste duto é a melhor distribuição de gás no bocal, agindo de forma semelhante a um difusor.

Figura 12 – Duto concebido a fim de melhorar a distribuição de gás no interior do bocal externo



Fonte: A Autora.

Na Figura 13 é possível observar o duto já posicionado no interior do bocal.

Figura 13 - Bocal com duto



Fonte: A Autora.

Logo abaixo, próximo à saída do bocal, foram posicionadas camadas de tela metálica (Figura 14), com o intuito de reduzir a turbulência do gás que deixa a tocha, funcionando de forma semelhante a o dispositivo “gás lens”. Caso haja grandes turbulências nos fluxos de gás que deixam a tocha, certamente ocorrerá mistura de gases, expondo o eletrodo de tungstênio ao elemento ativo do gás externo, o que seria indesejável.

Figura 14 – Bocal com duto e camadas de tela posicionadas



Fonte: A Autora.

A redução da turbulência dos gases que deixam a tocha é importante no processo TIG com dupla proteção gasosa, pois o gás interno e o gás externo não devem se misturar imediatamente na saída dos bocais, tendo em vista que a função do gás inerte é estabelecer uma atmosfera protetora ao eletrodo. Por este mesmo motivo o bocal que conduz o gás interno conta com o dispositivo “gás lens”.

Por fim, o novo bocal foi posicionado junto à tocha com o auxílio de uma borracha e um parafuso para auxiliar a fixação, tal como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Detalhe da fixação do bocal externo junto a tocha



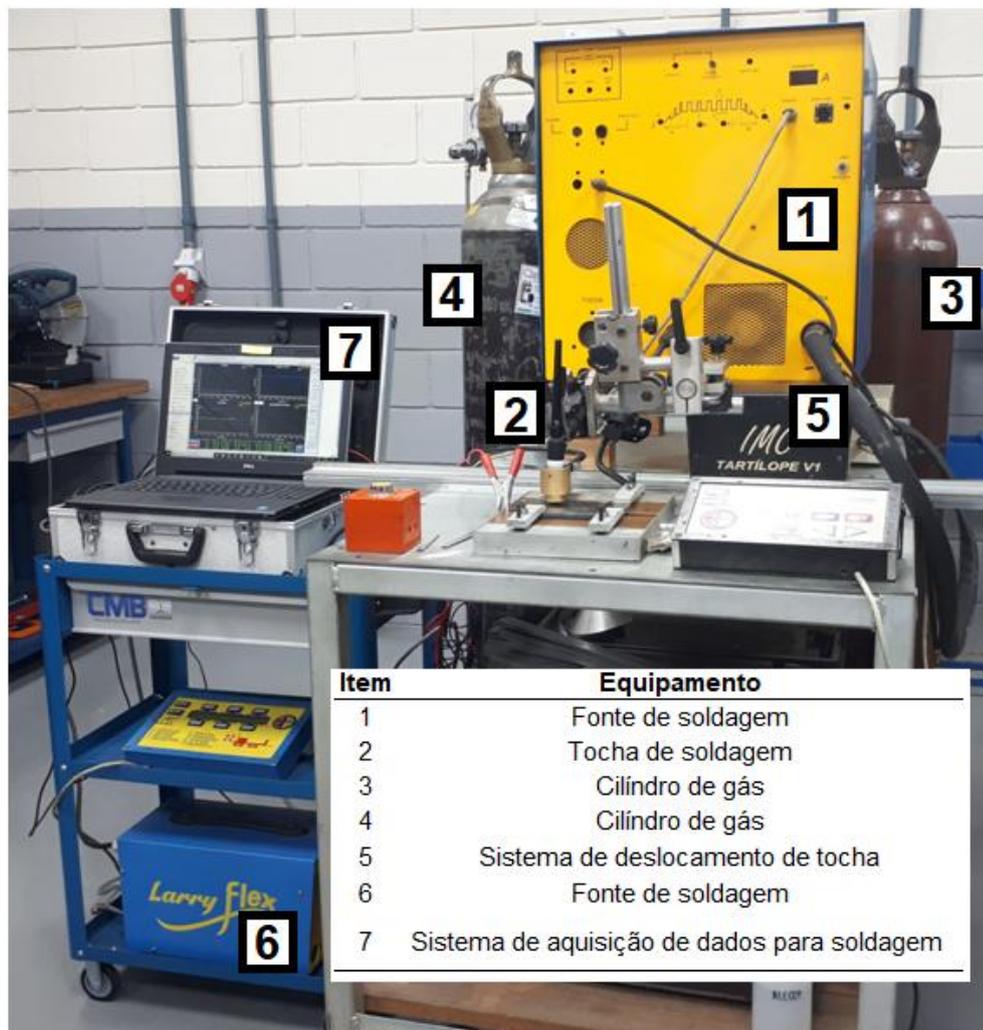
Fonte: A Autora.

A partir da adaptação da tocha foi possível realizar ensaios de soldagem com o processo TIG com dupla proteção gasosa.

4 METODOLOGIA EMPREGADA NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM

Para a realização de ensaios de soldagem foi concebida uma bancada, no Laboratório de Tecnologia da Soldagem- LTS, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville (Figura 16).

Figura 16 – Bancada concebida para a realização de ensaios



Fonte: A Autora.

Na Figura 17 é apresentada a bancada em detalhe.

Figura 17 - Bancada (em detalhe)



Fonte: A Autora.

A bancada montada para a realização dos ensaios utilizando o TIG com dupla proteção gasosa é muito semelhante a uma bancada TIG convencional. Conta com uma fonte de soldagem e uma tocha. Além disso, foi utilizada uma fonte auxiliar, responsável pelo controle do fluxo de gás externo.

A vazão do gás externo é de grande importância, pois através deste parâmetro é controlada a quantidade de elemento ativo adicionada. Dessa forma o equipamento SAP V4 foi utilizado para a medida da vazão do gás externo em todos os ensaios, assegurando a aplicação da correta vazão.

Foram utilizados eletrodos EW Th-2, com 2,4 mm de diâmetro, afiados com ângulo de 60°. Em cada ensaio foi utilizado um eletrodo recém-afiado, tendo em vista o interesse em observar se houve degradação da afiação do componente após a soldagem.

O material de base utilizado foi aço ASTM A36, proveniente de uma barra chata de 79,2 mm de largura e 7,9 mm de espessura. A partir desta barra foram extraídas placas de 120 mm de comprimento. A superfície da barra chapa é revestida por uma camada de proteção, a qual teve de ser removida com o auxílio de uma esmerilhadeira.

Com o intuito de conferir maior estabilidade aos ensaios, em termos de velocidade de soldagem e altura de arco, para a realização dos ensaios foi utilizado um sistema de deslocamento automático da tocha (Tartílope V1). Este equipamento

é composto basicamente por um suporte de tocha, que permite a fixação da tocha na posição desejada, e um dispositivo mecânico, o qual desliza sobre um trilho, sendo responsável pelo deslocamento da tocha com velocidade previamente definida.

Para a definição dos ensaios a serem realizados foram fixados valores de corrente e velocidade de soldagem, distância eletrodo-peça, e vazão do gás interno (Tabela 1), os quais foram estabelecidos com base em dados encontrados na literatura.

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem

Corrente de soldagem	120 A
Velocidade de soldagem	12 cm/min (2 mm/s)
DEP	3 mm
Comprimento estendido do eletrodo	3 mm
Gás Interno	Argônio

Fonte: A Autora.

Tendo como base o trabalho de Lima et al. (2017) o melhor resultado é obtido com a concentração de 2,5% de dióxido de carbono no gás externo, o qual tem vazão de 10L/min.

