

SOLDAGEM TIG DE ALTA PERFORMANCE EM CHAPAS FINAS APLICADAS NA CONSTRUÇÃO DE COMPRESSORES

João Francisco Wiggers, joao.francisco.wiggers@grad.ufsc.br¹
Isabel Braga Ferreira Mattos, isabel.b.f.mattos@posgrad.ufsc.br¹
Kaue Riffel, kaue.riffel@posgrad.ufsc.br¹
Regis Henrique Gonçalves Silva, regis.silva@ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Soldagem – LABSOLDA, Florianópolis, SC, Brasil.

Resumo: A utilização de vasos de pressão é extremamente ampla no cenário industrial para o armazenamento de gases e líquidos. Exemplo disto é o vasto uso de compressores, botijões de gás de cozinha, extintores de incêndio entre outros. No entanto, o desenvolvimento e construção deste recipientes são de grande complexidade, pois é desejado que eles possuam paredes finas em sua estrutura enquanto mantêm a resistência necessária para desempenhar suas função sob pressão. No que tange a soldagem, esta característica de paredes finas causa dificuldades em sua produção, comumente feita com processo de arco submerso. Um processo que é conhecido por ser caro e complexo pela necessidade do uso abundante do fluxo granulado para a proteção da poça de fusão. A grande maioria deste fluxo não pode ser reaproveitado, pois sofre fusão de suas partículas quando em contato com a poça. Sendo a alta aceitação do arco submerso na indústria devido sua robustez e baixo índice de defeitos. Sabendo disso, no campo da soldagem busca-se outras alternativas que produzam soldas de igual qualidade e robustez com um custo muito mais baixo. Com este objetivo em mente, este trabalho realizou um estudo acerca da aplicabilidade do processo TIG na soldagem de chapas finas de aço carbono para a produção de compressores. Foram conduzidos testes de parametrização nos quais os diversos fatores que influenciam a qualidade da solda foram estudados. As soldas foram conduzidas em chapas ASTM 1020 de 2,65 mm de espessura. Durante os ensaios foram variados os parâmetros de corrente, angulação de tocha, distância entre eletrodo e peça (DEP) obtendo-se um ponto ótimo de operação que produz soldas com velocidade superior ao arco submerso e sem a presença de defeitos. Por fim, para uma análise mais detalhada do processo foram feitas aquisições dos sinais elétricos, imagens termografia e filmagem em alta velocidade.

Palavras-chave: vasos de pressão, paredes finas, TIG, aço carbono

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia da soldagem é uma área repleta de desentendimentos que provocam discordâncias até em campo semântico. O próprio entendimento do que significa soldagem é um bom exemplo desta problemática. No português, embora o termo brasagem esteja incluído no vocabulário para designar uniões de metais por técnicas que não se enquadram no conceito de soldagem, esse termo é frequentemente utilizado para designar o que de fato é uma brasagem. No idioma inglês existem e são eficazmente utilizados os termos “Welding” (soldagem), “Brazing” (brasagem) e “Soldering” (brasagem com ligas de estanho). Da mesma forma, no idioma alemão são utilizados de forma bem mais criteriosa os termos “Schweissen”, “Hartlöten” e “Löten”. Apesar disso, mesmo nestes idiomas, há conceitos; definições; premissas bem estabelecidas, mas que não contribuem de maneira eficiente para um adequado entendimento das causas e consequências da utilização de um determinado processo ou técnica.

No campo técnico tais controvérsias são, da mesma maneira, identificadas. Um exemplo bem característico é relacionado ao tema do presente trabalho, o qual busca soluções alternativas e eficientes para a soldagem de topo de chapas de aço carbono utilizadas na fabricação de compressores de ar. Atualmente o arco submerso tem sido o preferido nestas aplicações devido à geometria final do cordão estar em consonância com normas técnicas. A produtividade obtida por ele é também um fator importante, soldando chapas de 2,5~2,65 mm de espessura com velocidade de 10 mm/s (60 cm/min) com *backing* de cobre. O interesse por trás deste exemplo é a prospecção de outras alternativas de processo que tragam maior conforto do ponto de vista operacional e menor custo comparável ao arco submerso. Esse processo tem como característica o uso inerente de um fluxo para proteção do metal de solda e da poça de fusão, fato que o torna economicamente dispendioso, visto que tal consumível é majoritariamente importado e sua reciclagem é pouco viável.

No contexto de um processo com geometria de cordão manipulável e de menor custo está inserido o TIG. Pelo entendimento generalizado de que este processo pode resultar em termos de produtividade, não seria um caminho a ser seguido devido à fama que adquiriu de se destinar não a produtividade, mas sim tão somente a obtenção de qualidade e

isenção de respingos. Muito disso derivado de suas aplicações manuais. Quando comparado a outros processos, o TIG apresenta tensões mais baixas de arco para um mesmo valor de corrente, resultando, conseqüentemente, em potências menores. Porém, a comparação, ao contrário do que muitas literaturas apresentam, deve considerar o resultado final que o processo pode desempenhar e não julgar a produtividade de uma ou outra variante com base em dados de taxa de deposição ou potência. Delgado (2000) mostrou que ao comparar-se o processo TIG e o MIG/MAG em potência igualada, suas taxas de deposição podem ser equiparadas, porém processos que conseguem desempenhar a soldagem de forma autógena não podem ser avaliados em termos de taxa de deposição. Uma opção de comparação seria a capacidade de penetração ou de união de uma determinada junta com fusão total e sem defeitos. É dentro desta linha de raciocínio que o trabalho de Dutra *et al.* (2020) mostra que para a soldagem pela técnica do “Arco enterrado” - produção de um furo na peça pelo arco ou simplesmente keyhole - uma das dificuldades dos processos com eletrodo consumível é justamente sua alta taxa de deposição, pois para obter-se correntes elevadas há de se aumentar a velocidade de arame proporcionalmente. Apesar da existência de trabalhos científicos já há cerca de 20 anos, como o de Jarvis (2001) e mais recentemente o trabalho de Olivares *et al.* (2015) tentando situar o processo TIG como um processo de elevada produtividade, a assimilação da tecnologia carece de maior divulgação. Vale ressaltar que ambos os processos mostram a soldagem com o processo TIG no modo keyhole, no qual há a formação do furo passante na peça que se fecha pela atuação de forças de tensão superficial na poça à medida que há o deslocamento da tocha.

