UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

HELLINTON DIRENE FILHO

ESTUDO DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE TOPO VISANDO APLICAÇÕES DE ALTA PRODUTIVIDADE

FLORIANÓPOLIS
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

HELLINTON DIRENE FILHO

ESTUDO DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE TOPO VISANDO APLICAÇÕES DE ALTA PRODUTIVIDADE

Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Mateus Eng. Barancelli Schwedersky

Co-orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra

FLORIANÓPOLIS
2011

HELLINTON DIRENE FILHO

ESTUDO DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE TOPO VISANDO APLICAÇÕES DE ALTA PRODUTIVIDADE

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

_____

Prof. Fernando Cabral, Ph. D (EMC/UFSC)

Coordenador do Curso

_____

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc. (EMC/UFSC)

Prof. Responsável

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc. (EMC/UFSC)

Membro

_____

Mateus Barancelli Schwedersky, Eng. - (EMC/UFSC)

Orientador

_____

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. (EMC/UFSC)

Co-Orientador

FLORIANÓPOLIS

2011

Ficha Catalográfica:

Direne Filho, Hellinton, 1985 –
Estudo do processo TIG com alimentação automática de topo visando aplicações de alta produtividade/Hellinton Direne Filho – 2011
47 f.: il. color. ; 30cm.

Orientador: Mateus Barancelli Schwedersky, Eng. (EMC/UFSC)
Co-Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. (EMC/UFSC)

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Materiais, 2011.

1. TIG 2.TIG Alimentado 3.Alta Produtividade 4.Humping 5. TOPTIG

I. DIRENE FILHO, Hellinton. II. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Materiais. III. Estudo do processo TIG com alimentação automática de topo visando aplicações de alta produtividade.

Dedico este trabalho a minha família

Hellinton Direne, Roseli Barros Direne e

Everton Barros Direne pelo amor, carinho

e atenção.

AGRADECIMENTOS:

Aos meus pais e a toda a minha família que foram minha que sempre me ajudaram no que foi preciso;

Ao Professor Jair Carlos Dutra pela co-orientação e por possibilitar o desenvolvimento deste trabalho no LABSOLDA;

Aos professores do curso de graduação em Engenharia de Materiais que contribuíram em minha formação;

Ao Mateus Barancelli Schwedersky pela orientação durante o trabalho;

Ao Régis Henrique Gonçalves da Silva e Julio César Bento Ribeiro pela ajuda prestada durante o desenvolvimento do trabalho;

A todos os colegas do LABSOLDA, pela amizade e auxílio durante todo o período no laboratório.

RESUMO:

O processo de soldagem TIG é dito de baixa produtividade, principalmente em comparação com os processos GMAW, e, portanto pouco empregado nas indústrias. Em condições onde se tenta aplicar altas velocidades à soldagem TIG alguns defeitos podem surgir, como o *Humping*. Existem maneiras para melhorar o desempenho do processo TIG, que podem ser feitas com alterações de algumas variáveis do processo, como o gás de proteção, o diâmetro e afiação do eletrodo, a inclinação da tocha, entre outros. O estudo do processo iniciou-se com ensaios de cordão sobre chapa a fim de determinar a influência da posição do eletrodo em relação ao arame e em relação à peça, bem como para avaliação dos demais parâmetros de soldagem. A sua aplicabilidade foi testada em juntas de topo e juntas sobrepostas simulando situações industriais. Análises macrográficas dos cordões foram feitas para realizar o cálculo das áreas fundidas dos ensaios cordão sobre chapa e verificar a formação de defeitos nos cordões. Uma alternativa para sanar o aparecimento de defeitos consiste na injeção de material de adição ao processo, o que modificara a atuação das forças de pressão do arco, tornando o processo mais estável. Motivado pela diminuição dos defeitos inerentes aos processos de alta produtividade, deu-se início ao estudo do processo de soldagem TOPTIG, este que é uma inovação do processo de soldagem TIG com alimentação automática de arame. Para o qual, com novas concepções do bocal de proteção, foi possível obter uma maior eficiência na fusão do arame, devido à posição em que este é injetado na poça de fusão. Os ensaios mostraram que o procedimento foi eficiente para o aumento da produtividade, sendo possível obter cordões isentos de defeitos com até 1,6 m/min (26,66 mm/s) de avanço de tocha, em juntas de topo. Além de minimizar de maneira expressiva as descontinuidades nos cordões.

ABSTRACT:

The TIG welding is a low productivity process, especially in comparison with the GMAW process, therefore with lower applicability in industry. When high speeds are applied some defects can occur, such as humping. There are several ways to improve the TIG process performance, like with changes of some process variables, as shielding gas, the electrode thickness and sharpness, the torch slope, and others. An alternative is to apply a wire feed process; In this case the wire will modify the action of the arc pressure forces, bringing more stability. Motivated by reducing the defects in the high productivity began studies of the TOPTIG Welding Process, which is an innovation of TIG automatic wire feed. With new nozzle conceptions, it was possible to achieve more efficiency on wire fusion and in the way to inject it on the molten pool. The Study of the process began with tests with weld on plates to determine the influence of electrode position in relation to the wire and the workpiece, as well as evaluation of other welding parameters. Its applicability was tested in butt joints and lap joints simulating a real situation. Macrographic analyses were made to calculate the weld pool penetration and verify the defects formations. The tests showed that the procedure was effective for increasing productivity. It was possible to achieve perfect welds at high speeds on butt joints, about 1,6 m/min ($2{,}667.10^{-2}$m/s), in addition to minimizing significantly the discontinuities.

SUMÁRIO:

1. Introdução 9
1.1. Objetivos 9
2. Revisão da Literatura 10
2.1. Processo de soldagem TIG 10
2.2. Processo TIG com alimentação automática de arame 13
2.2.1. Alimentação convencional 13
2.2.2. Alimentação de Topo 14
2.4. Defeitos inerentes ao processo TIG de alta produtividade 16
2.5. Gases de Proteção 19
3. Materiais e Métodos 22
3.1. Bancada de soldagem 22
3.1.1. Fonte de soldagem 22
3.1.2. Tocha de soldagem 22
3.1.3. Bocal alimentador 23
3.1.4. Manipulador Robótico 23
3.1.5. AVC (Arc Voltage Control) 24
3.1.6. Unidade de Refrigeração de Tocha 24
3.2. Consumíveis 24
3.2.1. Eletrodo 24
3.2.2. Material de adição 24
3.2.3. Gás de Proteção 25
3.2.4. Corpos de prova 25
3.3. Procedimentos de analise 25
3.3.1. Análise do Processo de Soldagem 25
3.3.2. Análise Visual 25
3.3.3. Preparação Metalográfica 25

3.3.4. Edição de Imagens....26
4. Metodologia....26
4.1. Ensaios Cordão Sobre chapa....26
4.2. Ensaios em Junta sobreposta....26
4.3. Parâmetros chaves....27
5. Resultados....28
5.1. Influência da injeção de arame....28
5.2. Ensaios sobre chapa....32
5.2.1. Minimização de defeitos....32
5.2.2. Avaliação dos Parâmetros de Soldagem....34
5.3. Ensaios em Junta Sobreposta....36
5.4. Ensaios em Junta de Topo....40
6. Conclusões....42
6. Recomendação para trabalho futuros....43
7. Referências....44

1. Introdução

Ao tentar elevar a produtividade do processo TIG alguns defeitos começam a surgir. Um destes defeitos é o *Humping*, que são elevações nos cordões de solda formadas principalmente pela pressão do arco de soldagem a altas faixas de corrente, em somatório com altas velocidades de avanço de tocha. Na tentativa de minimizar a formação destes defeitos e buscar aplicabilidade em operações onde somente o processo GMAW é considerado viável, desenvolveram-se estudos do processo de soldagem TIG com alimentação automática de arame, no qual, com uma alimentação contínua e independente do soldador, foi possível alcançar níveis de produção elevados [3].

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas buscando aumentar ainda mais a produtividade deste processo. Um estudo recente é o processo de soldagem TOPTIG, desenvolvido pela AirLiquid, que é uma inovação aos processos de soldagem TIG com alimentação automática de arame [4].

Segundo os autores, neste novo processo a fusão do arame é mais eficiente, pois com modificações no bocal de proteção, foi possível injetar o arame paralelamente ao ângulo de afiação da ponta do eletrodo de tungstênio, atingindo uma região mais quente do arco elétrico. E como o arame é injetado de cima para baixo, este atinge diretamente o centro da poça de fusão que é uma região onde o calor está mais concentrado. Devido à forma como o arme é injetado optou-se por denominar o processo de TIG com alimentação automática de topo.

Com alimentação de topo busca-se alcançar velocidades de soldagem mais altas e maiores taxas de alimentação de arame.

1.1. Objetivos

O Presente trabalho tem como objetivo: Desenvolver e aperfeiçoar o bocal de soldagem, e adapta-lo a tocha de soldagem. Avaliar aplicações do processo de soldagem TIG com alimentação de topo, para faixas de correntes mais elevadas, superiores a 300A. Serão verificadas melhorias de desempenho em termos de velocidade de soldagem, taxa de alimentação e minimização de defeitos. Para tanto serão comparados parâmetros sem adição de arame e com adição de arame.

2. Revisão da Literatura

2.1. Processo de soldagem TIG

No processo de soldagem TIG ou *Gas Tungsten Arc Welding* (GMAW), a fusão e união dos metais são produzidas pelo calor do arco voltaico estabelecido entre um eletrodo não consumível e a peça. O processo é assim denominado por utilizar um eletrodo não consumível de tungstênio e gases inertes, normalmente argônio e hélio, formando uma atmosfera protetora que evita a oxidação do cordão de solda e do eletrodo de tungstênio, além de formar uma atmosfera mais apropriada para a formação do arco elétrico.

Seu grande desenvolvimento deveu-se à necessidade de processos eficientes de união de materiais de difícil soldabilidade, como o alumínio e magnésio, principalmente para indústria da aviação no começo da Segunda Guerra Mundial. Com o seu aperfeiçoamento, surgiu um processo de alta qualidade, baixa poluição e baixo custo, de uso em diversas aplicações.

No processo TIG o arco, tanto pode ser em corrente contínua, mais aplicado a soldagem de aços ou aços inoxidáveis, ou corrente alternada, usado na soldagem de ligas de alumínio. Para corrente contínua, o eletrodo de tungstênio é conectado ao terminal negativo da fonte de soldagem, e a peça a ser soldada ao terminal positivo, resultando em uma menor fusão da ponta do eletrodo e maior estabilidade do arco. Nesta polaridade tem-se a emissão de elétrons a partir do eletrodo de tungstênio, no qual são acelerados enquanto viajam através do arco. Uma significativa quantidade de energia, chamada de função trabalho, é necessária para que o elétron possa ser emitido pelo metal, sendo que, quando o elétron colide com a peça de trabalho, essa energia, correspondente à função trabalho termiônico, é liberada, promovendo a fusão do metal de base [1].

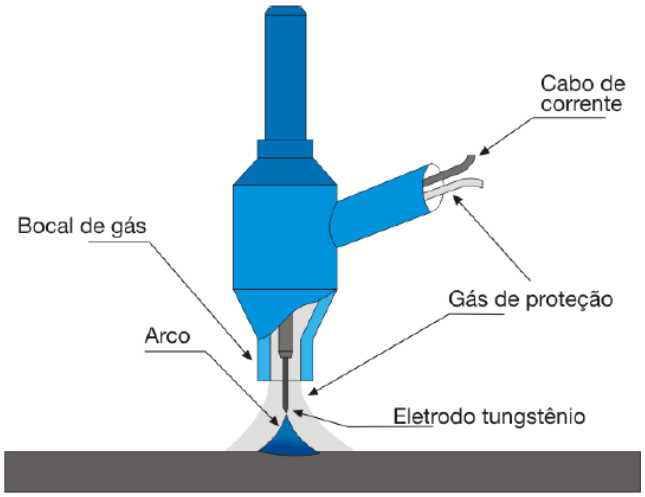


Figura 2.1 – Esquema do processo de soldagem TIG

O processo TIG produz soldas de excelente qualidade e pode ser aplicado a quase todos os metais e suas ligas. Em algumas aplicações pode ser utilizado de forma autógena (sem material de adição) principalmente para realização de reparos ou então para soldagem de chapas finas. No entanto, em casos, é necessária a adição de material que é feita manualmente pelo soldador utilizando varetas, que são fundidas e depositadas na poça metálica quando entra em contato com a coluna de arco.