Considerando as Condições Normais de Temperatura e Pressão, 22,4 L é o volume ocupado por 1 mol de moléculas de gás. Portanto em 1 minuto ocorre a vazão de 10 L de gás, o que é equivalente a vazão de 0,45 mol de moléculas. De acordo com a constante de Avogadro, $6,02E23 \text{ mol}^{-1}$, isto significa que $2,69E23$ moléculas deste gás são introduzidas à região a cada minuto.

$$22,4 \text{ L} \text{ --- } 1 \text{ mol}$$

$$10 \text{ L} \text{ --- } x \text{ mol}$$

$$x = \frac{10}{22,4} = 0,45 \text{ mol}$$

$$1 \text{ mol} \text{ --- } 6,02E23 \text{ moléculas}$$

$$0,45 \text{ mol} \text{ --- } x \text{ moléculas}$$

$$x = 2.69E23 \text{ moléculas}$$

Tendo em vista que a concentração de dióxido de carbono no gás externo é de 2,5%, 6,72E21 moléculas de dióxido de carbono são adicionadas à região do arco voltaico, em um minuto.

$$2,69E23 \text{ moléculas} \text{ --- } 100\%$$

$$x \text{ moléculas} \text{ --- } 2,5 \%$$

$$x = (2,69E23) * (0,025)$$

$$x = 6,72E21 \text{ moléculas}$$

Portanto, para que uma quantidade semelhante de elemento ativo seja depositada junto ao arco, fazendo uso da mistura gasosa de argônio com 15% de dióxido de carbono, a vazão do gás externo deve ser ajustada para cerca de 1,67 L/min.

$$6,72E21 \text{ moléculas} \text{ --- } 15\%$$

$$x \text{ moléculas} \text{ --- } 100\%$$

$$x = 4,48E22 \text{ moléculas}$$

$$22,4 \text{ L} \text{ --- } 6,02E23 \text{ moléculas}$$

$$x \text{ L} \text{ --- } 4,48E22 \text{ moléculas}$$

$$x = 1,67 \text{ L}$$

Com base nesta vazão, foi definido o primeiro conjunto de ensaios, tal como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Grupo de ensaios 1

Ensaio	Vazão Gás Interno		Vazão Gás Externo	
	Gás Interno	(L/min)	Gás Externo	(L/min)
REF10	Ar	10	-	-
I10EC1	Ar	10	Ar-15%CO2	1
I10EC1.5	Ar	10	Ar-15%CO2	1,5
I1EC2	Ar	10	Ar-15%CO2	2
I1EC4	Ar	10	Ar-15%CO2	4
I1EC6	Ar	10	Ar-15%CO2	6
I1EC8	Ar	10	Ar-15%CO2	8
I10EC10	Ar	10	Ar-15%CO2	10

Fonte: A Autora.

O segundo grupo de ensaios foi estabelecido visando adicionar a mesma quantidade de elemento ativo, no entanto, fazendo uso de oxigênio, como gás ativo, misturado ao argônio. A composição do gás utilizado é argônio com 5% de oxigênio.

$$6,72E21 \text{ moléculas} - - - - - 5\%$$

$$x \text{ moléculas} - - - - - 100\%$$

$$x = 1,20E23 \text{ moléculas}$$

$$22,4 \text{ L} - - - - - 6,02E23 \text{ moléculas}$$

$$x \text{ L} - - - - - 1,34E23 \text{ moléculas}$$

$$x = 5,00 \text{ L}$$

Dessa forma, seguindo o mesmo raciocínio utilizado anteriormente, a vazão deste gás deve ser de 5 L/min para que a devida quantidade de elemento ativo seja inserida na região. Na Tabela 3 constam os ensaios definidos para este grupo

Tabela 3 - Grupo de ensaios 2

Ensaio	Gás Interno	Vazão Gás Interno (L/min)	Gás Externo	Vazão Gás Externo (L/min)
REF10	Ar	10	-	-
I10E2.5	Ar	10	Ar-5%O2	2,5
I10E5	Ar	10	Ar-5%O2	5
I10E7.5	Ar	10	Ar-5%O2	7,5

Fonte: A Autora.

O terceiro grupo de ensaios foi definido com base no trabalho de Lu et al. (2010), o qual utiliza uma mistura de hélio com 5% oxigênio como gás externo, e hélio como gás interno. O intuito deste grupo de ensaios é verificar se resultados semelhantes ao de Lu et al. (2010) são obtidos ao ser utilizada a mistura gasosa de argônio com 5% de oxigênio como gás externo, e argônio como gás interno.

Tabela 4 - Grupo de ensaios 3

Ensaio	Vazão Gás Interno		Vazão Gás Externo	
	Gás Interno	(L/min)	Gás Externo	(L/min)
REF5	Ar	5	-	-
I5E10	Ar	5	Ar-5%O2	10
I5E15	Ar	5	Ar-5%O2	15
I5E20	Ar	5	Ar-5%O2	20

Fonte: A Autora.

Para cada ensaio foi produzido um cordão de solda de cerca de 100 mm de comprimento. Com o auxílio de ferramentas de corte, a partir de cada cordão obtido foi extraída uma amostra, as quais foram retiradas da região central do cordão de solda.

Após o corte, as amostras foram preparadas para metalografia. Para isto, primeiramente foram embutidas e em seguida passaram por processo de lixamento, no qual foram utilizadas lixas com granulação de 180, 240, 400 e 600, respectivamente.

Por fim foi realizado ataque químico com Nital 2% para a revelação da zona fundida, o que permite visualizar os aspectos geométricos dos cordões obtidos.

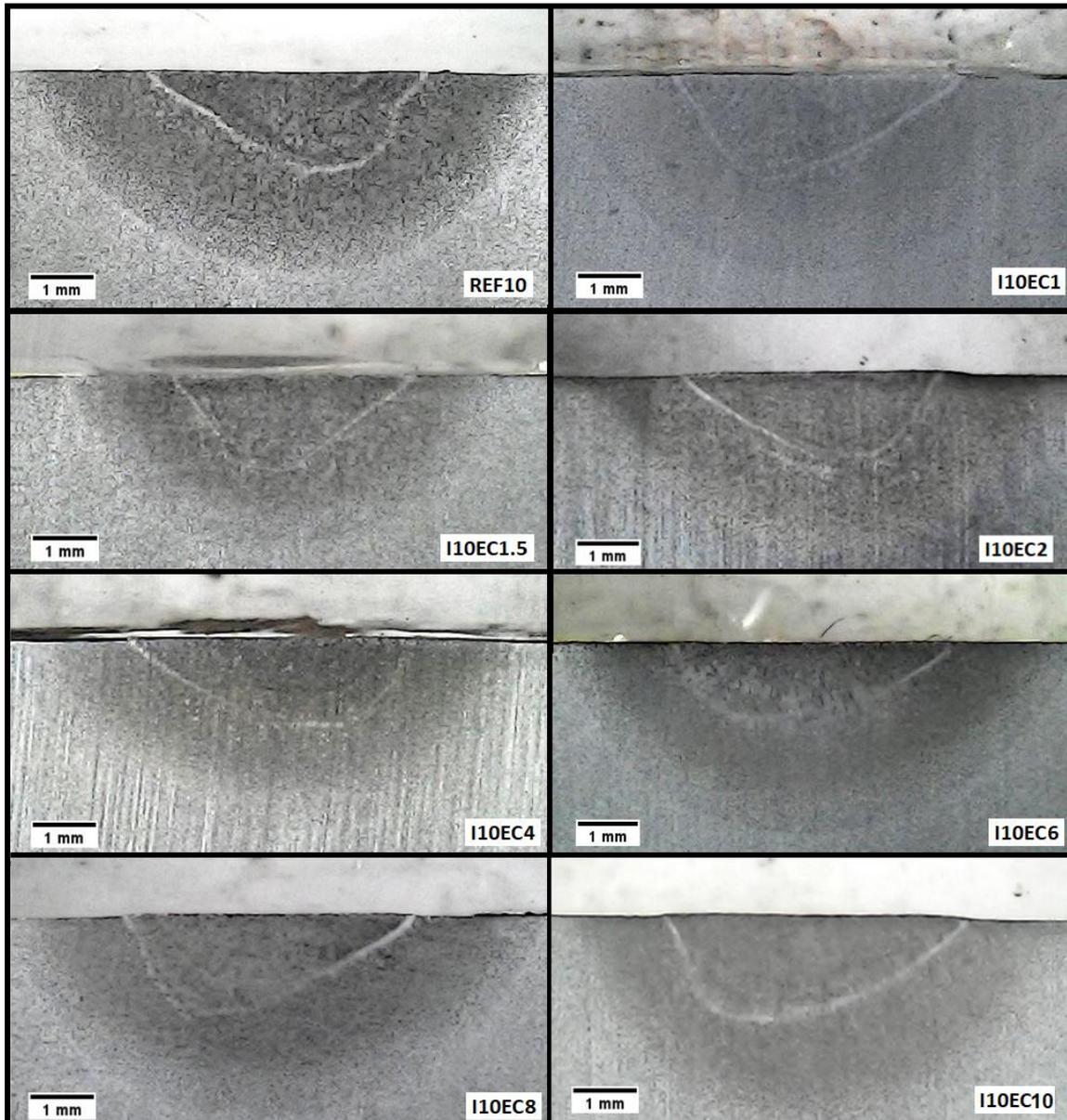
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são divididos em dois grupos, sendo eles a análise dos cordões de solda obtidos nos ensaios e a análise da afiação dos eletrodos.