A literatura apresenta como principais dificuldades na soldagem de alta performance, em velocidade, a formação dos defeitos de humping ou perfuração da chapa que podem ocorrer em espessuras finas. Gou *et al.* (2019) descrevem o comportamento da poça e a formação de perfurações na soldagem TIG atribuindo-as à instabilidades do arco durante o processo em velocidade de soldagem elevada. Meng *et al.* (2017) e Meng and Qin (2018) encontraram uma relação entre a formação do humping, a tensão cisalhante e a pressão do arco, sendo que segundo os autores, a operação em elevadas correntes de soldagem conduz à operação em um limiar muito próximo ao modo keyhole, fato que pode ser prejudicial em chapas de menor espessura. Nesta linha, Mendez and Eagar (2003) definem que a formação de furos aleatórios no cordão de solda no processo de soldagem de alta corrente e penetração é devido ao rompimento da camada de metal líquido abaixo do arco elétrico, a qual ocorre pela sua solidificação prematura ao operar-se próximo ao keyhole.

Diante do exposto, este trabalho apresenta o processo TIG como uma alternativa de menor custo em uma soldagem de alta performance, ou seja, alta velocidade em chapas de aço carbono A36 de pequena espessura. Alternativas de melhoria do processo e um estudo do seu comportamento em tal aplicação também são apresentadas e discutidas com base em videografia sincronizada bi-angular de alta velocidade, termografia e resultados macrográficos de soldagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais Utilizados

O material utilizado para fabricação dos corpos de prova foram chapas de aço 1020 com 2,65 mm de espessura e 50 mm de largura, nos comprimentos de 200 mm e 600 mm. Na tocha TIG foi utilizado um eletrodo de tungstênio com 6,4 mm de diâmetro e dopado com 1,5% de lantânio. Durante a soldagem autógena foram utilizadas três proteções gasosas, sendo elas: Argônio puro e as misturas de Ar+5% H_2 e Ar+25%He. Para as soldas com alimentação automática foi utilizado arame ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro.

2.2. Equipamentos

Para o desenvolvimento dos ensaios foi utilizada uma tocha TIG automática acoplada a um dispositivo direcionador de arame, desenvolvido pela SPS (Sistemas e Processos de Soldagem) o qual proporciona precisão no posicionamento do arame na poça com ajuste multi-axial de 3 eixos, conforme a Fig.1. Nos ensaios com inclinação da tocha foram definidos o ângulo de ataque e de entrada do arame na poça mostrados na Fig.1. A fonte utilizada foi o modelo Digiplus A7 multiprocessos da fabricante IMC com capacidade de 800 A integrada com o cabeçote de alimentação de arame do mesmo fabricante. Foi utilizado o equipamento UR 2 da fabricante IMC para refrigeração da tocha, o qual é um componente de extrema necessidade devido à alta corrente de soldagem e para proteção contra superaquecimento da mesma.

Para manter a aplicação similar àquela presente na indústria foi mantido o backing de cobre para sustentação da raiz, no qual foi fabricado um canal semicircular de 3 mm de raio no seu centro, conforme o esquema da Fig. 3 elemento 3. Para análise do comportamento do processo nas diferentes condições apresentadas neste trabalho foram utilizadas duas câmeras de alta velocidade posicionadas de modo a captar duas perspectivas da poça de fusão. As câmeras foram a FASTCAM NOVA S9 da fabricante Photron e a IDT Motion Pro Y4-S2, ambas foram utilizadas com uma taxa de aquisição de 5000 Hz (frames/s). Para melhor visualização da poça de fusão e redução da luminosidade do arco elétrico foi utilizado, juntamente com as câmeras, o laser Cavilux HF da fabricante Cavitar, ambos observados na Fig. 2.

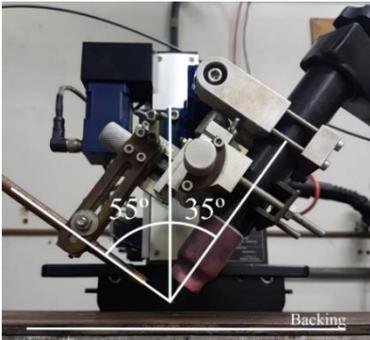


Figura 1. Disposição da tocha e alimentador.

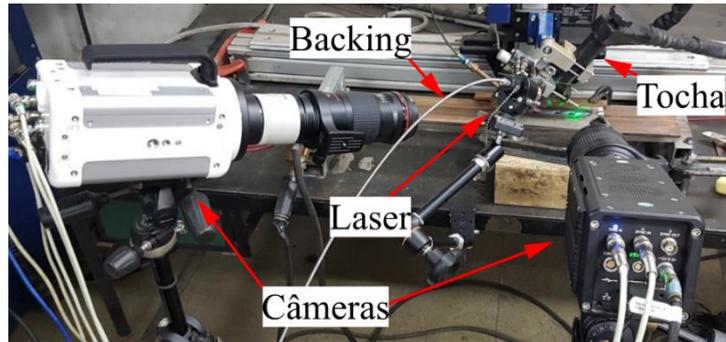


Figura 2. Câmera de alta velocidade e Laser.

2.3. Metodologia

Os testes foram feitos de forma a avaliar a aplicabilidade e características do processo TIG na soldagem de alta frente ao atualmente utilizado - arco submerso. Para que a produtividade industrial seja mantida foi definido como ponto restritivo do trabalho a soldagem com velocidade acima dos 60 cm/min já alcançadas pelo mesmo. Para eliminar influência de óxidos e sujeira nos resultados, as chapas tiveram suas arestas limpas com esmerilhamento, em seguida fixadas sobre o backing conforme o esquema da Fig.3.