De modo a permitir uma maior taxa de deposição de material, o soldador faz uso do efeito da tensão superficial do material de adição. Assim, após a gota ser formada na coluna de arco, o soldador encosta a vareta na poça de fusão, e com isso a tensão superficial atua de forma a “puxar” a gota para o banho de metal líquido. Em seguida o soldador retorna a extremidade da vareta para coluna de arco, onde as temperaturas são maiores, e uma nova gota será formada dando início ao novo ciclo de deposição de material.

Esta se constitui a forma mais difundida de adicionar manualmente material no processo TIG [2]. Contudo, a produtividade torna-se consideravelmente baixa em virtude da capacidade do soldador de repetir este ciclo de destacamento, de forma cadenciada, em elevadas velocidades de adição de material, além das constantes paradas para as trocas das varetas ao longo da operação.

Na tentativa de aumentar a produtividade do processo é realizada sua automatização através de manipuladores robóticos, para o controle da velocidade de

soldagem, e em pesquisas mais recentes, a viabilização de alimentação automática de arame, com utilização, por exemplo, de cabeçotes alimentadores e bocais adaptados para o processo.

O processo possui algumas características, que são:

- Necessidade de maior destreza e coordenação do operador em relação ao SMAW e GMAW;

- Inclusões de Tungstênio, no caso de haver contato do eletrodo com a poça de fusão;

No entanto possui algumas vantagens frente aos demais processos de soldagem, as mais importantes são:

- Está livre dos respingos que ocorrem em outros processos a arco;

- Pode ser utilizado com ou sem adição;

- Permite excelente controle na penetração de passes de raiz;

- Permite um controle preciso das variáveis da soldagem;

- Pode ser usado em quase todos os metais, inclusive metais dissimilares;

- Permite um controle independente da fonte de calor e do material de adição.

2.2. Processo TIG com alimentação automática de arame

2.2.1. Alimentação convencional

A soldagem com o processo TIG com alimentação automática de arame possibilita uma maior produtividade, mantém uma maior regularidade da taxa de fusão do arame, permite maior controle dos parâmetros de soldagem e elimina variações causadas pelo soldador, garantindo maior repetitividade e confiabilidade dos resultados.

Existem diversas aplicações para o qual este processo é recomendado, entre elas, soldas críticas em vasos de pressão a alta temperatura, solda em equipamentos criogênicos a baixas temperaturas, passes de raiz em soldas de membros estruturais altamente críticos, soldagem de tubos de aço carbono na construção de plataformas de petróleo *Offshore*, soldagem de chapas finas de aço inoxidável para indústria de alimentos, além da brasagem a arco de chapas metálicas galvanizadas [3, 4].

A injeção do arame pode ser feita com arame frio (à temperatura ambiente) - *Cold Wire* - e com arame pré-aquecido – *Hot Wire*. Este último tem a vantagem de aumentar a produtividade do processo, uma vez que com o arame pré-aquecido necessita-se de menos energia do arco para se conseguir a fusão do arame [3].

O equipamento necessário para soldagem com alimentação automática necessita de duas modificações em relação ao processo convencional. Uma é a utilização de um cabeçote alimentador automático de arame (Figura 2.2a), semelhante ao utilizado nos processos GMAW. A segunda é uma modificação na tocha de soldagem, que necessita de um suporte adaptador para possibilitar o posicionamento do arame (Figura 2.2b).

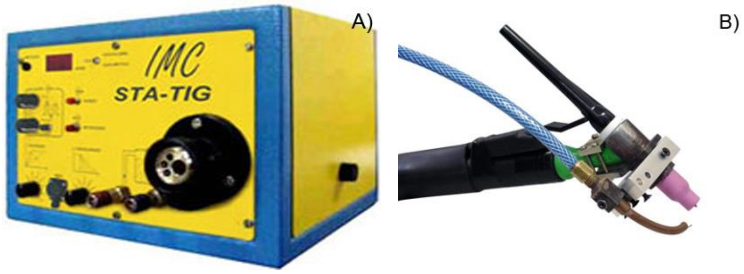


Figura 2.2 – Equipamentos adaptativos ao processo de soldagem TIG com alimentação automática de arame. A) Cabeçote alimentador. B) Modificações na tocha de soldagem.

Comparando a outros processos automáticos e semiautomáticos de soldagem, o processo TIG com alimentação automática de arame oferece vantagens ao usuário em relação ao TIG manual. Devido à alimentação contínua e automática de arame, se pode produzir cordões uniformes ao longo de toda sua extensão. Uniformidade difícil de conseguir com alimentação manual.

O processo TIG com alimentação automática de arame é aplicado em diversas condições de soldagem em campo, obtendo-se elevadas taxas de deposição, sem a necessidade da automação total do processo.

O correto posicionamento do arame afeta diretamente a estabilidade do arco. Em seu trabalho Delgado, observou que o arame deve ser direcionado exatamente para parte inferior do mesmo, onde se encontra a poça de fusão. Nesta condição o arame entra em contato com a poça ainda sólido, porém, se funde rapidamente, garantindo uma continuidade da fusão.

O que se pretende com a utilização da injeção do arame de topo é permitir uma maior eficiência na fusão do arame direcionando-o de forma mais regular para a poça de fusão e assim aumentar a estabilidade da transferência e da dinâmica da poça de fusão.

2.2.2. Alimentação de Topo

O processo de soldagem TIG convencional com alimentação de arame frio *(cold wire*) permite a dissociação de energia da peça e do metal de solda, mas não oferece a velocidade de fusão de arame necessária para aplicações de alta produtividade.

O novo processo é baseado em uma invenção de 1985 desenvolvida por Thomas P.P. e Richard M.L. Com uma nova concepção do bocal (Figura 2.3)

algumas vantagens serão agregadas ao processo. Essas vantagens são: O arame passa por dentro do bocal em um ângulo de 20° em relação ao centro do eletrodo e é paralelo ao ângulo de afiação do eletrodo. Em virtude dessa configuração o arame de metal passa muito perto da ponta do eletrodo – a região mais quente do arco – fazendo com que este se funda mais rapidamente, permitindo uma alta taxa de deposição e alta velocidade de soldagem.

A posição de alimentação é permanentemente fixada ao bocal não oferecendo possibilidade de modifica-la, assim eliminando mais um parâmetro do processo.

Outra vantagem é referente à acessibilidade da tocha. Em comparação com um processo TIG alimentado convencional, compacidade da entrada de fio integrada no bocal permite uma acessibilidade em ângulo comparável à que se obtém com uma tocha GMAW. Tornando a automatização do processo mais facilitada, além de aumentar a gama de juntas, posições de soldagem e tipos de peças que podem ser soldadas.

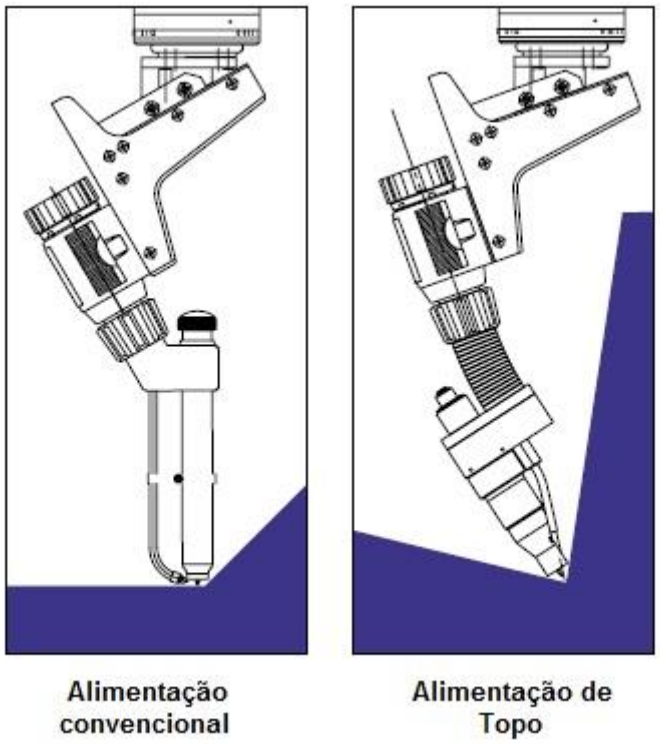


Figura 2.3 – Esquema ilustrando a maior acessibilidade para tocha com alimentação de topo.

2.4. Defeitos inerentes ao processo TIG de alta produtividade

Quando se almeja um maior rendimento em termos de produtividade de um processo de soldagem automatizado o primeiro parâmetro que deve ser alterado é a velocidade de soldagem. Entretanto aumentos na velocidade de avanço da tocha acarretam numa diminuição da energia do processo e por consequência menor eficiência na fusão do metal de base. A maneira mais fácil de compensar a defasagem dessa energia é através do aumento da corrente de soldagem. Contudo variações na corrente e velocidade aumentam as chances de aparecimento de defeitos relativos a estes parâmetros.

Como em qualquer outro processo de soldagem defeitos como poros, trincas, falta de fusão, entre outros, também devem ser investigados e evitados. Os mais preocupantes são relativos a altas taxas de velocidade e corrente de soldagem como mordeduras, *Tunnellin*g e *Humping*, Savege et al. os define como:

- Mordeduras: Um sulco, fundido no metal de base adjacente a zona de fusão, não preenchido por metal de solda.

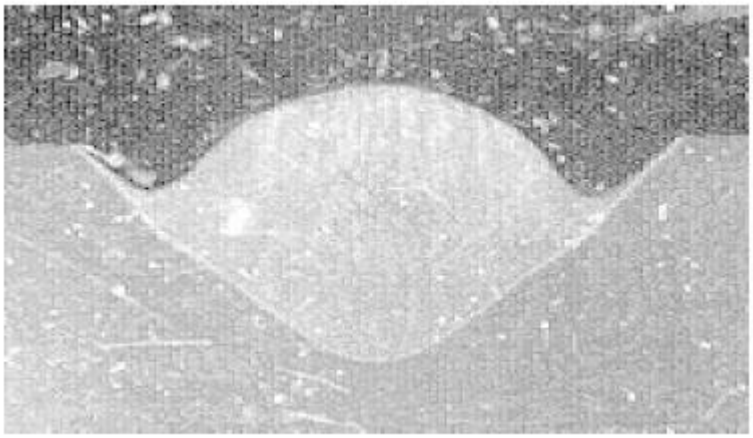


Figura 2.4 – Mordedura em seção transversal do cordão de solda.[5]

- *Tunnelling*: Um canal aberto, não preenchido por metal de solda, formado na raiz do cordão de solda.

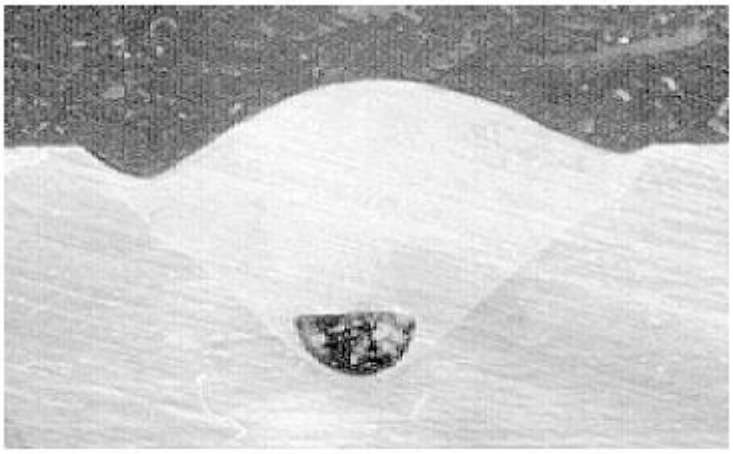


Figura 2.5 – Tunelling na seção transversal do cordão de solda. [5]

- *Humping*: Uma superfície de contorno irregular consistindo de uma série de protuberâncias(B) separadas por intervalos de regiões de cratera(A).