5.1. ANÁLISE DOS CORDÕES DE SOLDA OBTIDOS

Na Figura 18 são apresentadas as macrografias das amostras dos cordões de solda obtidos nos grupo de ensaios 1.

Figura 18 – Macrografias dos cordões de solda obtidos no grupo de ensaios 1



Fonte: A Autora.

A partir da macrografia das amostras foram extraídos dados de penetração e largura dos cordões de solda obtidos.

Na Tabela 5 encontram-se os resultados obtidos no grupo de ensaios 1, em termos de penetração (P), largura (L) e razão entre penetração e largura (P/L).

Tabela 5 – Resultados obtidos no grupo de ensaios 1

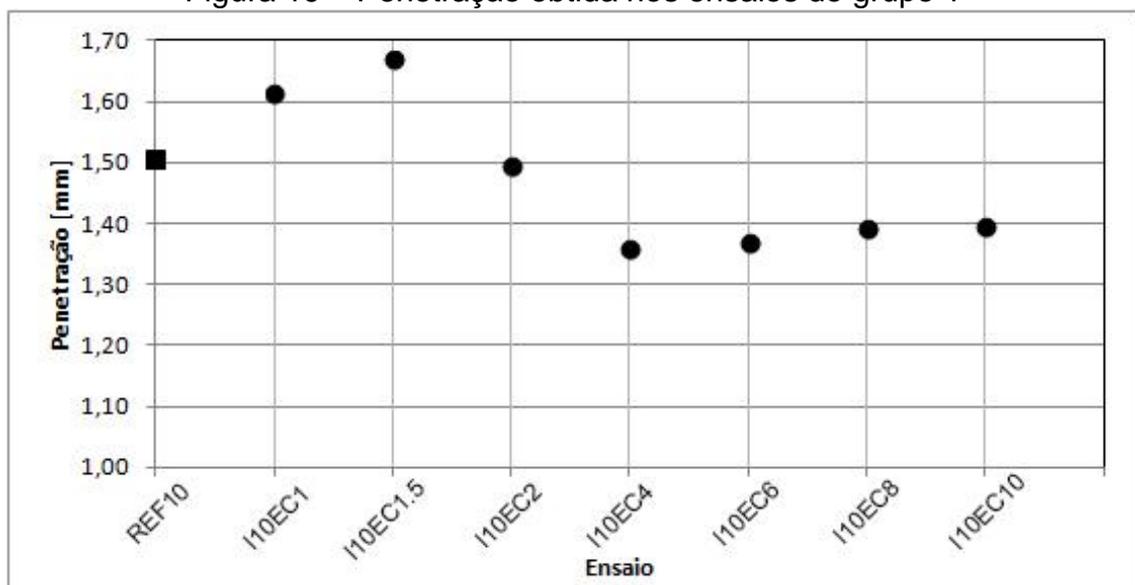
Ensaio	P (mm)	L (mm)	P/L
REF10	1,50	4,24	0,35
I10EC1	1,61	4,46	0,36
I10EC1.5	1,67	4,05	0,41
I10EC2	1,50	4,08	0,37
I10EC4	1,36	4,42	0,31
I10EC6	1,37	4,53	0,30
I10EC8	1,39	4,40	0,32
I10EC10	1,40	4,57	0,31

Fonte: A Autora.

A

Figura 19 mostra graficamente os resultados obtidos em termos de penetração.

Figura 19 – Penetração obtida nos ensaios do grupo 1



Fonte: A Autora.

Neste grupo, os ensaios foram conduzidos utilizando argônio com 15% dióxido de carbono como gás externo. Conforme os dados apresentados o maior valor de penetração foi obtido no ensaio I10EC1.5, no qual a vazão do gás externo foi de 1,5 L/min. Com esta vazão, a adição de elemento ativo na região da poça de fusão, quantitativamente, é aproximadamente a mesma que obteve os melhores resultados no trabalho de Lima et al. (2017), onde o gás utilizado é argônio com 2,5% dióxido de carbono a 10 L/min.

Observa-se também que com o aumento da quantidade de elemento ativo adicionada, através do aumento da vazão do gás externo, ocorre diminuição da penetração, a qual atinge valores inferiores ao obtido no ensaio de referência. Este comportamento vai de encontro ao relatado na literatura. A justificativa para isto é o excesso de elemento ativo adicionado, que leva à formação de camada de óxidos na superfície da poça de fusão, que por sua vez compromete a transferência de calor.

Os resultados obtidos indicam que é possível compensar uma maior concentração de gás ativo através de devida diminuição da vazão, viabilizando assim o uso de uma mistura de gás comercial. Na literatura, o trabalho de Li et al. (2010) relata constatação semelhante, no entanto, foram utilizadas misturas gasosas de hélio e oxigênio, como gás externo, e somente hélio, como gás interno.

Quando comparado ao ensaio de referência, o ganho percentual em penetração foi de apenas 11,33%. Na literatura, são relatados ganhos de cerca de 150%

Esta divergência quantitativa nos resultados pode ter sido originada devido a diversas questões.