A sequência de testes se deu conforme a Tab. 1. Na primeira etapa, ao soldar com TIG autógeno foram utilizadas chapas de 200 mm de comprimento e três diferentes gases de proteção. Além disto nesta etapa foram realizadas soldas com a tocha posicionada perpendicularmente à peça. Os testes iniciais foram com argônio puro, sendo ele o gás industrialmente mais acessível e utilizado na solda TIG. Posteriormente passou-se para o uso de misturas gasosas com adição de Hélio e Hidrogênio. A literatura apresenta que a adição de Hélio aumenta a condutividade térmica do plasma significativamente, proporcionando um incremento da zona fundida do cordão sem a necessidade de aumentar a corrente. A adição de Hidrogênio por sua vez, possui característica similar de aumento da zona fundida e da condutividade térmica, porém há um componente extra que é a energia gerada por reação química de oxi-redução proporcionada pela dissociação e reassociação do hidrogênio molecular em alta temperatura (Chuaiphan and Srijaroenpramong, 2020). Key (1980) já havia mostrado que a adição de 5% de hidrogênio pode obter resultados similares a Hélio puro.

Finalizada a primeira etapa, na sequência passou se para a soldagem com material de adição, inicialmente sendo feita em chapas de 200 mm e posteriormente passando para 600 mm, onde foi avaliado o efeito da inclinação e do pré-aquecimento do backing de cobre.

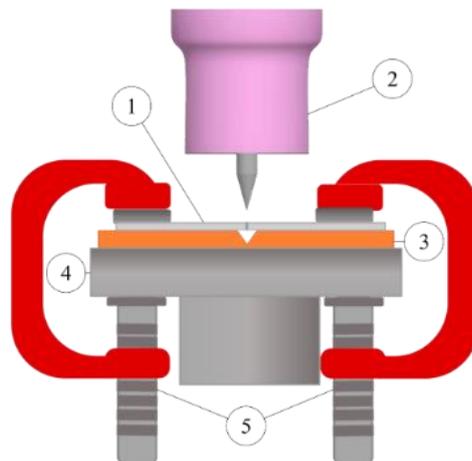


Figura 3. Posicionamento dos componentes: 1) Chapas de espessura 2,65 mm em contato lateral; 2) Tocha Binzel; 3) Backing de cobre; 4) Bancada; 5) Fixações com sargentos e chapas de pequena largura.

Tabela 1. Sequência de ensaios.

1.	TIG autógeno, a) Argônio puro; b) Ar+5% H_2 ; c) Ar+25% He
2.	TIG com alimentação contínua chapa de 200 mm
3.	TIG com alimentação contínua chapa de 600 mm
4.	TIG com alimentação contínua, tocha inclinada
5.	TIG com alimentação contínua, backing aquecido
6.	TIG com alimentação contínua, gás Ar+15% H_2

3. RESULTADOS

3.1. Soldagem Autógena

A primeira etapa com soldagem autógena variando o gás de proteção proporcionou os parâmetros apresentados na Tab. 2, os quais foram obtidos em uma primeira etapa de testes.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem autógena.

Parâmetro	Argônio	5% H_2 -Ar	25% He -Ar
Corrente	375 A	330 A	375 A
Tensão	13,5 V	14,1 V	12,3 V
Potência	5,02 kW	4,73 kW	4,59 kW
Velocidade de soldagem	84 cm/min	84 cm/min	84 cm/min
Energia de soldagem	0,37 kJ/mm	0,35 kJ/mm	0,35 kJ/mm
Truncamento / ° de afiação do eletrodo	1 mm / 35°	1 mm / 35°	1 mm / 35°
Distância Eletrodo Peça (DEP)	3 mm	2 mm	3 mm
Vazão do gás de proteção	12 L/min	12 L/min	12 L/min

Na Tabela 2 ressalta-se que ao se soldar com velocidades elevadas apenas com a mistura de argônio com 5% de hidrogênio foi possível formar raiz, utilizando do backing de cobre para sustentar a parte inferior do corpo de prova. Para os demais parâmetros apresentados, com argônio puro e a mistura de argônio e hélio, teve-se que retirar o backing para conseguir obter certa estabilidade e formação de raiz.

Além disto, embora os parâmetros acima estejam dentro de uma faixa operacional para a espessura de chapa e velocidade de soldagem aqui propostas há a existência de um estreito gap de parâmetros, pois uma variação de corrente, mesmo que pequena, em torno dos valores médios da Tab. 2 faz com que a solda apresente defeitos, oscilando entre penetração total e a falta dela. Esta condição pode ser chamada de metaestável pois a menor perturbação da estabilidade da poça pode perfurar a chapa ou provocar a falta de penetração na raiz.

Durante os testes, os defeitos de soldagem mais recorrentes foram: a formação de furo singular ou a formação de humping- diversos furos intercalados com protuberâncias -, conforme mostrado na Fig. 4 e Fig. 5.

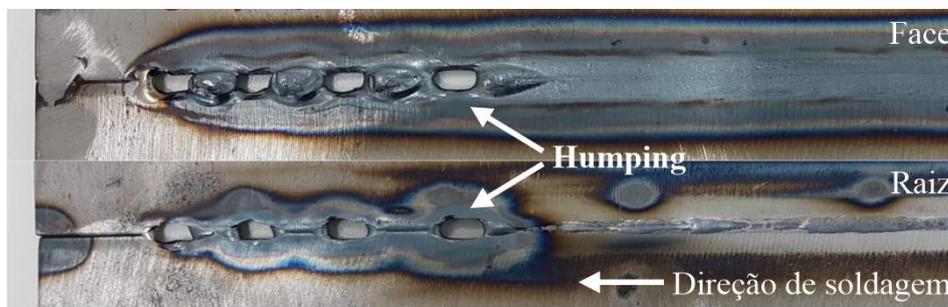


Figura 4. Formação de humping no cordão de solda na parte final do cordão.