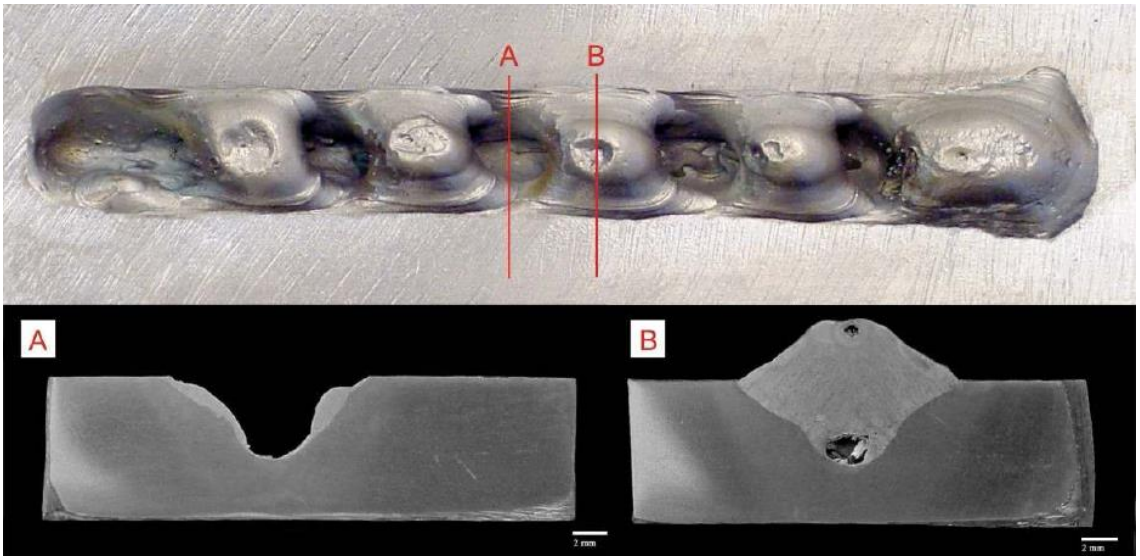


Figura 2.6 - Cordão soldado pelo processo TIG. A e B são secções transversais dos locais indicados na Figura do cordão.[Fonte: Dissertação de Mestrado – Mateus Baranceli Schwedersky]

O que ira promover a formação destes defeitos, especialmente o *Humping*, é a interação entre as forças que agem sob a poça de fusão. Segundo Medez et al. estas forças são: Forças hidrostáticas (P_h): são geradas pela pressão que a coluna de metal líquido exerce entre o ponto de transição e o ponto mais alto da superfície livre; Forças capilares (P_c): devido ao ângulo de curvatura do metal líquido. A pressão do arco e cisalhamento (P_a): Surgem devido a ação do plasma contra a superfície livre.

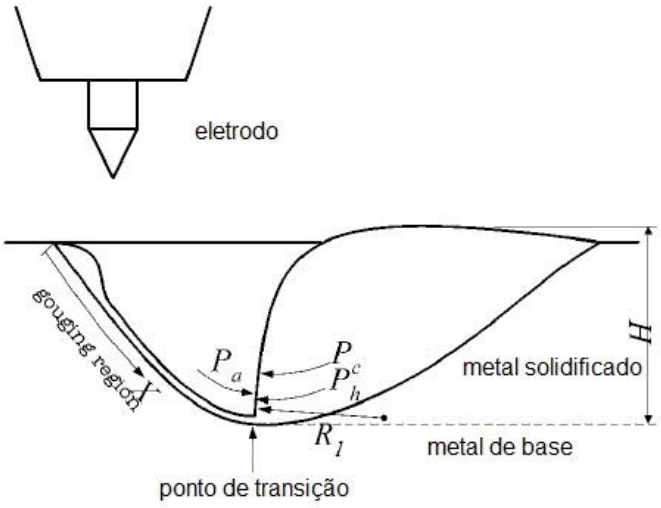


Figura 2.7 – Forças que agem no ponto de transição. Adaptada de [6]

Dessa maneira, quando há uma pressão do arco maior ($P_a > P_h+P_c$) a região de transição se desloca para um ponto menos aquecido da poça formando as descontinuidades, este defeito só ocorre a partir de uma velocidade limite, que depende dos níveis de corrente utilizados.

Em uma situação de baixa velocidade, o arco mantém a poça de fusão aquecida, porém à medida que se aumenta a velocidade o arco não consegue manter toda a poça aquecida e a mesma começa a se solidificar, assim o metal, que continua sendo fundido, começa a se acumular em uma nova região formando protuberância e deixando uma região sem preenchimento de material (cratera), formando descontinuidades no cordão como mostrado na Figura 2.8.

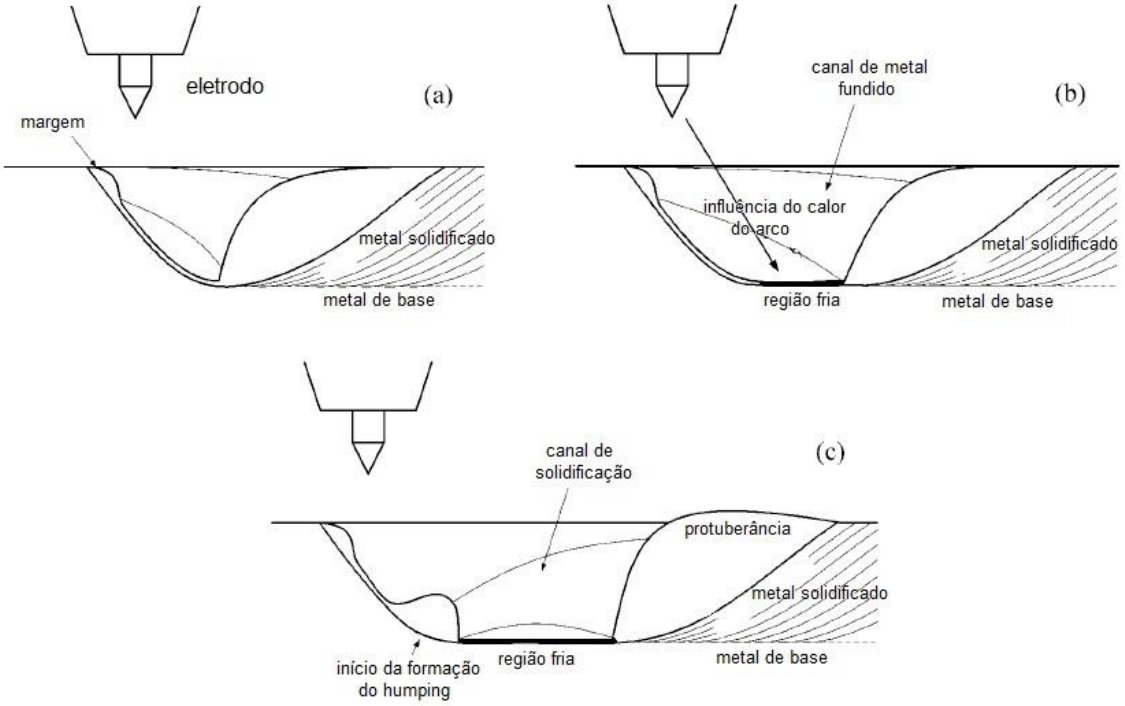


Figura 2.8 – Ilustração para demonstrar a formação do Humping. Adaptada de [6]

2.5. Gases de Proteção

A quantidade e as propriedades físicas dos gases presentes na atmosfera do arco são de grande importância para o processo.

Para soldagem TIG os gases mais utilizados industrialmente é o argônio, devido a sua disponibilidade e baixo custo. Segundo Modenesi, o gás hélio produz uma tensão cerca de 1,5 vezez maior que o argônio para uma mesma faixa de corrente. Em seu trabalho ele também avaliou misturas de argônio com o próprio hélio, com nitrogênio e hidrogênio, cujos resultados encontran-se na Figura 2.9 .

Tabela I - Valores de tensão e corrente medidos

Teor (% vol.)	0		2		5		10		25		100	
Gás secundário	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)
Nitrogênio	12,6	153	13,5	153	14,2	153	15,7	153				
Hidrogênio	12,6	153	13,7	153	15,8	153	18,5	153				
Hélio	12,6	153	12,7	153	12,9	152	13,1	152	13,4	152	19,5	152

Figura 2.9 – Imagem da Tabela dos valores de tensão e correntes medidas por Modenesi para as misturas gasosas.

A diferença na tensão do arco gerada pela utilização de diferentes gases e misturas esteja associada à condutividade térmica destes. Como mais energia por unidade de tempo por condução térmica é utilizada no caso da mistura Ar-H_2 do que com Ar puro, por exemplo. É necessário mais energia para manter a corrente no arco, que só pode ser fornecida pelo aumento na tensão do arco.

Nos experimentos optou-se pela utilização do gás argônio e pela mistura de argônio-hidrogênio5%. Devido à disponibilidade, preço e eficiência.

Quando é utilizado hidrogênio na proteção gasosa alguns cuidados extras devem ser tomados quanto a defeitos provenientes da solubilidade do gás com os metais a serem soldados.

Um defeito está ligado à formação de bolhas que são nucleadas quando a concentração de gás dissolvido no metal fundido excede a solubilidade do gás. Devido ao baixo peso molecular do gás, essas bolhas tendem a subir para a superfície do cordão e serem eliminadas, porém devido à dinâmica de solidificação algumas bolhas podem ser retidas, o que resultara em poros solidificados no cordão de solda [9]. Uma maneira de evitar este defeito é através da pulsação da corrente de soldagem, que irá promover uma oscilação da poça de fusão ajudando na dissipação dos gases.

Outro defeito é a formação das trincas de hidrogênio, que ocorrem pela simultaneidade de quatro fatores:

- Hidrogênio no metal de solda;

- Tensões residuais associadas à soldagem;

- Microestrutura frágil: normalmente martensítica;

- Baixas temperaturas: inferiores a 150°C.

Nenhum destes fatores isolados causará a formação de trincas.

As misturas gasosas também tem grande influência na capacidade de fusão do processo. Para as quais, utilizando a mesma corrente média, e utilizando diferentes misturas gasosas, primeiramente com argônio puro e posteriormente com um mistura de argônio 95% e Hidrogênio 5%, SCHWEDERSKY 2011, chegou a

maiores capacidades de fusão utilizando a mistura. SCHWEDERSKY apud SAVAGE, também cita uma grande influencia da mistura gasosa na velocidade limite de formação de defeitos, como pode ser verificado na Figura 2.10.

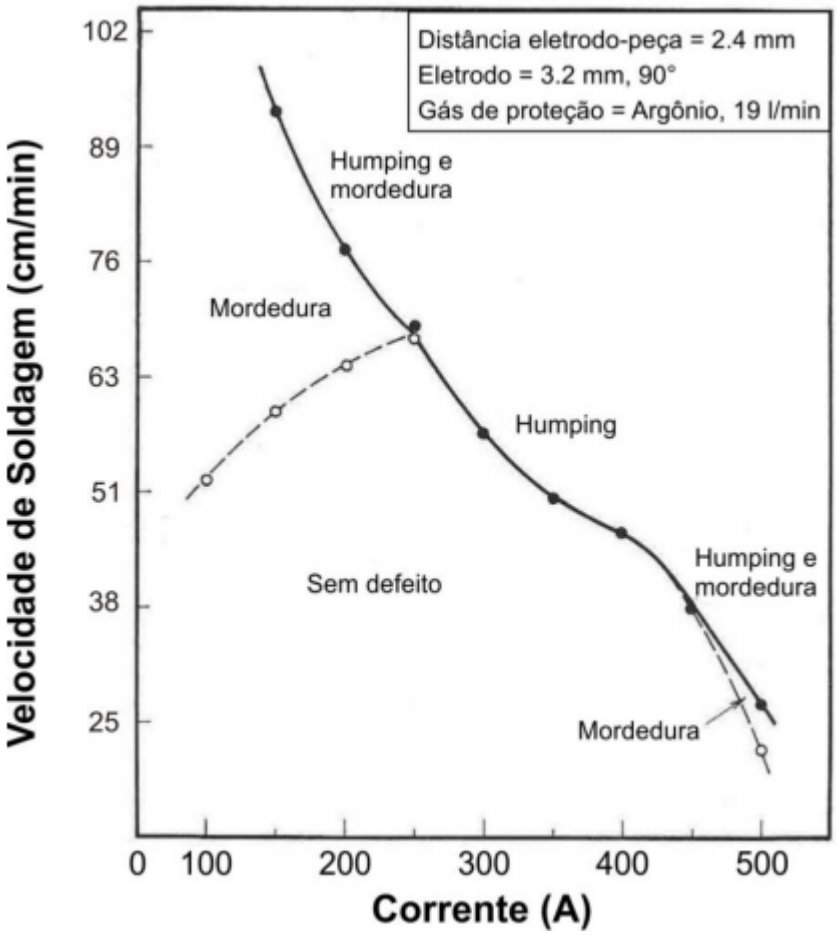


Figura 2.10 – Efeito da velocidade na formação de defeitos. [9] apud SAVAGE.

3. Materiais e Métodos

3.1. Bancada de soldagem

Para o desenvolvimento dos estudos referentes à alimentação de topo no processo TIG de alta produtividade foi montada uma bancada de ensaios no laboratório de soldagem da UFSC.