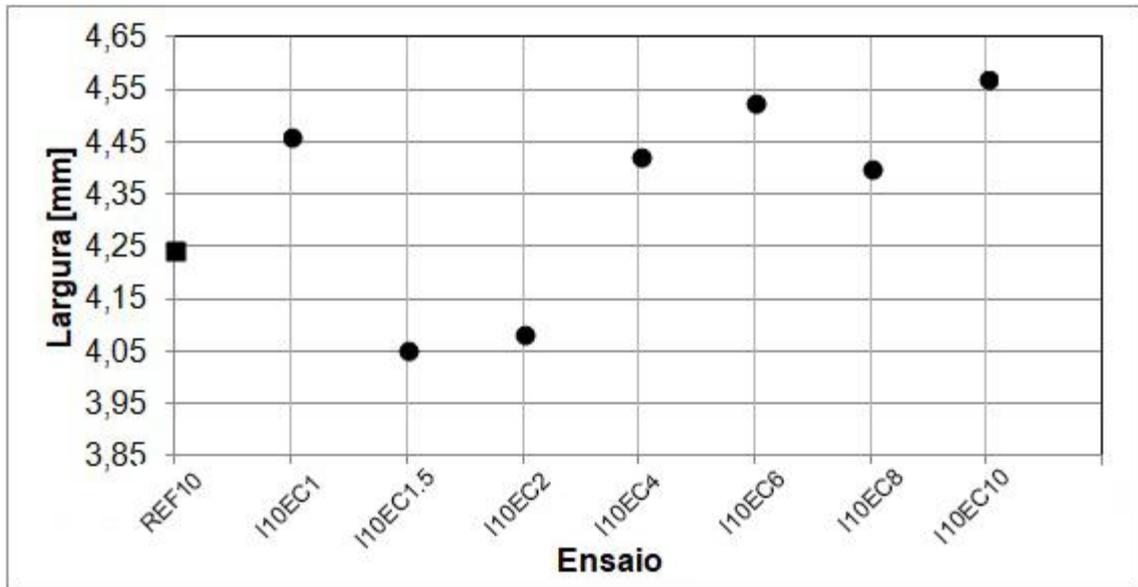
Primeiramente, há a possibilidade de haver problemas na adaptação realizada na tocha, especificamente no bocal exterior, haja vista que o comportamento dos fluxos de gás que deixam a tocha é desconhecido.

Os primeiros ensaios deste grupo foram realizados com o uso de baixas vazões de gás externo. Dada à baixa vazão, parte do gás pode ter se dispersado ao sair da tocha, não entrando em contato com a região do arco voltaico. Com o uso de vazões superiores, elemento ativo em excesso é adicionado à poça de fusão, levando à formação de camada de óxidos, como consequência diminuição da penetração do cordão, pois, a transferência de calor é comprometida.

Além dos fatores citados acima, há ainda o fato de que o material utilizado nos ensaios é aço ASTM A36, ao passo que os materiais utilizados em publicações que estudam o efeito do processo TIG com dupla proteção gasosa são, em geral, aços inoxidáveis. De acordo com Modenesi et al. (1998) diferentes materiais podem apresentar diferentes respostas a adição da mesma quantidade de elemento ativo.

A Figura 20 mostra os resultados obtidos em termos de largura do cordão de solda no grupo 1.

Figura 20 - Largura obtida nos ensaios do grupo 1



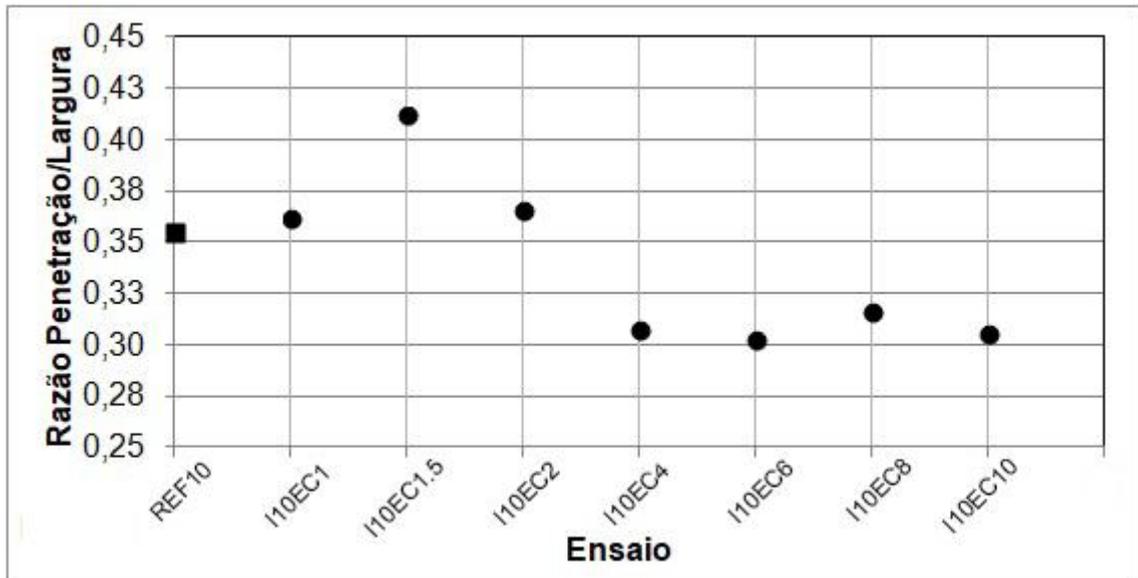
Fonte: A Autora.

É possível observar que nos ensaios I10EC1.5 e I10EC2 houve uma diminuição da largura do cordão. O ensaio I10EC1.5 também apresentou valor superiores de penetração, se comparados ao ensaio de referência. Estes dois fatores somados são um indicativo que houve de fato mudança do comportamento do fluxo de metal líquido na poça de fusão, a qual passou a ser mais profunda e estreita. Esta mudança de comportamento é relacionada ao efeito Marangoni.

Nos ensaios de I10EC4 a I10EC10 o efeito reverso é observado, onde maiores valores de largura foram aferidos. Em conjunto a isto menores valores de penetração foram atingidos nestes ensaios, indicando que o comportamento da poça de fusão voltou a ser raso e largo, como consequência da possível formação de camada de óxidos na superfície da poça de fusão, o que afetaria a transferência de calor.

A Figura 21 demonstra os resultados obtidos no grupo 1 em termos da razão entre penetração e largura, P/L.

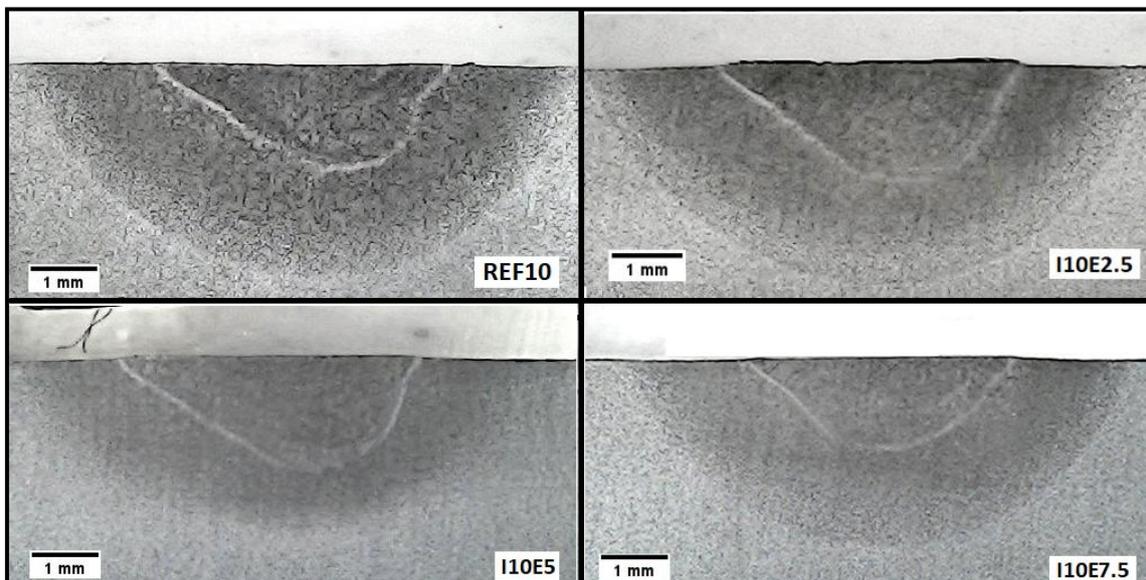
Figura 21 - Razão entre Penetração e Largura (P/L) obtida nos ensaios do grupo 1



Fonte: A Autora.