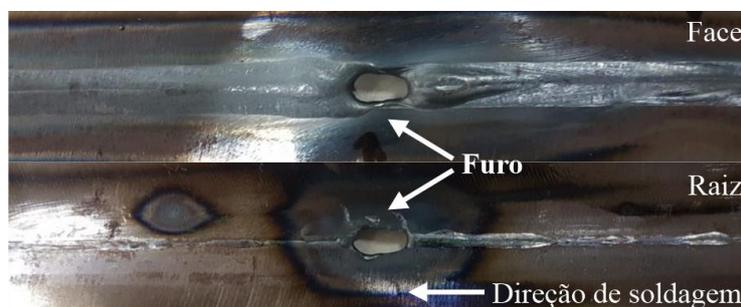


Figura 5. Furo formado aleatoriamente no meio da chapa durante a soldagem.

Meng *et al.* (2017) e Meng and Qin (2018) apontam, por meio experimental e simulação computacional, como funciona o comportamento do humping em soldas com alta velocidade. Os autores atribuem a formação de furos a dois fatores: a tensão de cisalhamento do arco, que atua no sentido paralelo à superfície da poça fundida, e a pressão do mesmo sobre a poça, ambos críticos na formação de humping. Nos níveis de corrente aqui atingidos, acima de 300 A, a pressão do arco é suficientemente alta para que tal problemática ocorra. Desta forma, durante os ensaios com soldagem autógena verificou-se a impossibilidade de se obter uma soldagem isenta de defeitos.

A Figura 6 mostra as macrografias da soldagem com os três diferentes gases de proteção: argônio puro (Ar), 25% He+Ar e 5% H₂+Ar. A utilização de argônio puro resultou na menor área da zona fundida entre os gases, mesmo com a corrente e potência mais elevadas, fato que contribuiu para a formação de mordeduras, conforme Fig. 6a. A aplicação de Ar+25%He aumentou a zona fundida e eliminou as mordeduras, porém a formação de humping e furos ainda foi recorrente, assim como no Ar puro. O processo continuou consideravelmente instável, ao passo que mudanças de cerca de 5 A resultaram em alterações drásticas no cordão, alternando entre penetração insuficiente e formação de humping. Na Tab. 1 verifica-se que a mistura Ar+25%He resultou em menor tensão e potência, sendo uma hipótese levantada de que apenas parte ou nada do He seja ionizada, pois, em uma mistura homogênea, naturalmente a tensão deveria ser maior devido ao seu maior potencial de ionização.

O emprego do gás Ar+5% H₂ além de aumentar a zona fundida, mesmo com uma corrente de soldagem e potência menores que o Ar puro, possibilitou um aumento da repetitividade do processo. Conforme Chuaiphan and Srijaroenpramong (2020), Kang *et al.* (2008) e Durgutlu (2004), a utilização de gases alternativos em união com o argônio, principalmente hélio e hidrogênio, aumentam consideravelmente a temperatura da poça, sendo que tal fato permite o aumento de velocidade do processo de soldagem e a economia de energia, auxiliando no controle de defeitos assim como no aumento de penetração e largura do cordão.

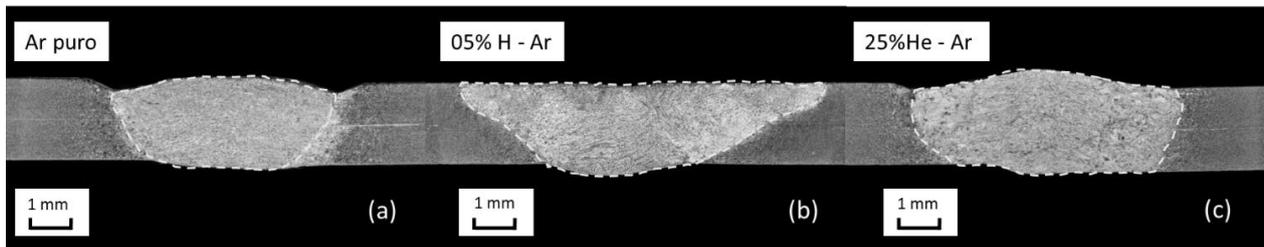


Figura 6. Metalografia de soldagem autógena utilizando: a) argônio puro (Ar); b) Ar+5% H₂; c) Ar+25%He.

3.2. Soldagem com Alimentação

A sequência dos ensaios foi conduzida com adição de arame com o objetivo de eliminar a formação de defeitos pelo aumento do volume fundido. Devido ao melhor desempenho no teste autógeno do gás Ar+5%H₂ este foi preferido para a continuidade dos ensaios. Após uma etapa inicial de parametrização chegou-se a resultados consistentes com os valores apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem com alimentação.

Parâmetro	Magnitude utilizada
Corrente	327 A
Tensão	14,8 V
Potência	4,84 kW
Energia de soldagem	0,45 kJ/mm
Velocidade de soldagem	64 cm/min
Velocidade de arame	1.3 cm/min
Truncamento / ° de afiação do eletrodo	0.8 mm / 35°
Distância Eletrodo Peça (DEP)	2 mm
Vazão de gás	12 L/min
Ângulo da tocha	35°

A velocidade de soldagem atingida de 64 cm/min foi superior à utilizada atualmente na aplicação industrial com arco submerso, sendo este estipulado como um requisito principal dos resultados. Para atingir tal patamar foi necessária a utilização de corrente elevada em uma faixa que se aproxima do modo keyhole. Conforme também mostrou Riffel *et al.* (2019), o keyhole é geralmente atingido com correntes ligeiramente acima de 300 A, na soldagem com junta “U” em que o nariz do chanfro apresentava 2 mm de espessura, muito próximo à espessura das chapas deste trabalho. Portanto, ao operar-se na busca de alta performance, intrinsecamente se estará operando próximo à faixa do keyhole, mantendo a poça em uma condição metaestável, ou seja, na iminência de mudar de melt-in (penetração total da junta sem furo passante no qual a transferência de calor ocorre por condução da face da junta até a raiz) e o keyhole. A proximidade do modo keyhole pode ser caracterizada devido à concavidade que se forma na poça de fusão. Este comportamento pode ser visto na Fig. 7b. Tal mudança de forma pode ser mais intensificada em chapas finas, pois uma mínima variação que o keyhole tenha em termos de penetração proporcionará a perfuração da chapa. Mendez and Eagar (2003) também verificaram comportamento similar, formulando sua hipótese de defeitos em soldas de alta performance baseada na existência de uma fina camada líquida remanescente entre o arco e a raiz da chapa. De acordo com os autores, esta camada pode sofrer uma solidificação prematura, conduzindo à uma contração do volume de material na raiz e a formação do furo ou humping.