A bancada (Figura 3.1) é composta de uma fonte de soldagem (1), uma tocha de soldagem (2), um manipulador robótico Tartílope V2f (3), AVC (4), uma unidade de refrigeração (5), além de suportes para tocha e suportes para corpos de prova.

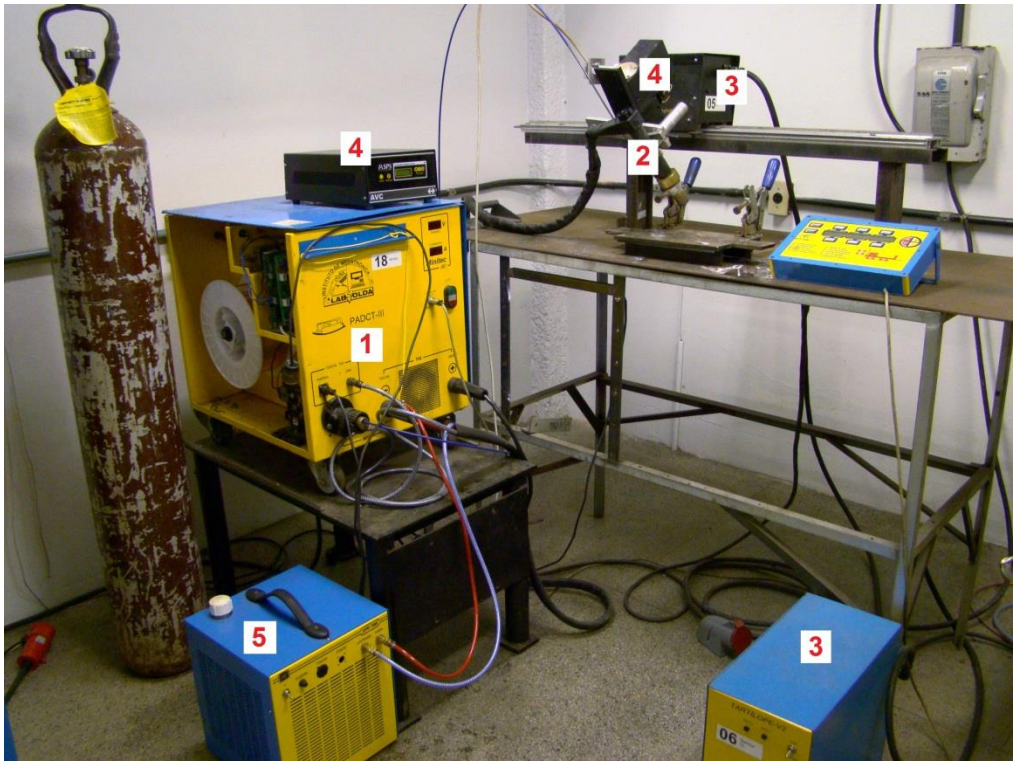


Figura 3.1 – Bancada de Soldagem. 1-Fonte de Soldagem; 2-Tocha de Soldagem; 3-Tartílope e Controle de Tartílope; 4-AVC e Controle de AVC; 5-Unidade de Refrigeração.

3.1.1. Fonte de soldagem

Foi utilizada uma fonte de soldagem Minitec 200, desenvolvida no LABSOLDA e fabricada pela empresa IMC. Fonte de corrente contínua, chaveada no secundário, atua em diversos processos de soldagem, em uma faixa de corrente entre 5 a 450 A.

3.1.2. Tocha de soldagem

Foi utilizada uma tocha de soldagem TIG de corpo reto desenvolvida pela Binzel, série AUT 27A. Resfriada com água tem capacidade de atuar com correntes

de soldagem de até 500A. Podem ser utilizados eletrodos entre 1mm e 6,4mm de espessura.

Figura 3.2 – Tocha de soldagem Binzel AUT 27A

3.1.3. Bocal alimentador

Para testes do novo processo foi necessária a fabricação do bocal adaptado, que foi projetado, juntamente com a equipe da PET metrologia, e fabricado pelo LABSODA, especialmente para estudos do processo de soldagem TIG com alimentação de topo.

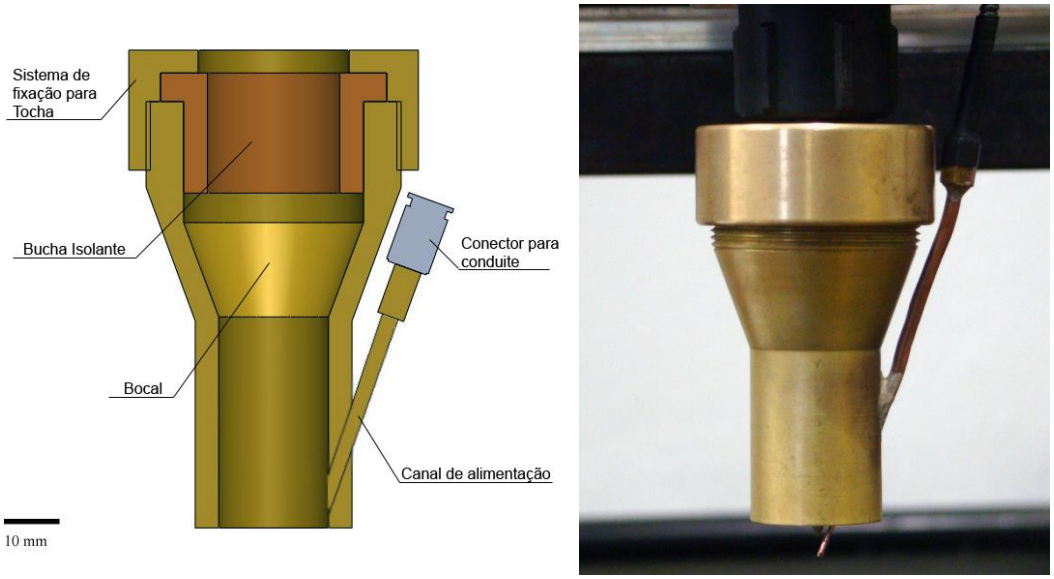


Figura 3.3 – Desenho esquemático do Bocal adaptado para alimentação de topo. E foto do bocal montado na tocha TIG.

3.1.4. Manipulador Robótico

Para o controle do avanço da tocha de soldagem foi utilizado o manipulador robótico Tartílope V2f, desenvolvido pelo LABSOLDA e fabricado pela SPS.

Adaptado para o estudo pode chegar a velocidades de avanço em torno de 320 cm/min.

3.1.5. AVC (Arc Voltage Control)

O AVC é um equipamento que reúne as funções de abertura e controle da tensão do arco TIG. Com o controle da tensão do arco, é possível controlar a altura deste e assim soldar em superfícies irregulares.

3.1.6. Unidade de Refrigeração de Tocha

Foi utilizada a unidade de refrigeração UPR-7500, fabricada pela IMC. O sistema utiliza água como fluido refrigerante com fluxo de até 10 litros por minuto.

3.2. Consumíveis

3.2.1. Eletrodo

Foram utilizados eletrodos de tungstênio com 2% de tório (EWTh-2) 6 mm de espessura. Afiados em um ângulo de aproximadamente 40°, para facilitar a injeção do arame de solda sem que este toque o eletrodo.

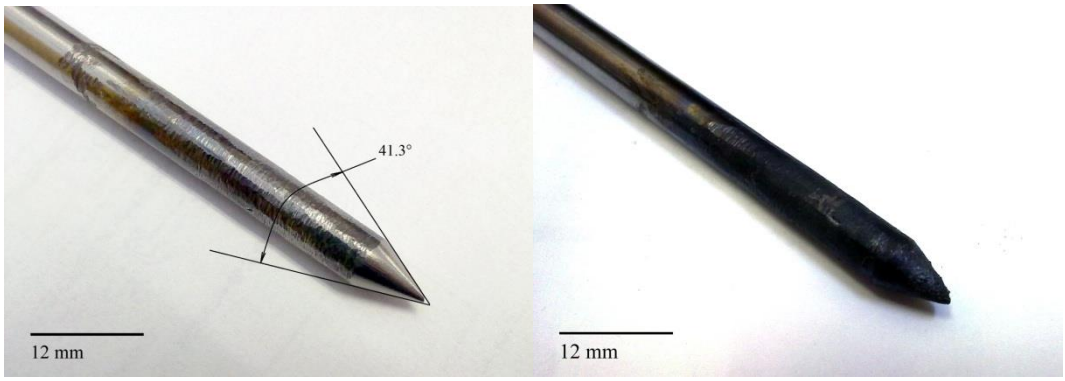


Figura 3.4 – Detalhes da afiação da ponta do eletrodo de tungstênio (A) e do desgaste ocorrido após realizada uma série de cordões de solda (B).

3.2.2. Material de adição

Foi utilizado o arame ER70S-6 de 1,2 mm de espessura. Sua composição segue na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição Química do arame de solda

Composição Química						
Elemento	Carbono	Manganês	Silício	Fósforo	Enxofre	Cobre
%	0,07 – 0,15	1,40 – 1,85	0,80 – 1,15	0,025	0,035	0,5 máx.

3.2.3. Gás de Proteção

Foram utilizados dois tipos de gases de proteção, argônio puro (pureza de 99,99%) e argônio com 5% de hidrogênio. Ambos distribuídos pela White Martins.

3.2.4. Corpos de prova

Para realização de depósitos sobre chapa foram utilizadas chapas de aço carbono SAE 1020, com 9,525 mm de espessura, cortadas nas dimensões de 200 mm por 100 mm.

Para os depósitos de junta sobreposta e junta de topo foram utilizadas chapas de aço carbono SAE 1020 de 3,175 mm de espessura, cortadas nas dimensões de 300 mm por 60 mm.

Antes da realização de qualquer ensaio as chapas tiveram suas superfícies limpas para remoção de óleos, graxas ou poeira. Os corpos de prova também foram esmerilhados para remoção de óxidos.

3.3. Procedimentos de analise

3.3.1. Análise do Processo de Soldagem

Verificar o comportamento e abertura do arco, contaminação do eletrodo e o funcionamento do processo como um todo.

3.3.2. Análise Visual

Analisar nos cordões de solda sua continuidade (ausência de *defeitos*), penetração e largura. É feita a comparação com um padrão requerido facilitando o encontro dos parâmetros de solda.

3.3.3. Preparação Metalográfica

São feitos cortes transversais nos cordões de solda e preparadas amostras. Essas amostras são embutidas em resina polimérica e posteriormente lixadas com lixas de 80, 180, 320, 400, 600 e 1200 Mesh e polidas com suspensão de alumina 1μm.

O Ataque Químico é realizado com Nital com a diluição de 1 parte de Ácido Nítrico para 9 de Álcool Etílico durante um tempo de 6 segundos aproximadamente.

3.3.4. Edição de Imagens

Após a preparação metalográfica as amostras são fotografadas e analisadas utilizando o programa de edição de imagens (Figura 3.4), para o calculo da área fundida e penetração.

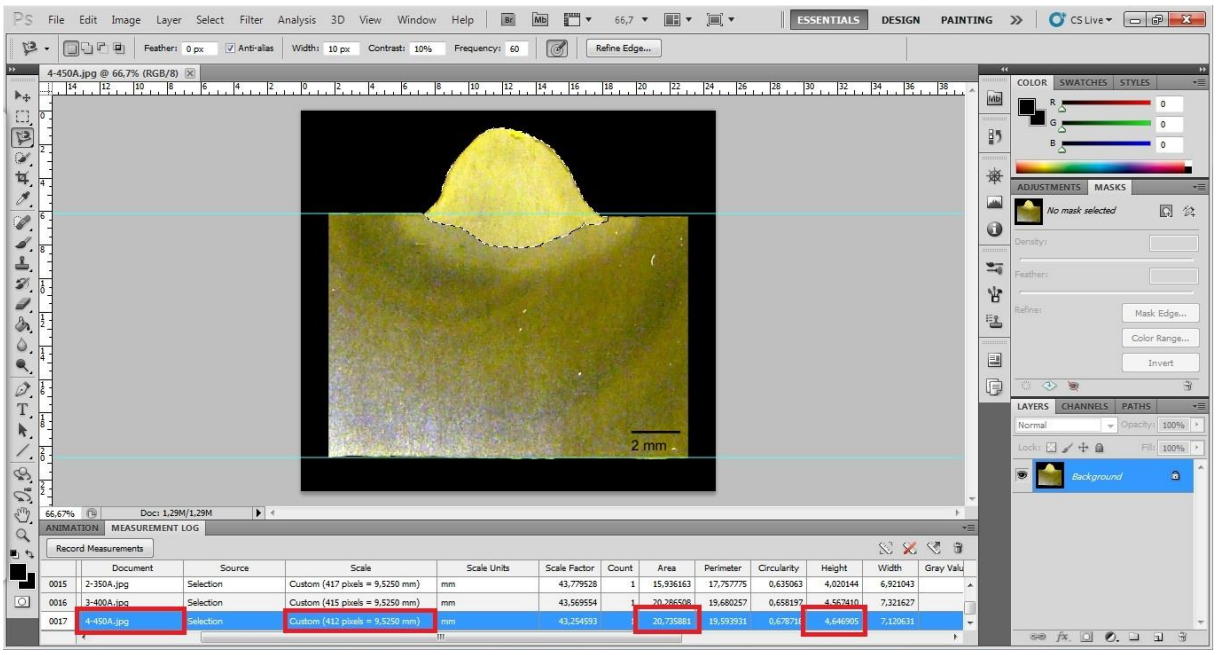


Figura 3.5 – Interface do programa de edição e analise de imagem.