Na Figura 22 são apresentadas as macrografias das amostras dos cordões de solda obtidos nos grupo de ensaios 2.

Figura 22 - Macrografias dos cordões de solda obtidos no grupo de ensaios 2



Fonte: A Autora.

Na Tabela 6 encontram-se os resultados obtidos no grupo de ensaios 2, em termos de penetração, largura e razão entre penetração e largura.

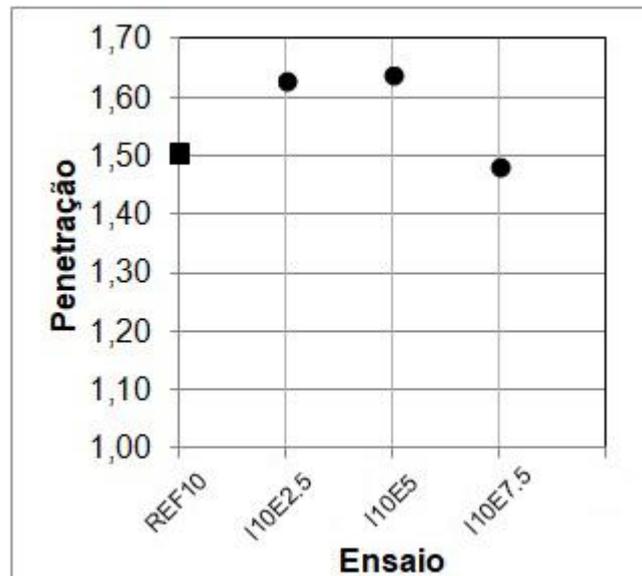
Tabela 6 - Resultados obtidos no grupo de ensaios 2

Ensaio	P (mm)	L (mm)	P/L
REF10	1,50	4,24	0,35
I10E2.5	1,63	4,22	0,39
I10E5	1,64	4,30	0,38
I10E7.5	1,48	4,19	0,35

Fonte: A Autora.

A Figura 23 mostra os resultados obtidos em termos de penetração do cordão de solda no grupo 2.

Figura 23 - Penetração obtida nos ensaios do grupo 2



Fonte: A Autora.

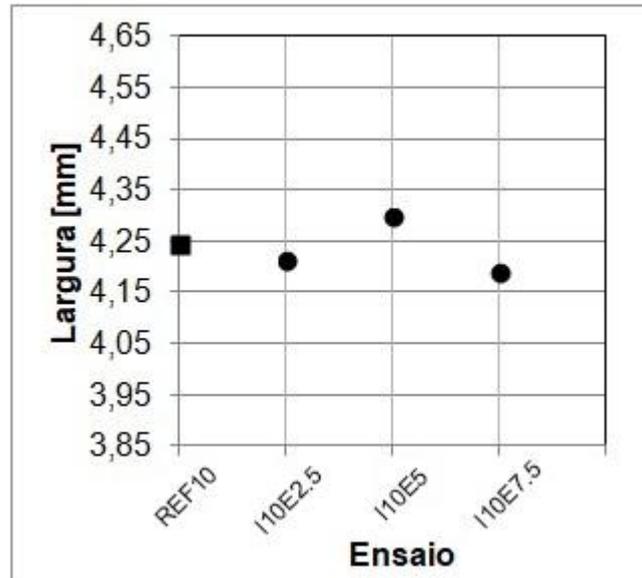
Neste grupo, os ensaios foram conduzidos utilizando argônio com 5% oxigênio como gás externo. Os resultados obtidos nos ensaios I10E2.5 e I10E5 foram superiores ao obtido no ensaio de referência, resultado que é coerente com o comportamento esperado, pois o ensaio I10E5 foi realizado com a vazão do gás externo ajustada em 5L/min. Com esta vazão, a quantidade de elemento ativo adicionada a região do arco voltaico é semelhante a quantidade que obteve melhor resultado no trabalho de Lima et al. (2017) e também nos ensaios do grupo 1.

O maior ganho em penetração foi obtido no ensaio I10E5, onde houve aumento de 9,33% em relação ao ensaio de referência. A partir desses resultados,

depreende-se que efeitos similares são obtidos ao se utilizar misturas gasosas de argônio e oxigênio ou argônio e dióxido de carbono, como fonte de elemento ativo.

Na Figura 24 são apresentadas as larguras dos cordões do grupo de ensaios 2.

Figura 24- Largura obtida nos ensaios do grupo 2

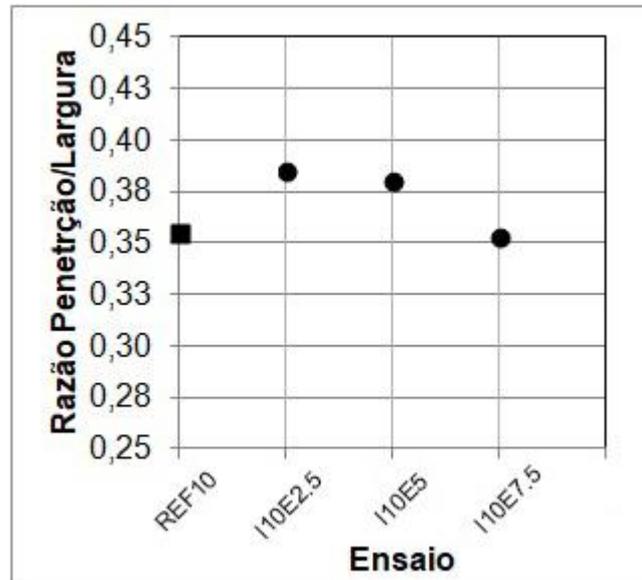


Fonte: A Autora.

É possível observar que a largura das amostras deste grupo de ensaios não apresentou grandes flutuações, haja vista que o resultado de maior variação, no caso o ensaio I10E5, foi apenas 1,4% maior que o ensaio de referência (REF10).

Os resultados em termos da relação P/L são apresentados na Figura 25.

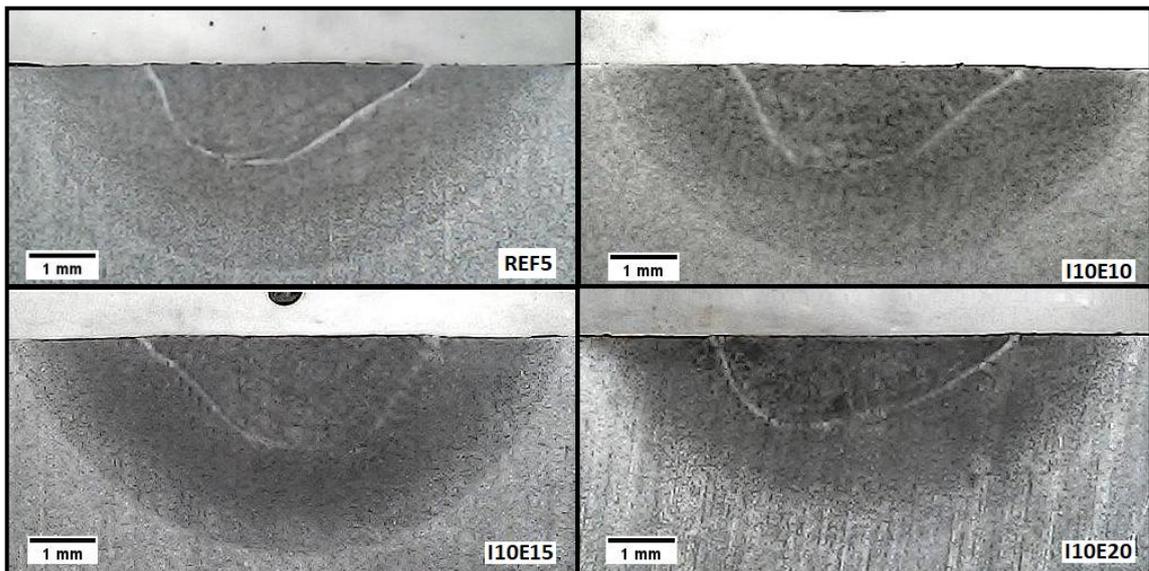
Figura 25 - Razão entre Penetração e Largura (P/L) obtida nos ensaios do grupo 2



Fonte: A Autora.