A Figura 7 apresenta duas perspectivas da mudança que o comportamento metaestável do processo sofre quando um defeito de furo é formado na soldagem com a tocha perpendicular. Observa-se nos quadros da Fig. 7a e 7d a fase estável do processo, onde a concavidade supracitada encontra-se presente. Ao sofrer o desequilíbrio, a camada de líquido rompe-se nas Fig. 7b e 7c e um furo é formado na peça. A alta velocidade de deslocamento da tocha faz com que a recuperação da poça não ocorra e o furo aumente em comprimento, conforme a Fig. 7f. Neste ponto há também uma atuação da tensão superficial líquido/líquido no sentido de evitar o fechamento do furo. Como o volume de material líquido é maior fora do raio do arco, a tendência é que o material fundido sob este seja puxado pela ação da força exercida pela tensão superficial. A formação de um perfil solidificado com geometria convexa atrás do arco, como na Fig. 7c, válida o fato de que este volume encontra-se majoritariamente no estado líquido e contraiu para seu estado de menor energia.

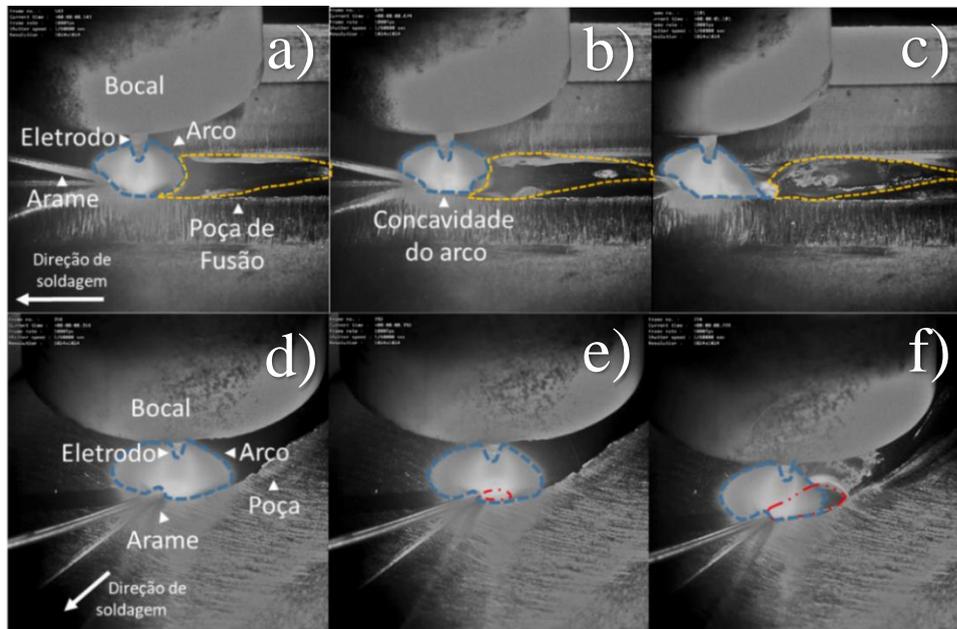


Figura 7. Gravação em alta velocidade de formação de humping em dois ângulos.

A literatura apresenta majoritariamente o keyhole de forma estável e repetitiva em aços inoxidáveis, sendo uma das justificativas a menor condutividade térmica desse material quando comparada aos aços carbono, o que segundo a mesma faz com que o calor fique mais concentrado próximo ao arco (Riffel *et al.*, 2019). Olivares *et al.* (2015) por outro lado apresenta a soldagem de keyhole em chapas de aços carbono, porém com espessura significativamente maior que as deste trabalho. Este é um outro ponto que figura entre os trabalhos da literatura: a técnica keyhole aplicada de forma funcional apenas em chapas de grande espessura. A utilização do backing de cobre também pode contribuir para desestabilizar o keyhole, funcionando como um dissipador de calor devido à sua alta condutividade térmica, além de uma barreira que impede o arco de atuar de forma passante na espessura. Consequentemente, para aumentar a robustez do processo, foram levantadas três hipóteses: 1 - a inclinação da tocha e afiação do eletrodo; 2 - o aquecimento do backing de cobre; 3 - o aumento do teor de Hidrogênio do gás de proteção.

Conforme verificou-se na análise do humping, nas videografias com a tocha em posição perpendicular, a alta velocidade de soldagem evita que haja uma recuperação da estabilidade a partir do ponto em que o furo ocorre na peça. Do trabalho de Meng *et al.* (2017), os fatores críticos na formação de humping são a pressão do arco e a tensão cisalhante gerada pelo mesmo. A Figura 8 mostra uma comparação da soldagem com tocha perpendicular versus 35°, na qual, utilizando uma análise matemática de ambas as condições, tanto a pressão quanto a tensão cisalhante do arco possuem suas componentes vetoriais na ação sobre a poça, tal que a tensão cisalhante atua tangencialmente à superfície da poça e a pressão do arco de forma normal à poça. Portanto, a variação da inclinação da tocha pode mitigar os efeitos de humping, alterando a magnitude das componentes tangencial e normal de cada efeito e sua influência sobre a poça de fusão, visto que o arco também se inclina, conforme a Fig. 8a.

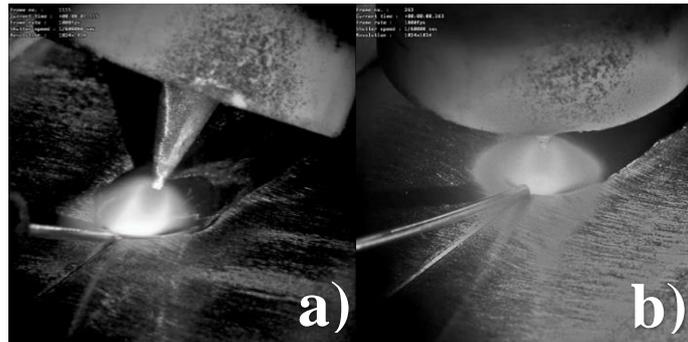


Figura 8. Comparação entre tocha inclinada e tocha perpendicular.