4. Metodologia

4.1. Ensaios Cordão Sobre chapa

Para validação do equipamento e tomada de parâmetros, inicialmente serão realizados ensaios sobre chapa, buscando avaliar posições e velocidade de soldagem, avaliando a velocidade limite na formação dos defeitos, posição do metal de adição, corrente de soldagem, bom como posicionamentos da tocha de soldagem.

4.2. Ensaios em Junta sobreposta

Nos ensaios em juntas sobreposta pretende-se avaliar a aplicação em juntas que simulem peças de reais aplicações do processo, e assim possibilitar a comparação com a literatura, avaliando aumentos de produtividade e minimização de defeitos.

4.3. Parâmetros chaves

Para que o processo mantenha uma boa estabilidade alguns parâmetros devem ser seguidos.

Quando não se utiliza um controle de altura do arco automático, a distância entre eletrodo e peça deve ser mantida entre 3 mm e 5 mm, como mostra a figura 4.1, para que a injeção possa ser feita o mais próximo possível do centro da poça de fusão, pois esta é a região mais quente e a que permite maior estabilidade [10,11,12]. Para os testes iniciais utilizou-se como padrão 4 mm de distância.

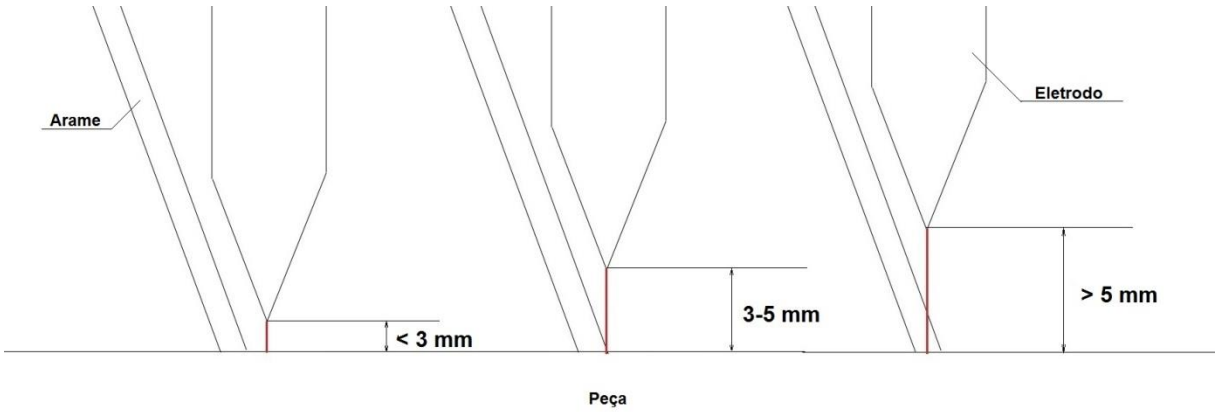


Figura 4.1 – Influência da altura do arco de soldagem na injeção de arame.

Ajustar a correta distância do arame para o eletrodo de solda é muito importante neste processo. Esta distância deve ser ajustada entre 1 e 1,5 vezes o diâmetro do arame [4]. A ponta do eletrodo deve ser afiada para manter um exato paralelismo com o ângulo de injeção do arame. Para os teste foi padronizado uma distância de 1,2 mm entre o arame e o arco e uma afiação de 40° para ponta do eletrodo.

5. Resultados

5.1. Influência da injeção de arame

Durante a execução dos testes pode-se perceber uma grande influência na quantidade de material depositado e na velocidade de soldagem dependendo de como o arame era injetado na peça.

Buscando avaliar a eficácia de fusão do processo de soldagem TIG alimentado, foram realizados experimentos comparando três condições possíveis de se obter um cordão contínuo. Uma utilizando o processo autógeno, outra adicionando arame pela frente do arco e outra adicionando arame por trás do arco.

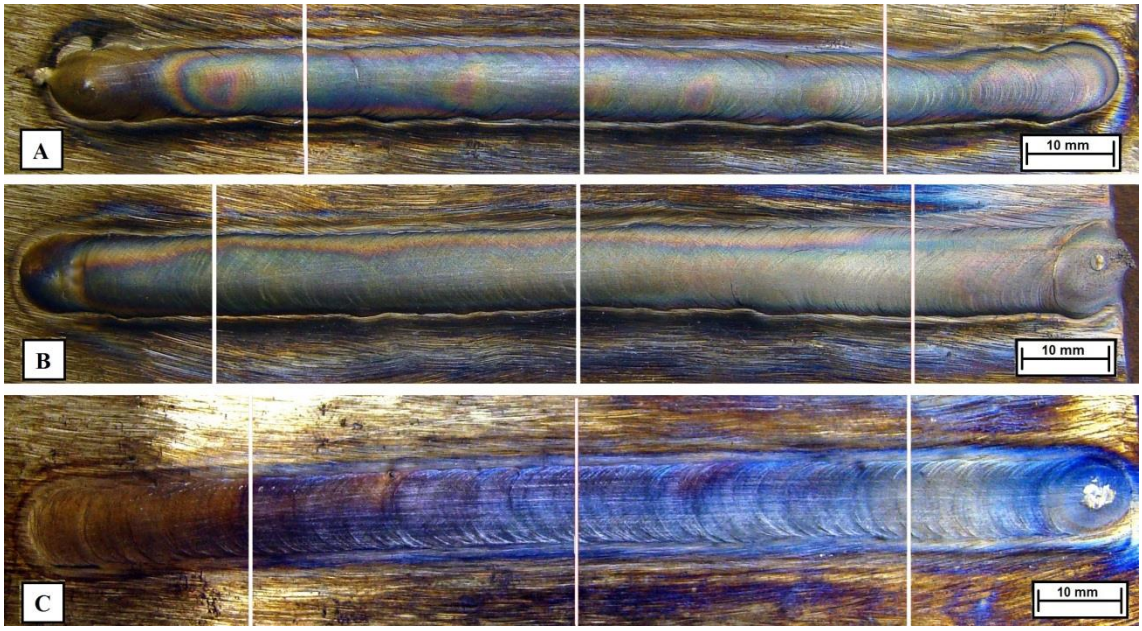


Figura 5.1 – A) Cordão de solda realizado pelo processo de soldagem TIG alimentado adicionando arame pela frente do arco– B) Cordão de solda realizado pelo processo de soldagem TIG alimentado adicionando arame por trás do arco - C) Cordão de solda realizado pelo processo de soldagem TIG autógeno.

Para análise, os cordões foram cortados em sua seção transversal em três pontos, conforme mostram as linhas brancas na Figura 5.1. Após o corte as amostras foram preparadas metalograficamente, fotografadas e analisadas utilizando o editor de imagens.

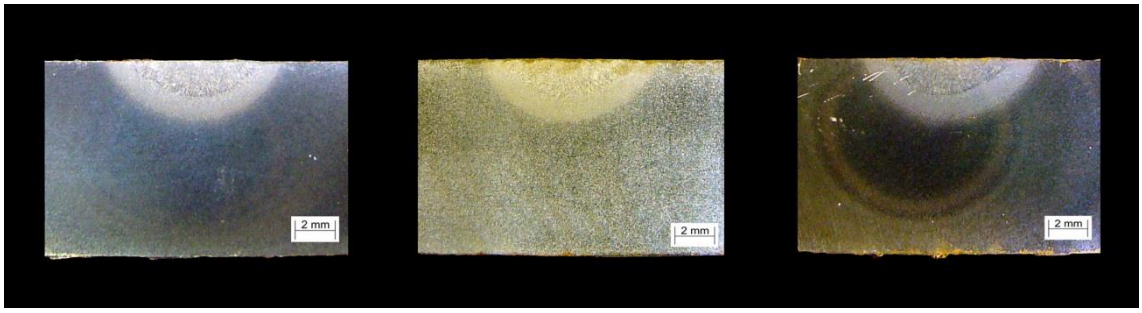


Figura 5.2 – Macrografias da seção transversal do cordão de solda realizado pelo processo de soldagem TIG autógeno.

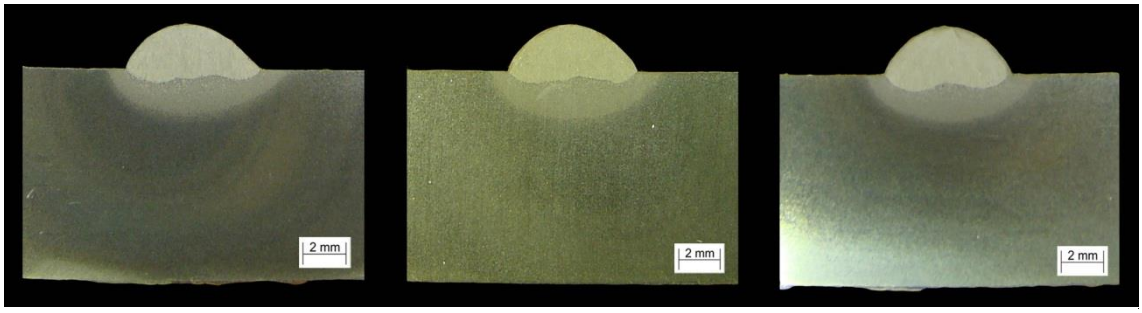


Figura 5.3 – Macrografias da seção transversal do cordão de solda realizado pelo processo de soldagem TIG alimentado adicionando arame pela frente do arco.

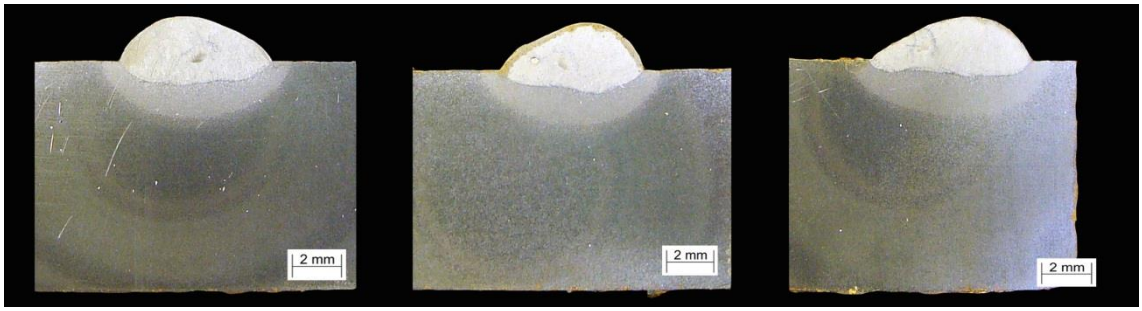
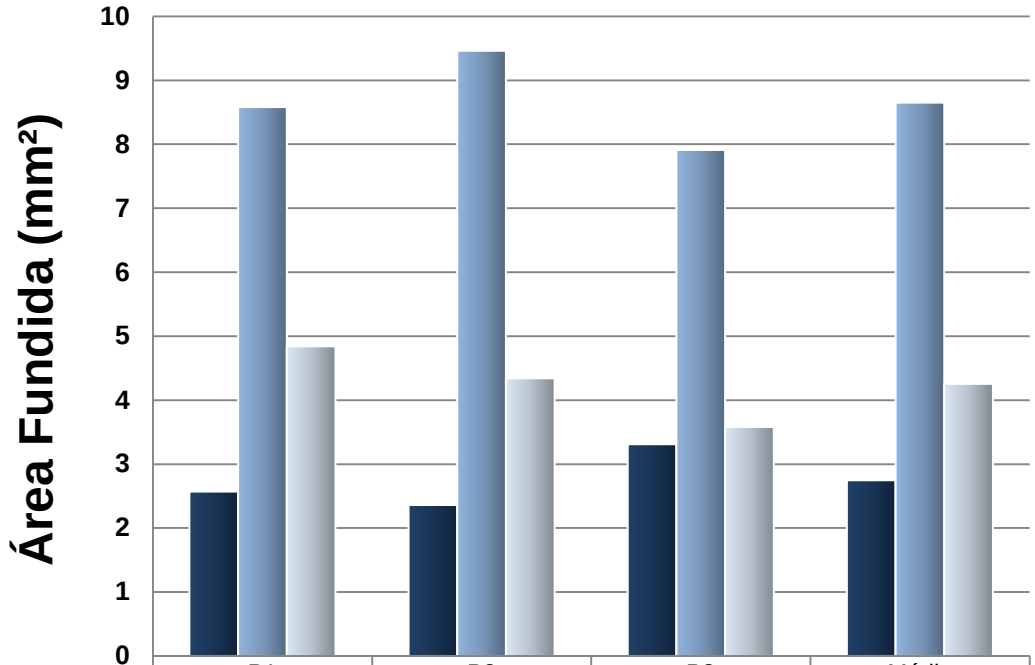