Na Figura 24 são apresentadas as macrografias das amostras dos cordões de solda obtidos nos grupo de ensaios 3.

Figura 26 - Macrografias dos cordões de solda obtidos no grupo de ensaios 3



Fonte: A Autora.

Por fim, os resultados obtidos em termos dos aspectos geométricos do grupo de ensaios 3 são apresentados na Tabela 7.

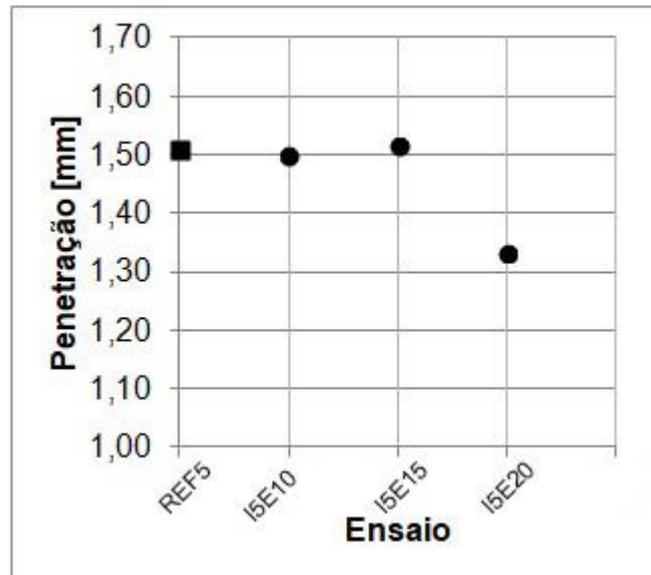
Tabela 7 - Resultados obtidos no grupo de ensaios 3

Ensaio	P (mm)	L (mm)	P/L
REF5	1,51	4,18	0,36
I5E10	1,50	4,23	0,35
I5E15	1,51	4,34	0,35
I5E20	1,33	4,48	0,30

Fonte: A Autora.

Os valores de penetração obtidos no grupo 3 são apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Penetração obtida nos ensaios do grupo 3

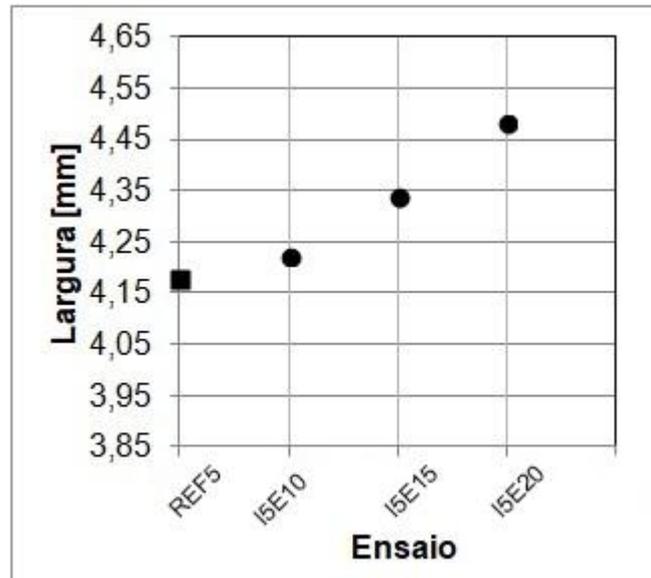


Fonte: A Autora.

Observa-se que não houve ganho significativo em penetração, sobretudo no ensaio I5E20, onde o valor obtido é inferior ao atingido no ensaio de referência deste grupo.

Com relação à largura dos cordões, os resultados são apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Largura obtida nos ensaios do grupo 2

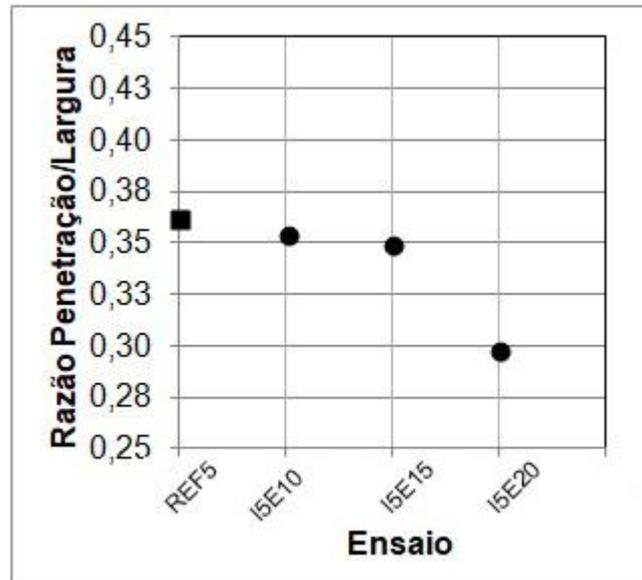


Fonte: A Autora.

Foi constatada variação na largura dos cordões, de forma a aumentar com o aumento da vazão de gás externo (ativo), soma. Este fato somado a queda de penetração observada neste grupo de ensaios são indicativos que a poça de fusão apresentou comportamento largo e raso. Tal comportamento pode ser consequência da relativa alta adição de elemento ativo, o que promove a formação de uma camada de óxidos na superfície da poça de fusão, a qual interfere na transferência de calor durante a soldagem.

Como consequência dos valores aferidos para penetração e largura neste grupo de ensaios, a relação P/L atingiu valores decrescentes entre os ensaios deste grupo, tal como mostra a Figura 29.

Figura 29 - Razão entre Penetração e Largura (P/L) obtida nos ensaios do grupo 3



Fonte: A Autora.

Os resultados obtidos neste grupo de ensaios foram coerentes com os dados extraídos dos primeiros grupos, uma vez que nestes casos foram utilizadas vazões que levaram a adição de maiores quantidades de elemento ativo.