Na prática os resultados dos ensaios com tal modificação foram notavelmente melhorados em comparação a configuração inicial com a tocha em 90° . As Figuras 9 e 10 mostram que a qualidade dos cordões foi aprimorada. Juntamente com maior qualidade superficial do cordão, a inclinação da tocha se mostrou efetiva na formação de raiz homogênea em uma porcentagem alta e satisfatória dos corpos de prova.

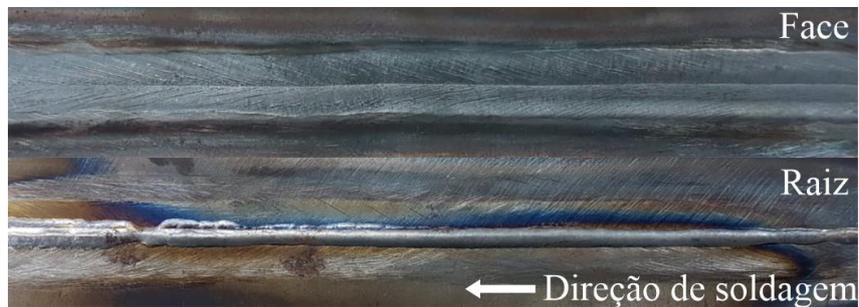


Figura 9. Soldagem com tocha inclinada 35°



Figura 10. Macrografia de soldagem com tocha inclinada em 35° .

A Figura 11 mostra uma sequência de frames da soldagem com a tocha inclinada. No primeiro quadro verifica-se que o arame, em contato com a poça, acaba mantendo-a puxada para frente devido à tensão superficial. Também é possível que um efeito da própria inclinação empurre o metal fundido e a poça seja mantida à frente do arco, eliminando os defeitos de humping. Devido à baixa velocidade de arame utilizada, ocorreram pequenas oscilações na transferência metálica, conforme a Fig. 11b, na qual há a formação de uma pequena gota na ponta do arame. Mesmo assim, o cordão de solda se manteve homogêneo.

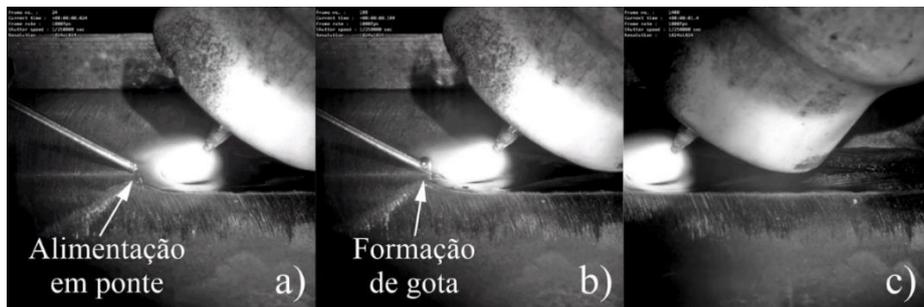


Figura 11. Filmagem em alta velocidade de soldagem com tocha inclinada 35° .

É importante ressaltar a influência que possui o posicionamento correto do arame no resultado da soldagem. Este está diretamente ligado ao comportamento da transferência metálica. O dispositivo conectado à tocha durante os ensaios

(direcionador de arame) mostrado anteriormente na Fig. 1 visa posicionar e guiar o mesmo até a poça. Na Figura 11a observa-se que a ponta do arame toca o corpo de prova imediatamente antes de tocar a poça de fusão, de forma que a fusão do material de adição se dará de forma suave. Tal posição é vantajosa para o processo, pois a tentativa de incidir o arame no centro da poça gera sua fusão prematura devido à passagem pelo arco, aumentando a formação de gotas.

Um segundo método foi também aplicado para evitar a formação de defeitos. Durante o pré-aquecimento do backing a temperatura foi monitorada por termopares de contato e termografia até que o mesmo alcançasse a temperatura de 150°C. Nos ensaios observou-se que houveram mudanças significativas nos resultados das soldas, diminuindo consideravelmente a formação de humping e aumentando notavelmente a robustez. A Figura 12 mostra a face e a raiz do cordão sem a presença de mordeduras e com a formação de penetração total. A seção transversal da solda está mostrada na Fig. 13 na qual se verifica baixo reforço do cordão; requisito de norma para a soldagem de vasos de pressão.

A termografia possibilitou também acompanhar a evolução da temperatura durante a soldagem com backing sem pré-aquecer como a Fig. 14a, e com backing pré-aquecido na Fig. 14b. Em uma comparação entre as imagens verifica-se uma nítida diferença na temperatura atingida pelo backing ao fim da soldagem, sendo a condição sem pré aquecimento mais fria. O calor adicional proporcionado pelo pré-aquecimento do backing pode auxiliar em reduzir o efeito de solidificação da película líquida na raiz, apontado por Mendez and Eagar (2003), evitando a formação de humping ou furo. A diferença média de temperatura foi de 110 °C do backing ao fim da soldagem, sendo o pre-aquecido mais homogêneo do início ao fim do processo.

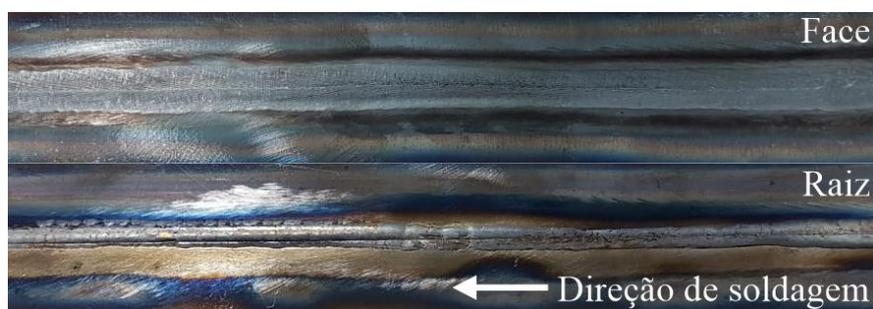


Figura 12. Soldagem com backing aquecido 150°C visto frente e verso, respectivamente.