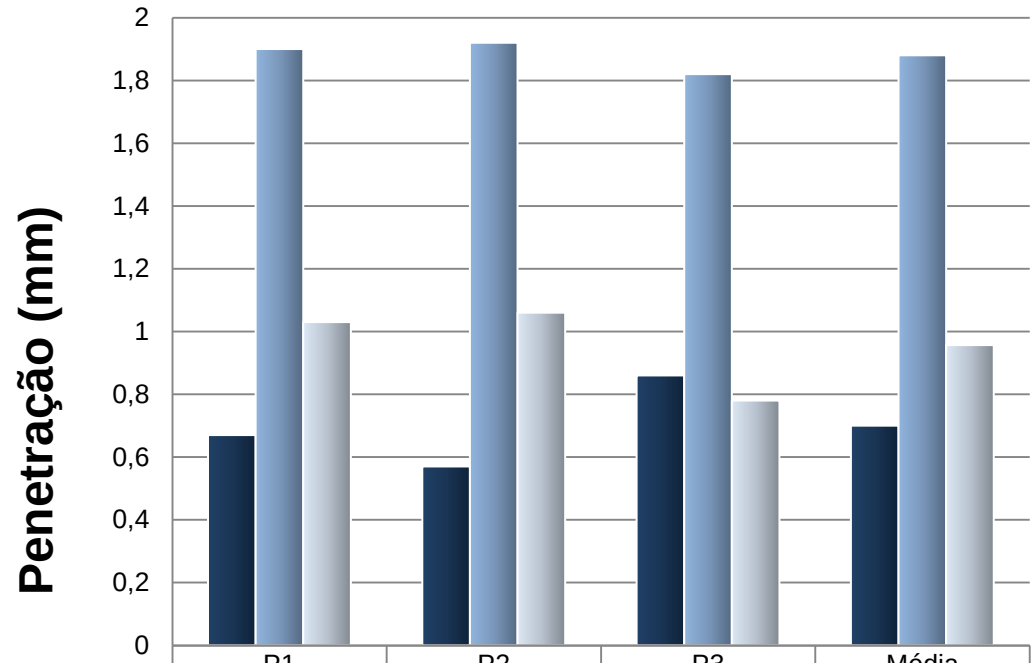
Figura 5.4 – Macrografias da seção transversal do cordão de solda realizado pelo processo de soldagem TIG alimentado adicionando arame por trás do arco.

Com a análise das macrografias das Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 foram gerados os gráficos 5.1 e 5.2.



	P1	P2	P3	Média
FRENTE	2,57	2,36	3,31	2,75
SEM ADIÇÃO	8,58	9,46	7,91	8,65
TRÁS	4,84	4,34	3,58	4,25

Gráfico 5.1 – Resultados para analise da área fundida



	P1	P2	P3	Média
FRENTE	0,67	0,57	0,86	0,7
SEM ADIÇÃO	1,9	1,92	1,82	1,88
TRÁS	1,03	1,06	0,78	0,96

Gráfico 5.2 – Resultados para analise da penetração

A medida da área fundida foi feita pela leitura da região que se fundiu abaixo da linha da superfície da peça e a medida da penetração foi feita entre a superfície da peça e a região fundida de maior profundidade.

Observando os gráficos pode-se concluir que o procedimento que teve melhores resultados, sob o ponto de vista da eficácia de fusão, foi quando se adicionou arame por trás do arco.

Segundo [12] a distribuição da temperatura da poça de fusão se dá conforme a Figura 5.5.

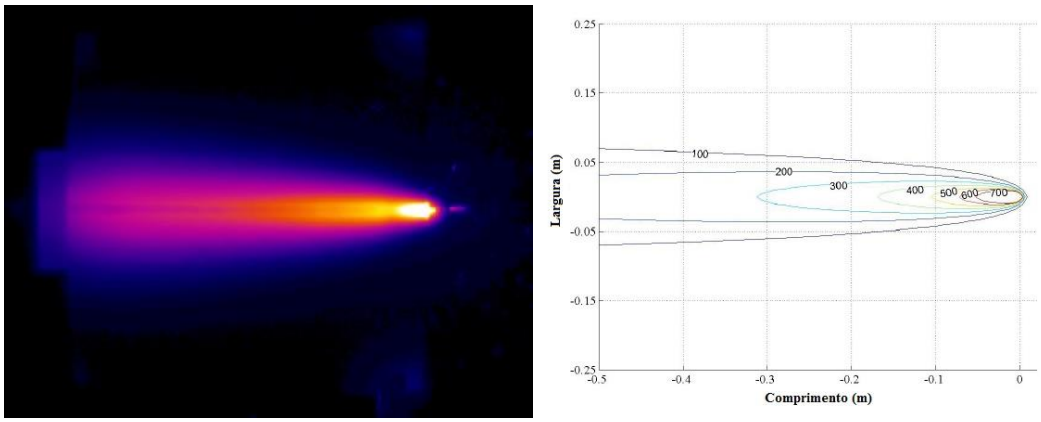


Figura 5.5 – Gráfico do contorno da temperatura próximo ao fim do cordão de solda.

Nesta posição de injeção de arame existe um somatório das temperaturas da poça de fusão e do arco voltaico, o que culmina numa maior eficiência de fusão, comparado com a injeção pela frente do arco, onde a energia da poça é bem menos intensa. Isto ocorre porque o arame funde-se mais facilmente, dispensando menor energia do arco de soldagem. Que é levada a fundir o metal de base.

Em seus experimentos, Delgado afirma que adicionando arame pela frente do arco de soldagem a estabilidade do processo é maior e que adicionar arame por trás do arco de soldagem aplica-se somente para processos de Arame pré-aquecido (hot-wire). Porém com injeção de topo o arame passa muito próximo do eletrodo, ou seja, em uma região mais quente e, portanto já chega mais aquecido à poça de fusão, tendo um maior rendimento e estabilidade.

Na soldagem TIG alimentada de topo também é preferível à injeção de arame por trás do arco devido a seu posicionamento. Como o arame passa rente ao

eletrodo, com uma variação mínima em sua trajetória este tocaria o eletrodo, contaminando o mesmo.

Com o arame na frente do sentido de avanço da tocha se por algum motivo o arame ficar grudado na poça de fusão o eletrodo tende a tocar o arame, porém se o arame estiver atrás do arco quando este colar na poça a tendência é que ele se afaste do arco de soldagem.

5.2. Ensaios sobre chapa

5.2.1. Minimização de defeitos

Após a avaliação do melhor posicionamento do arame de solda em relação ao eletrodo e a peça de trabalho deram-se inicio a testes sobre chapa para avaliar quais os benefícios em relação à minimização dos defeitos de soldagem e quais as vantagens que poderiam ser obtidas em termos de produtividade do processo.

Para avaliar os efeitos da injeção do arame quanto ao aparecimento do *Humping* foram realizados cordões com adição e sem adição de arame.

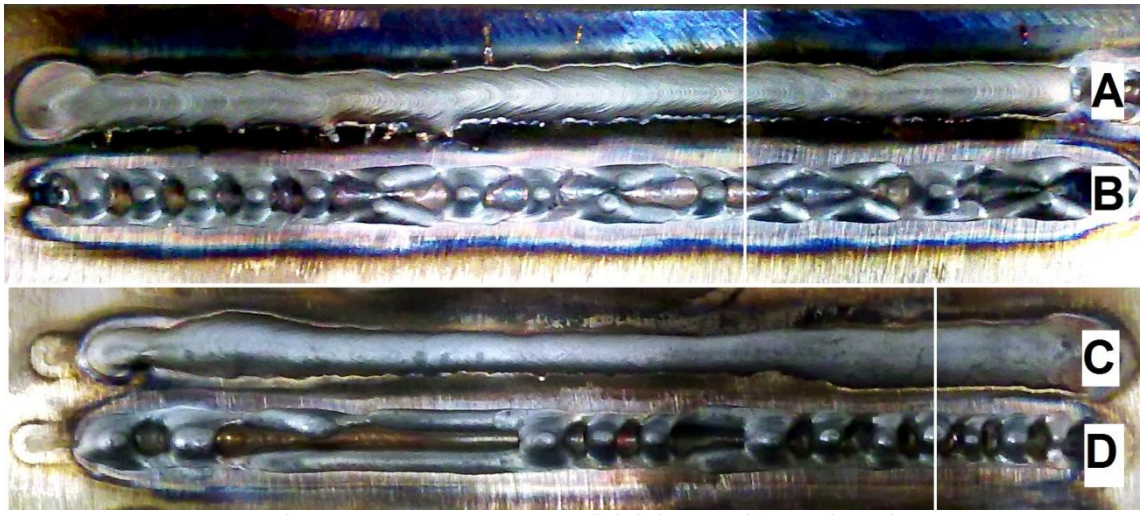


Figura 5.6 – Aspecto superficial dos cordões sobre chapa.

Os cordões da Figura 5.6 foram realizados com parâmetros da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem para avaliação do Humping

Codão	Corrente (A)	Vel. de Soldagem (cm/min)	Vel. de Arame (m/min)
A	300	60	4,5
B	300	60	-
C	400	60	6,5
D	400	60	-

Abaixo seguem as metalografias da seção transversal dos cordões, cortadas conforme indicado pelas linhas brancas da Figura 5.6.

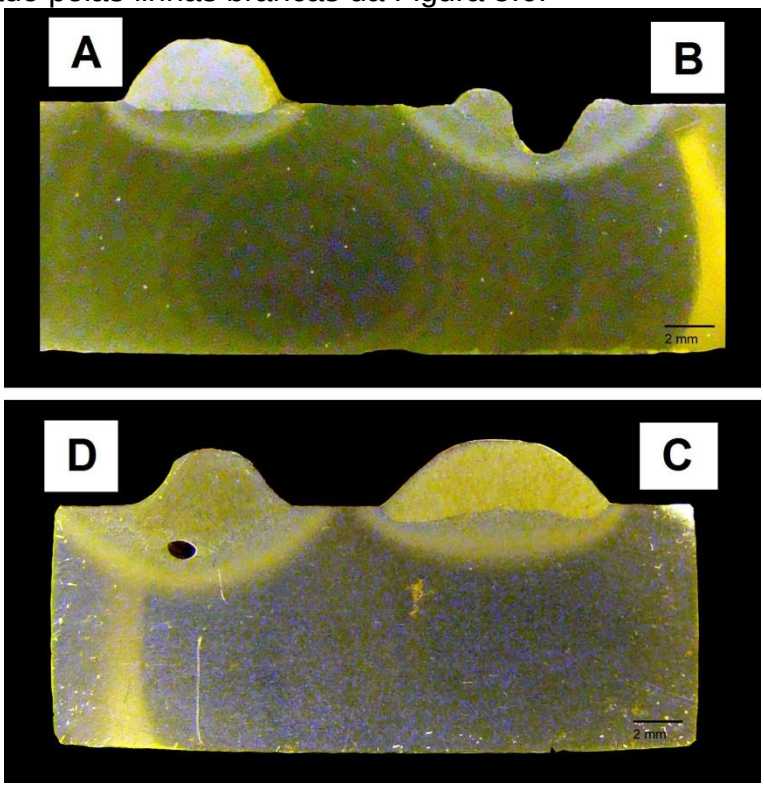


Figura 5.7. – Metalografia da seção transversal dos cordões A, B, C e D.