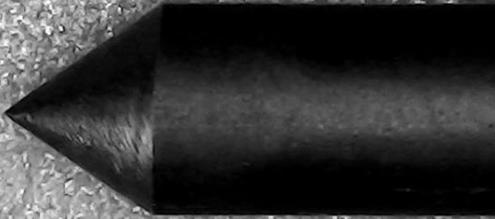
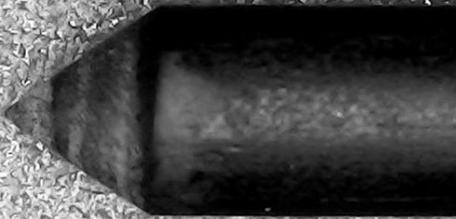
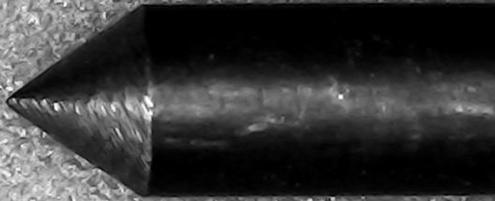
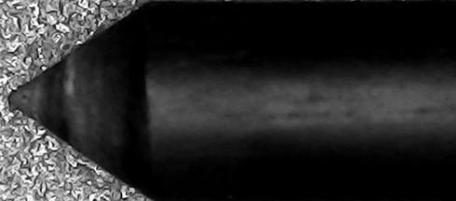
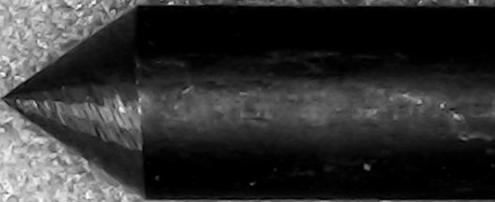
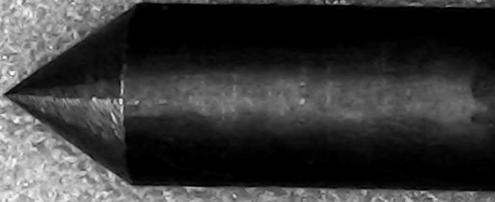
O trabalho de Li et al. (2010), o qual faz uso dos mesmos parâmetros de soldagem empregues neste grupo de ensaios, indica que há aumento da penetração do cordão de solda com o uso de gás hélio, como gás interno, e mistura gasosa de hélio e 5% de oxigênio.

Portanto, os resultados observados neste grupo de ensaios são indicativo de que o uso de argônio, como gás interno, e argônio com 5% de oxigênio, como gás externo, leva a diferentes resultados obtidos com as mesmas vazões de hélio e mistura gasosa de hélio com 5% de oxigênio.

5.2. AFIAÇÃO DOS ELETRODOS

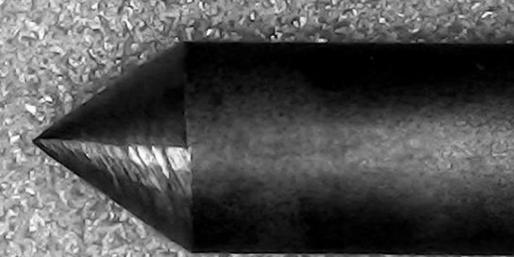
As Tabela 8 Tabela 9 Tabela 10 mostram imagens dos eletrodos utilizados nos ensaios, antes e após a realização dos ensaios de soldagem.

Tabela 8 – Eletrodos utilizados no grupo de ensaios 1

Ensaio	Aspecto do eletrodo após a afiação	Aspecto do eletrodo depois da soldagem
REF10	 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>
I10EC1	 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>
I10EC1.5	 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>
I10EC2	 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>
I10EC4	 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>

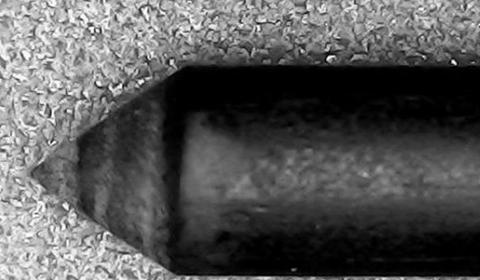
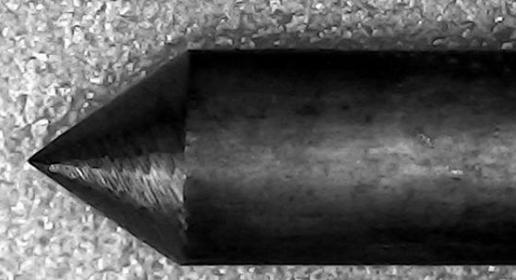
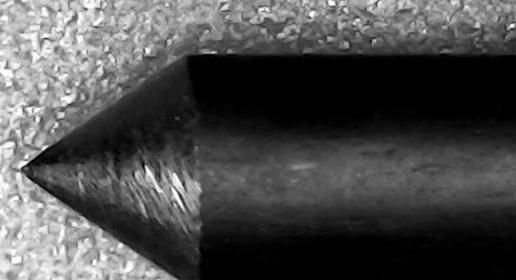
Fonte: A Autora.

Tabela 8 (continuação) - Eletrodos utilizados no grupo de ensaios 1

Ensaio	Aspecto do eletrodo após a afiação	Aspecto do eletrodo depois da soldagem
I10EC6	 A black and white photograph of a conical electrode tip after grinding. The tip is sharp and shows a fine, radial texture. A 1 mm scale bar is located at the bottom left of the image. 1 mm	 A black and white photograph of the same electrode tip after welding. The tip is significantly wider and has a more rounded, irregular shape. A 1 mm scale bar is located at the bottom left of the image. 1 mm
I10EC8	 A black and white photograph of a conical electrode tip after grinding. The tip is sharp and shows a fine, radial texture. A 1 mm scale bar is located at the bottom left of the image. 1 mm	 A black and white photograph of the same electrode tip after welding. The tip is wider and has a more rounded, irregular shape. A 1 mm scale bar is located at the bottom left of the image. 1 mm
I10EC10	 A black and white photograph of a conical electrode tip after grinding. The tip is sharp and shows a fine, radial texture. A 1 mm scale bar is located at the bottom left of the image. 1 mm	 A black and white photograph of the same electrode tip after welding. The tip is wider and has a more rounded, irregular shape. A 1 mm scale bar is located at the bottom left of the image. 1 mm