Figura 13. Macrografia de soldagem com backing aquecido.

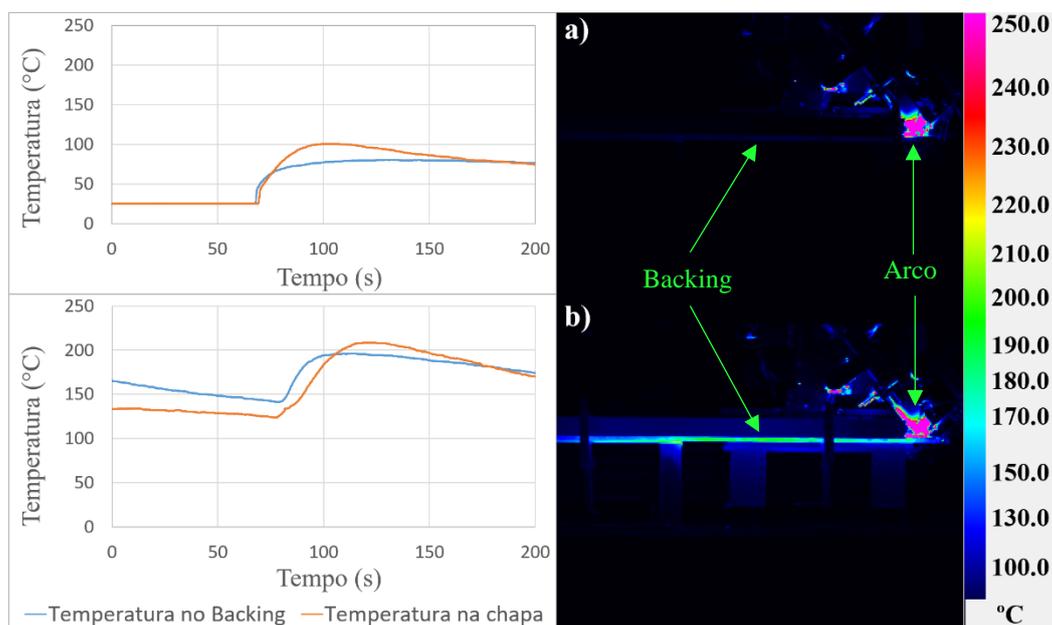


Figura 14. Análise de soldagem com backing aquecido com câmera térmica.

Como os defeitos na soldagem de alta performance estão ligados à formação de furos ou humping devido à alta pressão do arco na poça, a redução da corrente também é uma alternativa de modo que o comportamento do processo se distancie do modo keyhole e esteja mais para o melt-in. A introdução de mais hidrogênio é, portanto, uma alternativa para que calor seja gerado pelas reações químicas na poça e fique menos dependente da corrente, possibilitando a sua redução. A soldagem utilizando o gás com 15% de hidrogênio mostrou ótimos resultados nos ensaios possibilitando a redução da corrente de 330 A para 290 A, fato que acarretou na diminuição da concavidade na poça durante a soldagem. O cordão de solda com 15% de hidrogênio pode ser visto na Fig. 15 o qual apresentou penetração total, porém com a presença de um estreitamento da raiz em determinados pontos. A macrografia do ensaio é apresentada na Fig. 16 na qual pode ser vista maior e mais consistente penetração em comparação com soldagem com backing aquecido, por exemplo.

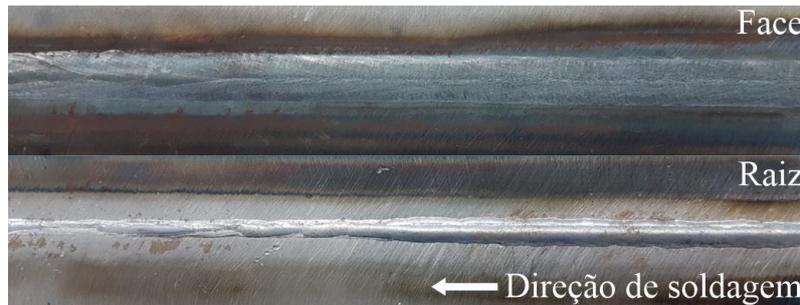


Figura 15. Soldagem com 15% de hidrogênio + argônio.

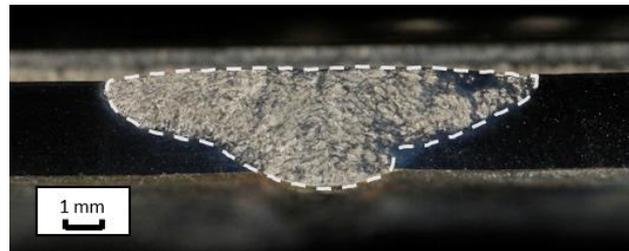


Figura 16. Macrografia de soldagem com 15% de hidrogênio + argônio

4. CONCLUSÃO

O processo de soldagem TIG apresentou bom potencial para substituir o arco submerso na soldagem de chapas finas aplicadas em vasos de pressão. Como principais pontos deste trabalho destacam-se:

1. A soldagem com um processo mais barato que o atualmente empregado (arco submerso), eliminando o uso de fluxo e atingindo velocidade superior ao mesmo;
2. Embora o TIG possa ser utilizado de forma autógena, esta configuração não se mostrou eficiente devido à formação de defeitos como mordeduras e menor robustez dos parâmetros;
3. Os defeitos mais comuns presentes na soldagem de alta performance são o aparecimento de furo singular e o humping, ambos formados por mecanismos que envolvem a alta corrente, com elevada pressão do arco, juntamente com a velocidade de deslocamento da tocha que impede a recuperação da poça de fusão frente a distúrbios;
4. O emprego de material de adição melhorou a robustez do processo, porém outros fatores podem ser utilizados para que facilitem e auxiliem a soldagem TIG com alta velocidade, como por exemplo: o emprego de aquecimento do backing de cobre; a inclinação da tocha com ângulo de ataque empurrando a poça; e o emprego de misturas gasosas com a adição de hidrogênio;
5. Conforme mostrado em videografia em alta velocidade, a inclinação da tocha reduziu a formação de furos pois a poça é empurrada para frente. A inclinação também faz com que a força do arco plasma atue inclinada, e a espessura efetiva que resiste à penetração seja maior, reduzindo a formação de furos;
6. A utilização de backing aquecido em 150 °C faz com que a temperatura do início até o fim da soldagem seja mais homogênea, e a parametrização tenha comportamento similar. Além disso, há o auxílio de um adicional de calor que facilita o melt-in, ou seja, a penetração sem formar o furo de keyhole;
7. Outra possibilidade que traz resultados similares, resolvendo problemas de perda de formação de raiz ao longo do comprimento do cordão é a mudança do gás de proteção, neste caso de argônio + 5% de hidrogênio para argônio com 15% hidrogênio. O aumento da zona fundida causado pelo maior teor de hidrogênio deixou-a menos propícia a solidificação prematura e manteve o cordão de solda homogêneo e com boa formação de raiz.

5. REFERÊNCIAS

Chuaiphan, W. and Srijaroenpramong, L., 2020. "Effect of hydrogen in argon shielding gas for welding stainless steel grade SUS 201 by GTA welding process". *Journal of advanced joining processes* 1 (2020) 100016.

- Delgado, L. C., 2000. “Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Durgutlu, A., 2004. “Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel”. *Materials and Design* 25 (2004) 19-23.
- Dutra, J.C., Silva, R.H.G., Riffel, K.C. and Marques, C., 2020. “High-performance GMAW process for deep penetration applications”. *Welding in the World* (2020) 64:999–1009.
- Guo, Y., Gao, J., Cao, Y. and Li, C., 2019. “Behavior of the Fusion Hole in Tungsten Inert Gas Thin-Plate Welding”. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, No. 3, Julho 2019.
- Jarvis, B.L., 2001. “Keyhole gas tungsten arc welding: a new process variant”. Doctor of Philosophy thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2001.
- Kang, B.Y., Prasad, Y.K.D.V., Kang, M.J., Kim, H.J. and Kim, I.S., 2009. “The effect of alternate supply of shielding gases in austenite stainless steel GTA welding”. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 4722-4727.
- KEY, J.F., 1980. “Anode/Cathode Geometry and Shielding Gas Interrelationships in GTAW”. *Welding Journal*, pp 364-s - 370-s.
- Mendez, P.F. and Eagar, T.W., 2003. “Penetration and Defect Formation in High-Current Arc Welding”. *Welding Journal*, pp 296-S – 306-S.
- Meng, X. and Qin, G., 2018. “A theoretical study of molten pool behavior and humping formation in full penetration high-speed gas tungsten arc welding”. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 132 (2019) 143-153.
- Meng, X., Qin, G. and Zou, Z., 2017. “Characterization of molten pool behavior and humping formation tendency in high-speed gas tungsten arc welding”. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 117 (2018) 508-516.
- Olivares, E.A.G., Silva, R.H.G. and Dutra, J.C., 2015. “Estudo da Técnica TIG Keyhole por Meio de Análise Comparativo entre Duas Tochas de Alta Produtividade na União de Chapas de Aço Carbono de Meia Espessura”. *Soldagem & Inspeção*, v. 20, p. 262-274, 2015.
- Riffel, K.C., Silva, R.H.G., Dalpiaz, G., Marques, C. and Schwedersky, M.B., 2019. “Keyhole GTAW with Dynamic Wire Feeding Applied to Orbital Welding of 304L SS Pipes”. *Soldagem & Inspeção*. 2019;24:e2418.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

HIGH PERFORMANCE TIG WELDING IN THIN PLATES APLIED IN COMPRESSORS CONSTRUCTION

João Francisco Wiggers, joao.francisco.wiggers@grad.ufsc.br¹
Isabel Braga Ferreira Mattos, isabel.b.f.mattos@posgrad.ufsc.br¹
Kaue Riffel, kaue.riffel@posgrad.ufsc.br¹
Regis Henrique Gonçalves Silva, regis.silva@ufsc.br¹

¹Federal University Santa Catarina – UFSC, Mechanical Engineering Department, Welding Laboratory – LABSOLDA, Florianópolis, SC, Brazil.

Abstract. The use of pressure vessels is extremely wide in the industrial scenario for the storage of gases and liquids. An example of this is the vast use of compressors, cooking gas cylinders, fire extinguishers, among others. However, the development and construction of these containers are of great complexity, as it is desired that they have thin walls in their structure while maintaining the necessary strength to perform their functions under pressure. Regarding welding, this characteristic of thin walls causes difficulties in its production, commonly done with the submerged arc process. A process that is known to be expensive and complex due to the need for abundant use of granulated flux to protect the weld pool. The vast majority of this flow cannot be reused, as it undergoes fusion of its particles when in contact with the puddle. Being the high acceptance of the submerged arc in the industry due to its robustness and low rate of defects. Knowing this, in the field of welding, other alternatives are being sought that produce welds of equal quality and robustness at a much lower cost. With this objective in mind, this work carried out a study on the applicability of the TIG process in the welding of thin carbon steel sheets for the production of compressors. Parameterization tests were carried out in which the different factors that influence the quality of the weld were studied. The welds were carried out on 2.65 mm thick ASTM 1020 sheets. During the tests, the parameters of current, torch angle, distance between electrode and workpiece (DEP) were varied, obtaining an optimal operating point that produces welds with a speed higher than the submerged arc and without the presence of defects. Finally, for a more detailed analysis of the process, acquisitions of electrical signals, thermography images and high-speed filming were performed.

Keywords: Pressure vessels, thin walls, TIG, carbon steel