Observando o aspecto superficial e as macrografias realizadas nos cordões, mostrados na Figura 5.7, é visível os benefícios quanto a minimização de defeitos da adição de arame ao processo TIG. Como já foi comentado anteriormente o *Humping*, como pode ser visto esquematicamente na Figura 5.8, ocorre devido à associação de forças geradas pelo arco de soldagem.

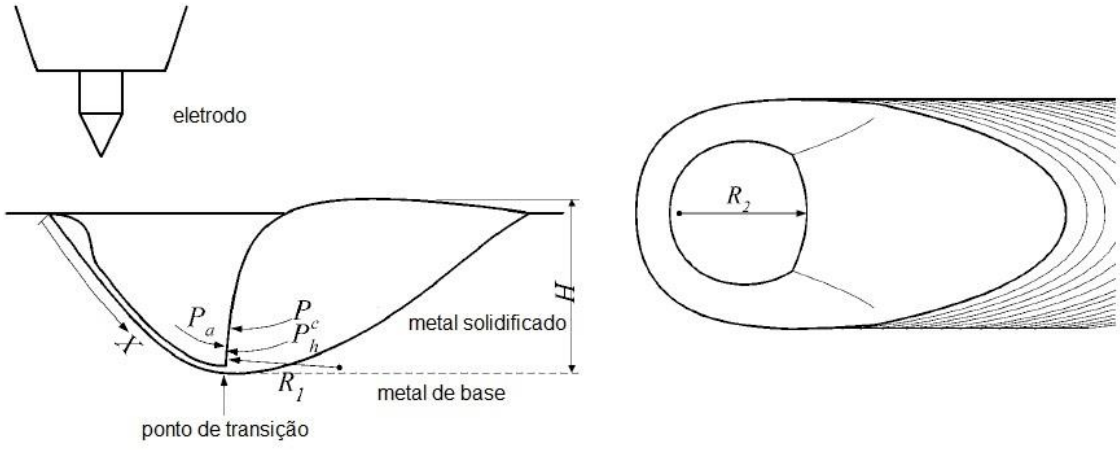


Figura 5.8 – Forças que atuam no ponto de transição. Adaptada de [6]

A força hidrostática (P_h) é gerada pela pressão da coluna de metal(H) entre o ponto de transição e o ponto mais alto da superfície. Sua expressão é:

$$P_h = \rho g H \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do substrato e g é a aceleração da gravidade. A expressão da força capilar é:

$$P_c = \sigma ((1/R1) + (1/R2)) \quad (2)$$

onde σ é a tensão superficial e R1 e R2 são as curvaturas principais da superfície livre no ponto de transição. Quando a arame é injetado na peça ele ira exercer uma força na coluna de metal(H) o que ira promover um aumento nas forças hidrostáticas (P_h) e também ira diminuir os raios de curvaturas R1 e R2 culminando num aumento das forças capilares (P_c). Fazendo com que $P_h+P_c > P_a$, por consequência diminuindo a formação do *Humping*.

5.2.2. Avaliação dos Parâmetros de Soldagem

Verificados os benefícios quanto ao Humping, foram realizados cordões sobre chapa para avaliação dos melhores parâmetros de soldagem e então partir para aplicações práticas.

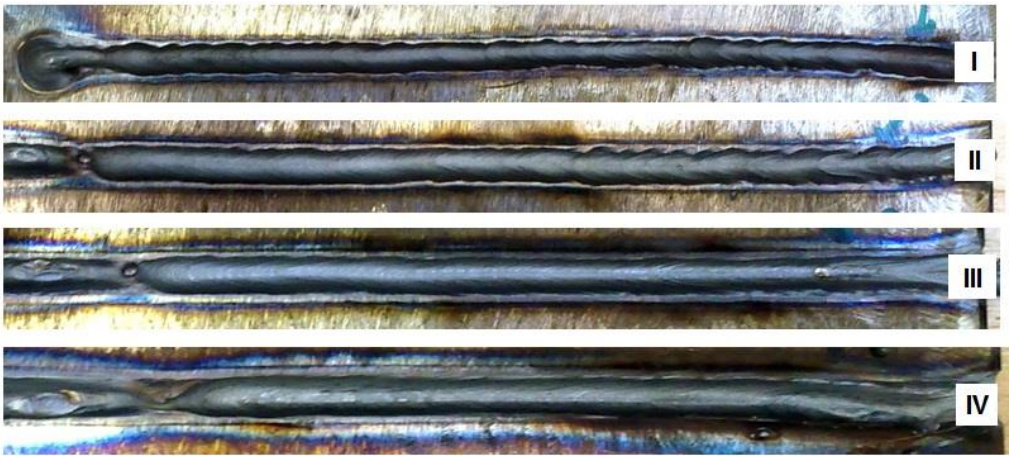


Figura 5.9 – Aspecto superficial dos cordões sobre chapa.

Os cordões da Figura 5.9 foram realizados com os parâmetros que segue na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Parâmetros de soldagem para avaliação do Parâmetros de Soldagem

Codão	Corrente (A)	Vel. de Soldagem (cm/min)	Vel. de Arame (m/min)
I	300	60	5
II	350	60	6
III	400	60	7
IV	450	60	8

Estes foram os cordões que apresentaram o melhor aspecto superficial para as respectivas correntes de soldagem.

Pretendendo verificar qual foi à penetração obtida para cada corrente de soldagem foram feitos cortes nas seções transversais dos cordões conforme é mostrado na Figura 5.10.

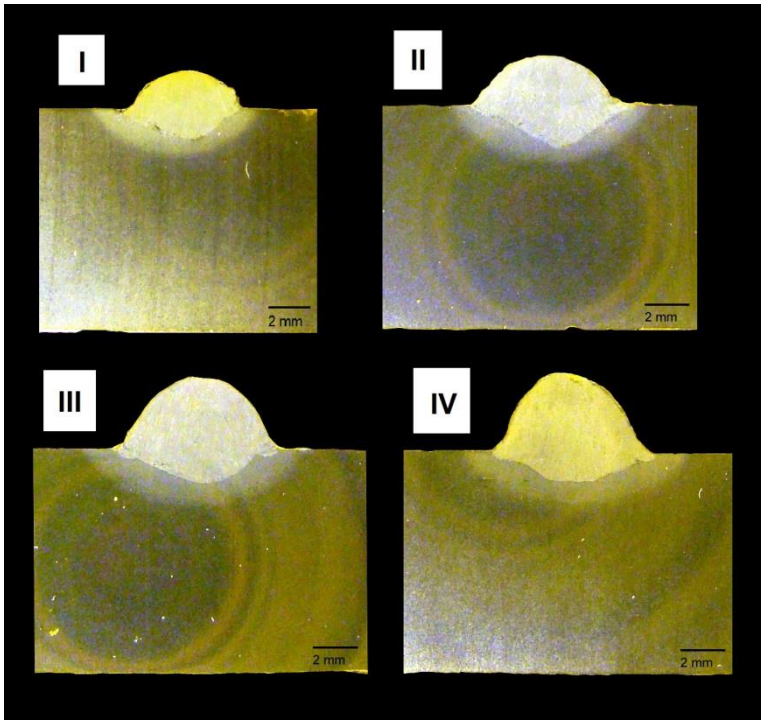


Figura 5.10 – Macrografia das seções transversais dos cordões de solda realizados sobre chapa.

Após o corte os cordões foram preparados metalograficamente e analisados via o editor de imagens.

Tabela 5.3 – Dados das seções transversais do cordões sobre chapa

Cordão	Eficiência Fusão (mm²)	Penetração (mm)	Fusão Total (mm²)
I	4,67	1,47	10,61
II	6,98	1,94	15,93
III	6,05	1,63	20,28
IV	6,13	1,57	20,73

Chegando a conclusão que a melhor concepção é a do cordão III devido ao bom aspecto superficial, melhor molhamento do cordão, estabilidade do processo, e melhor relação destes fatores com a penetração e fusão de arame.

5.3. Ensaios em Junta Sobreposta

Após se ter uma estabilidade do processo para cordões sobre chapa partiu-se para uma aplicação que simulasse uma situação real de soldagem.

O cordão da Figura 5.11 (a) foi realizado utilizando os parâmetros que tiveram o melhor desempenho nos ensaios sobre chapa.

Figura 5.11 – Aspecto superficial dos depósitos realizados em junta sobreposta.

Observando as Figura pode-se notar também o benefício da adição de arame onde o cordão da Figura 5.11 (b) foi realizado sem injeção de arame e o da Figura 5.11 (a) com adição de arame. Os parâmetros utilizados foram: 400A de corrente de soldagem, 6,5 m/min de injeção de arame e uma velocidade de avanço de tocha de 60 cm/min.

Mesmo sendo possível obter bons cordões utilizando esses parâmetros para depósitos sobre chapa, para a união de juntas sobrepostas não foi possível obter cordões livres de defeitos e nem ter uma boa estabilidade na soldagem. Partiu-se para utilização de correntes de soldagem mais elevadas. O cordão da Figura 5.12(c) foi realizado com 450A de corrente de soldagem, 6,5 m/min de adição de arame e 60 cm/min de velocidade de soldagem.

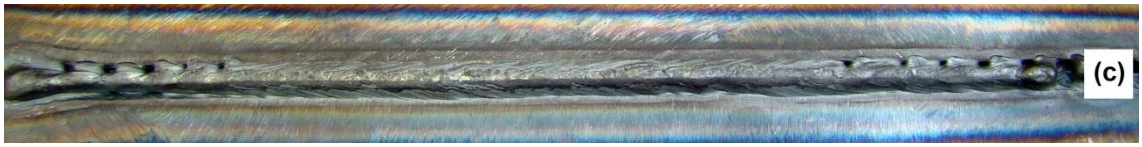


Figura 5.12 – Aspecto superficial do melhor cordão obtido a 450A de corrente de soldagem

Mesmo com o aumento da corrente os cordões ainda apresentavam descontinuidades e como pode ser observado pela metalografia da Figura 5.13, uma baixa penetração, o que não garantiria boas propriedades mecânicas ao cordão.

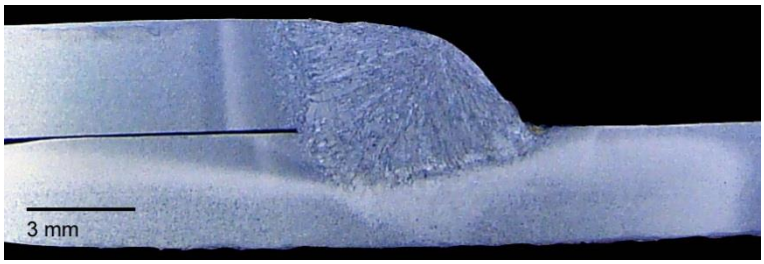


Figura 5.13 – Macrografica da seção transversal do cordão (c).

Optou-se então pela utilização de uma gás ativo para proteção do cordão, com utilização de uma mistura de argônio com 5% de hidrogênio foi possível obter cordões de excelente aspecto superficial, além de uma maior estabilidade no processo e aumento na produtividade.

Figura 5.14 – Aspecto superficial do cordão utilizando gás ativo na atmosfera de proteção.

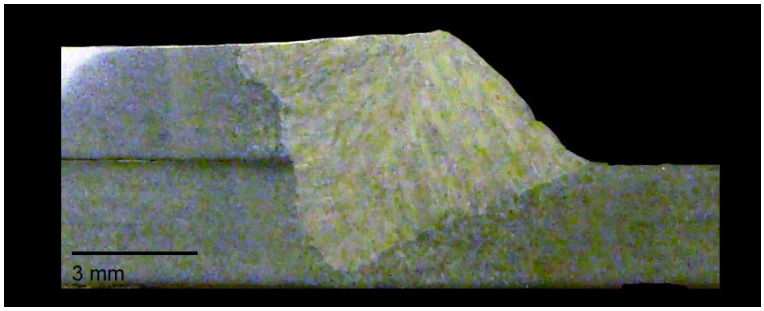


Figura 5.15 – Macrografia da seção transversal do cordão de solda (d).

O cordão da Figura 5.14(d) foi realizado utilizando uma corrente de soldagem de 400A, com velocidade de avanço de tocha de 80cm/min e 6,5 m/min de velocidade de injeção de arame. Também é possível notar pela analise

metalográfica, mostrada na Figura 5.15, que com esta concepção foi possível obter uma excelente penetração, quase que total, atribuindo boas propriedades mecânicas a união.

Tentou-se aumentar a velocidade de soldagem, porém em velocidades superiores a 80 cm/min apareceram mordeduras nos cordões, mostrados na Figura 5.16.