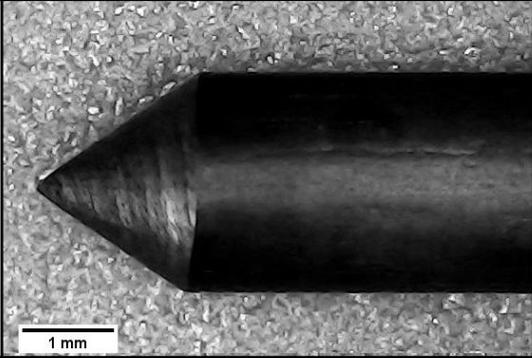
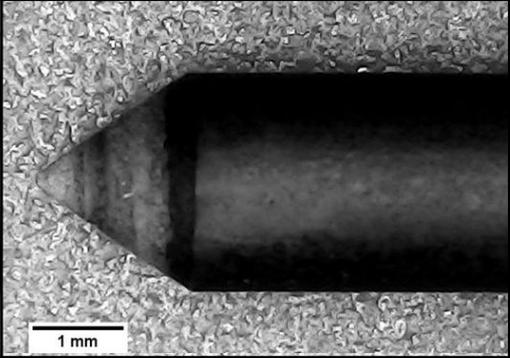
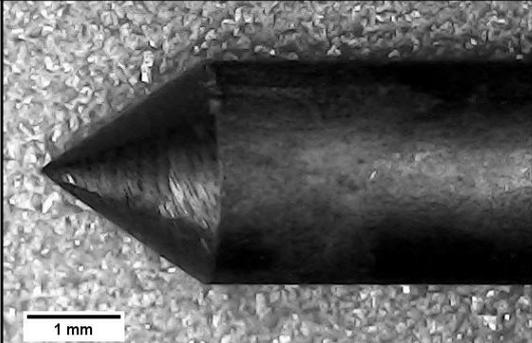
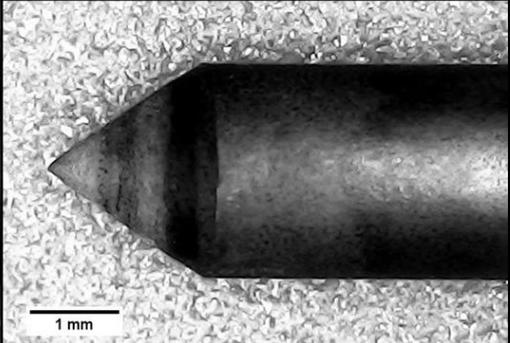
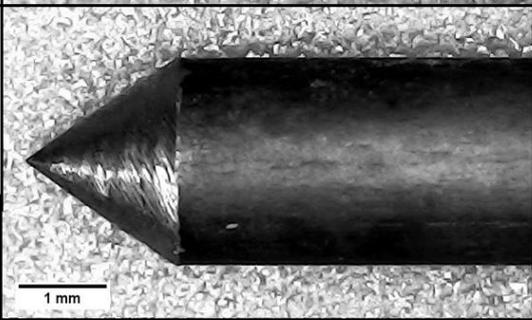
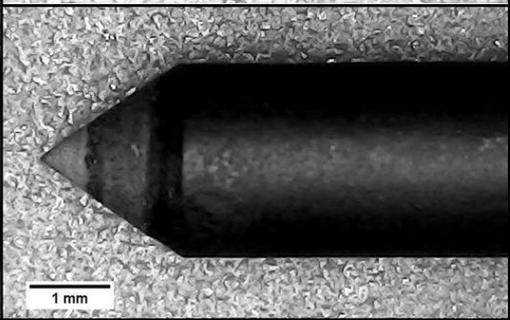
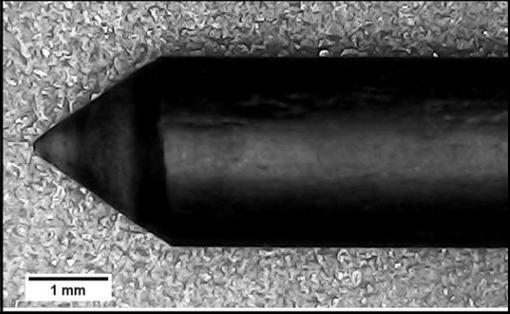
Fonte: A Autora.

Tabela 9 - Eletrodos utilizados no grupo de ensaios 2

Ensaio	Aspecto do eletrodo após a afiação	Aspecto do eletrodo depois da soldagem
REF10		
I10E2.5		
I10E5		
I10E7.5		

Fonte: A Autora.

Tabela 10- Eletrodos utilizados no grupo de ensaios 3

Ensaio	Aspecto do eletrodo após a afiação	Aspecto do eletrodo depois da soldagem
REF5		
ISE10		
ISE15		
ISE20		

Fonte: A Autora.

Observa-se que a afiação dos eletrodos, em todos os ensaios realizados, não foi comprometida. Isto indica que o elemento ativo, presente no gás externo, não entrou em contato com o eletrodo. Este comportamento era esperado, haja vista que o intuito do uso de dois gases distintos é estabelecer uma atmosfera protetora

ao eletrodo, evitando que haja degradação em decorrência do contato com elemento ativo.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho pode-se concluir que:

- A adaptação proposta para a tocha de soldagem se demonstra efetiva, pois, foi observado aumento na penetração dos cordões de solda e não houve perda de afiação dos eletrodos após a soldagem;
- Com relação à adição de elemento ativo, foi constatado que para que ocorra aumento na penetração do cordão de solda é necessária adição de uma determinada quantidade de elemento ativo à região da poça de fusão. Caso elemento ativo seja adicionado em excesso, a penetração do cordão de solda é reduzida, atingindo valores inferiores aos alcançados em ensaio utilizando TIG convencional, tal como indicado na literatura;
- A adição de elemento ativo pode ser controlada através da vazão do gás externo;
- O maior ganho em penetração foi de 11,33% com a utilização de argônio com 15% de dióxido de carbono, como gás externo, a 1,5 L/min;
- O maior ganho obtido com a utilização de argônio com 5% de oxigênio como gás externo, com vazão de 5 L/min foi de 9,33%;
- Resultados semelhantes podem ser obtidos ao utilizar argônio como gás interno e misturas gasosas de argônio e dióxido de carbono ou argônio e oxigênio como gás externo;
- Há indicativos que o uso de argônio, como gás interno, e argônio com 5% de oxigênio, como gás externo, leva a diferentes resultados obtidos com as mesmas vazões de hélio e mistura gasosa de hélio com 5% de oxigênio.

REFERÊNCIAS

FUJII, Hidetoshi et al. Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection. **Materials Science & Engineering: A**. [s.l.], p. 296-303. nov. 2008

HEIPLE, C. R.; BURGARDT, P.. Effects of SO₂ Shielding Gas Additions on GTA Weld Shape. **Welding Research Supplement**. [s.l.], p. 159-162. jun. 1985.

HEIPLE, C. R.; ROPER, J. R.. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry. **Welding Journal**. [s.l.], p. 97-102. abr. 1982.

LI, D. J. et al. Mechanisms increasing welding efficiency during new development of double shielded TIG process. **Science And Technology Of Welding And Joining**. [s.l.], p. 528-533. dez. 2013.

LI, Dianzhong et al. Weld pool shape variations and electrode protection in double shielded TIG welding. **Advanced Materials Research**. [s.l.], p. 3978-3981. mar. 2010.

LI, Dongjie et al. Effect of Structural Parameters of Double Shielded TIG Torch on the Fusion Zone Profile for 0Cr13Ni5. **Journal Of Materials Science And Technology**. Shenyang, p. 922-927. jan. 2014.

LI, Dongjie. Principles Giving High Penetration under the Double Shielded TIG Process. **Journal Of Materials Science And Technology**. Shenyang, p. 172-178. fev. 2014.

LIMA, Laura Silva Macedo et al. Implementation of double Ar/(Ar+CO₂) Shielding on GTAW of AISI 316L Stainless Steel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 9., 2017, Joinville. **Proceedings...**. Joinville: Abcm, 2017. p. 1 - 8.

LU, Shanping; FUJII, Hidetoshi; NOGI, Kiyoshi. Marangoni Convection and Gas Tungsten Arc Weld Shape Variations on Pure Iron Plates. **Isij International**. Shenyang, p. 276-280. nov. 2005.

LU, Shanping; FUJII, Hidetoshi; NOGI, Kiyoshi. Marangoni convection and weld shape variations in Ar–O₂ and Ar–CO₂ shielded GTA welding. **Materials Science & Engineering: A**. Osaka, p. 290-297. mar. 2004..

LU, Shanping; FUJII, Hidetoshi; NOGI, Kiyoshi. Marangoni Convection in Weld Pool in CO₂-Ar-Shielded Gas Thermal Arc Welding. **Metallurgical And Materials Transactions A**. [s.l.], p. 2861-2867. set. 2004.

LU, Shanping; FUJII, Hidetoshi; NOGI, Kiyoshi. Weld Shape Variation and Electrode Oxidation Behavior under Ar-(Ar-CO₂) Double Shielded GTA Welding. **Journal Of Materials Science And Technology**. [s.l.], p. 170-176. fev. 2010.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2014. 362 p.

MODENESI, Paulo J.; APOLINÁRIO, Eustáquio R.; PEREIRA, Iaci M.. TIG welding with single-component Fluxes. **Journal Of Materials Processing Technology**. Belo Horizonte, p. 260-265. jul. 1998.

XU, Y. L. et al. Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process. **Theoretical And Applied Fracture Mechanics**. [s.l.], p. 178-186. out. 2007.

.

.