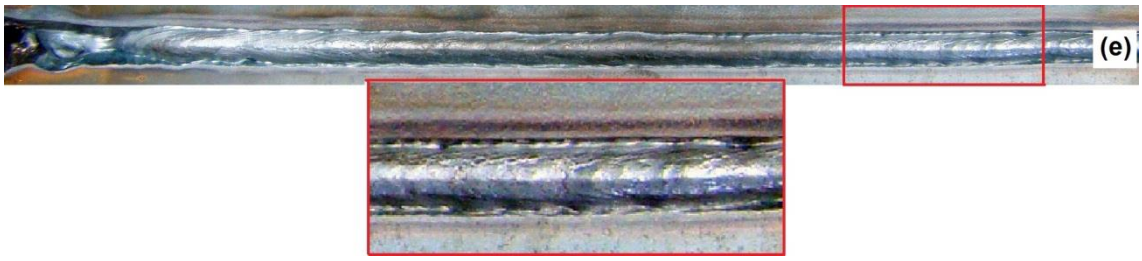


Figura 5.16 – Aspecto superficial do cordão de solda (e) com velocidade de avanço de tocha de 1m/min.

Na tentativa de melhorar o acabamento superficial e ganhar maior produtividade optou-se pela utilização de um ângulo de ataque na tocha de soldagem, como mostra a Figura 5.17, que segundo Reis, teoricamente, com a tocha posicionada no sentido de empurrar a poça de fusão, a pressão exercida pelo arco tende a fazer com que este incida sempre sobre uma parte ainda líquida da poça, o que provavelmente proporciona um melhor acabamento do cordão, no entanto com uma menor penetração.

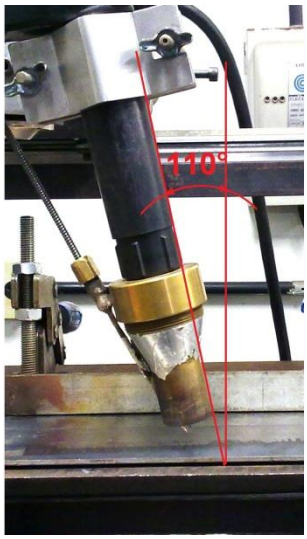


Figura 5.17 – Ângulo de ataque aplicado a tocha de soldagem.

No caso das juntas sobrepostas esta concepção causou instabilidade no processo, gerando cordões descontínuos, como o cordão da Figura 5.18(f).

Figura 5.18 – Aspecto superficial do cordão de solda (f) utilizando ângulo de ataque na tocha de soldagem.

Para comparar os resultados obtidos na união de juntas sobrepostas, foram utilizados os resultados alcançados por Ietak (Tabela 5.4), para união de compressores herméticos, com espessura de parede de 3mm em junta sobreposta. Utilizando o mesmo gás de proteção e mesma faixa de corrente, porém em soldagem autógena.

Tabela 5.4 - Comparação dos Resultados Obtidos para Junta Sobreposta

Ensaio	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (m/min)	Gás de Proteção
1(Ietka)	450	1,00	Ar + 5%H2
Cordão (d)	400	0,8	Ar + 5%H2

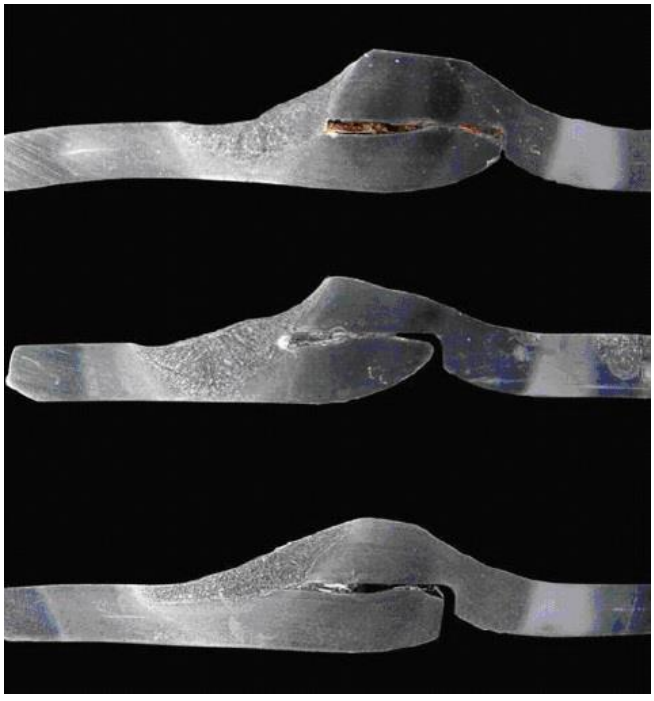


Figura 5.19 – Macrografia do Ensaio 1 obtido por Ietka.

Observando os resultados obtidos por Ietka (Figura 5.19), se pode concluir que os ensaios sobre chapa tiveram bons resultados, pois foi possível soldar com velocidades próximas, mesmo utilizando correntes de soldagem inferiores, e atingir maior eficiência na penetração.

5.4. Ensaios em Junta de Topo

Ao contrário dos ensaios em juntas sobrepostas, para soldagem de juntas de topo a aplicação de um ângulo de ataque foi muito eficiente, sendo possível realizar cordões com até 1,6 m/min de velocidade de soldagem.

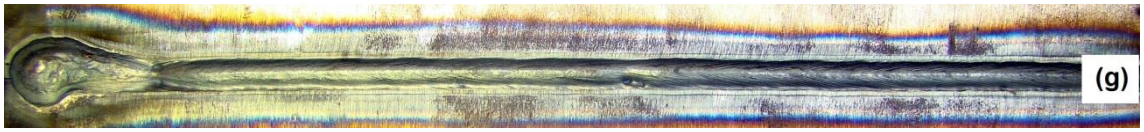


Figura 5.20 – Aspecto superficial do cordão de solda (g) depositado em junta de topo.

O cordão da Figura 5.20(g) foi realizado em junta de topo a uma velocidade de soldagem de 1,6 m/min, com um ângulo de 110° na tocha no sentido de empurrar a poça de fusão. Foi utilizada uma corrente de 450A, 8 m/min de velocidade de alimentação e uma mistura de argônio com 5% de hidrogênio no gás de proteção.

Foi realizado um ensaio metalográfico de sua seção transversal para verificar a penetração da zona fundida (Figura 5.21).

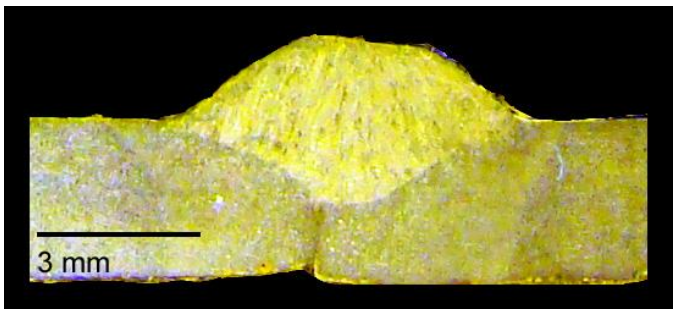


Figura 5.21 – Macrografia da seção transversal do cordão de solda (g).

Com medições realizadas na metalografia foi possível verificar que esta concepção teve uma penetração de 1,74 mm, insuficiente para garantir boas propriedades mecânicas à união. Isto se deve ao fato da utilização de um ângulo de ataque, porém este problema pode ser solucionado com a utilização de um GAP (espaço entre as chapas), com utilização de correntes mais elevadas ou então com outras misturas no gás de proteção.

Para comparar os resultados obtidos na união de juntas topo, utilizou-se resultados alcançados pelo processo TIG autógeno, desenvolvido no LABSOLDA, para união de peças automobilísticas, com espessura de parede de 2,5 mm em junta de topo.

Tabela 5.5 - Comparação dos Resultados Obtidos para Junta de Topo

Ensaio	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (m/min)	Gás de Proteção
-	340 (média)	0,90	Ar + 15%H2
Cordão (g)	450	1,6	Ar + 5%H2

Observando a Tabela 5.5 é possível verificar que utilizando o processo TIG com alimentação de topo, se consegue alcançar velocidades de soldagem superiores as alcançadas pelo processo autógeno.

6. Conclusões

- Para ter uma boa estabilidade o processo deve estar bem ajustado em relação ao posicionamento entre o arame e o eletrodo, atentando para afiação do eletrodo, que deve ser paralela ao ângulo de injeção do arame e para a distância eletrodo-arame, que dever estar entre 1 e 1,5 vezes o diâmetro do arame;
- Para uma injeção de arame mais eficiente a distância entre o eletrodo e a peça de trabalho deve ser fixada entre 3 e 5mm;
- A posição de alimentação influencia diretamente na eficácia de fusão e na penetração do processo e, preferencialmente, dever ser feita com injeção do arame por trás do arco de soldagem;
- Com a injeção de arame foi possível diminuir a incidência de defeitos de maneira significativa, tornando o processo mais estável para faixas de correntes superiores a 300ª, evidenciados pela diminuição de defeitos;
- O processo mostrou-se eficiente para aplicações de juntas sobrepostas e juntas de topo, em comparação a resultados encontrados na literatura, sendo possível utilizar altas velocidades de soldagem e altas faixas de corrente.

6. Recomendação para trabalho futuros

- Utilizar corrente de soldagens mais elevadas, a fim de obter cordões de maior capacidade de penetração e ser possível utilizar velocidades de soldagens mais elevadas;

- Utilizar outras formas de ondas para o arco voltaico, como com pulsações na corrente de soldagem;

- Utilizar sistemas automáticos de controle de adição de arame, como o utilizado no trabalho da referência [2];

- Utilizar outros gases ou misturas gasosas na proteção atmosférica da poça de fusão, como hélio ou porcentagens maiores de hidrogênio, buscando maiores rendimentos em termos de produtividade;

- Utilizar outras concepções de posicionamento de junta;

- Aplicar o processo para soldagem de aços inoxidáveis.

7. Referências

[1] CUNHA, T.V. **Desenvolvimento de Equipamento e de Metodologia de Parametrização para a Soldagem Orbital TIG**, Dissertação de Mestrado, POSMEC – UFSC, Florianópolis, 2008.

[2] CUNHA, T. V.; DUTRA, J.C.; SILVA, R.H.G.; GOHR Jr,R. **Desenvolvimento de um sistema adaptativo de alimentação de arame para o processo TIG,** Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2007, São Pedro. Anais do Congresso Brasileiro De Engenharia de Fabricação, 2007.

[3] DELGADO, L. C. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame**. Dissertação de Mestrado, POSMEC –UFSC, Florianópolis, 2000.

[4] FORTAIN, J.; RIMANO, L.; VAIDYA, V. **Innovative Process Improves Welding of Sheet Metal Parts,** Welding Jornal, January, 2008.

[5] SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. **Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding,** Welding Journal, 1979.

[6] MANDEZ, P.F.; NIECE, K.L.; EAGAR, T.W. **Humping Formation in High Current GTA Welding,** International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials II, Cincinnati, OH, November, 1999.

[7] KOU, S.; **Welding Metallurgy/Sindo Kou,** second edition, Wiley-Interscience, 2002.

[8] MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J. **Caracteristicas do Arco de Soldagem TIG em Diferentes Atmosferas,** UFMG, Belo Horizonte.

[9] SCHWEDERSKY, M.B.; **Um estudo da produtividade dos principais processos de soldagem à arco,** Dissertação de Mestrado, POSMEC-UFSC, Florianópolis,2011.

[10] YUDODIBROTO, B.Y.B.; HERMANS, M.J.M.; HIRATA, Y.; OUDEN, G. **Influence of filler wire addition on weld pool oscilation during gas tungsten arc welding,** Science of Technology of Welding and Joining, vol. 9, 2004.

[11] PANG, S.; CHANG, L.; ZHOU, J.; YIN, Y.; CHEN, T. **A three-dimensional sharp interface model for self-consistent keyhole and weld pool dynamics in deep penetration laser welding,** State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, People's Republic of China, 2010.

[12] CAMILLERI, D.; GRAY, T.; COMLEKCI, T. **Use of Thermography to Calibrate Fusion Welding Procedures in Virtual Fabrication Applications,** Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, 2004.

[13] REIS, R. P. **Soldagem Plasma "Melt-in" de Aço Comum ao Carbono,** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2005.

[14] IETKA, M.F. **Avaliação de soldagem TIG no selamento de compressores herméticos para refrigeração,** Dissertação de Metrado, POSMEC – UFSC, Florianópolis, 2010.