

Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos

(High Productivity TIG Welding: Influence of Shielding Gases on the Limit Speed for Defect Formation)

Mateus Barancelli Schwedersky¹; Jair Carlos Dutra²; Marcelo Pompermaier Okuyama³; Régis Henrique Gonçalves e Silva⁴
^{1,2,4}Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Soldagem, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

³Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

¹baranceli@labsolda.ufsc.br; ²jdutra@labsolda.ufsc.br; ³marcelo@labsolda.ufsc.br; ⁴regis@labsolda.ufsc.br

Resumo

O processo TIG, em configurações tradicionais, apresenta problemas quando utilizado de maneira autógena com elevadas corrente e velocidade de soldagem. Nessa condição, normalmente ocorrem defeitos no cordão, principalmente descontinuidades denominadas humping. Em estudo realizado no LABSOLDA, foram obtidas soldas de excelente qualidade com o processo TIG atingindo velocidades de 1,5 m/min. Este procedimento, utilizando na proteção misturas argônio-hidrogênio, possibilitou velocidade semelhante ao processo MIG/MAG convencional, com a vantagem de ser realizada sem material de adição. O presente trabalho tem o objetivo de fornecer subsídios para uma nova análise da formação dos defeitos na soldagem TIG de elevada produtividade, já que a teoria baseada na pressão do arco não contempla totalmente o que tem sido observado na prática. Foram realizados ensaios com diferentes correntes utilizando argônio, hélio e misturas argônio-hidrogênio no gás de proteção. Os resultados mostram que para a mesma corrente média, à medida que o teor de H₂ foi aumentado, ocorreram também gradativos aumentos da área fundida e eficiência de fusão. Foi possível mostrar indícios de que o mecanismo de formação de defeitos não depende somente da pressão do arco, mas sim do balanço entre pressão do arco e quantidade de metal fundido, que é dependente da eficiência de fusão proporcionada pelo gás utilizado.

Palavras-chave: Soldagem de elevada velocidade, GTAW, Humping, descontinuidades, Hidrogênio.

Abstract: Under usual configurations, the TIG process presents problems when used autogenously with high current and welding speed. In this condition defects in the weld bead usually occur, especially discontinuities called humping. In a study conducted at LABSOLDA, welds with excellent quality were obtained using the TIG process reaching speeds of 1.5 m/min. Under argon-hydrogen shielding gas mixtures welding speed similar to the conventional MIG/MAG process was allowed, with the advantage of being performed without filler material. The objective of this paper is to provide support for a new analysis of the defects formation in high productivity TIG welding, since the theory based on the arc pressure does not fully contemplate what has been being observed in practice. In this work, tests were performed with different current levels using argon, helium and argon-hydrogen mixtures as shielding gas. The results show that, for the same average current, as the H₂ content was increased, there were also gradual increases of melted area and melting efficiency. It was possible to show evidences that the mechanism of defects formation depends not only on the arc pressure, but on the balance between arc pressure and the quantity of molten metal, which depend on the melting efficiency provided by the used gas.

Key-words: High speed welding, GTAW, Humping, discontinuities, Hydrogen.

1. Introdução

Ao longo das últimas décadas, as indústrias têm buscado incessantemente maneiras de oferecerem produtos de melhor qualidade pelo menor valor para se manterem competitivas no mercado mundial. Em diversos casos, os processos de soldagem representam boa parte dos custos de fabricação de um produto, e isso justifica os constantes esforços para se obter melhorias

nesta área.

Devido à maciça mecanização e robotização dos processos de fabricação industriais, é cada vez maior a busca por processos que possibilitem suas aplicações em elevadas velocidades de soldagem. Além disso, existe a tendência geral de redução na utilização das matérias primas, sendo que cada vez mais se buscam processos de soldagem que reduzam ou eliminem a necessidade de adição de material.

Neste cenário de processos de elevada produtividade, o TIG autógeno está aquém de suas possibilidades de utilização, e é considerado um processo de soldagem de baixa velocidade. Porém, acredita-se que o desenvolvimento de técnicas específicas pode viabilizar sua utilização em situações com

(Recebido em 27/08/2010; Texto final em 03/12/2011).
Artigo originalmente publicado no CONSOLDA 2010

elevada velocidade de soldagem, tornando-o competitivo em termos de velocidade e ainda podendo apresentar menores custos em comparação com processos considerados de maior produtividade que utilizam material de adição.

2. Antecedentes e Fundamentação Teórica

2.1. Introdução aos problemas no processo TIG

O processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) é considerado tradicionalmente um processo aplicado com baixa velocidade de soldagem, e também por isso, classificado popularmente como um processo de baixa produtividade. Essa classificação ocorre também devido aos problemas encontrados quando se busca utilizar o processo TIG de forma autógena com velocidade de soldagem elevada, pois, dessa forma, é necessário que a corrente de soldagem também seja elevada para manter o cordão com tamanho satisfatório.

O processo TIG se apresenta prontamente aplicável, proporcionando arco com boa estabilidade e sem ocorrência de problemas em uma faixa inicial de intensidade de correntes que na prática vai até cerca de 250 A. Dentro dessa faixa de correntes, que por sinal é onde está situada a maior parte das aplicações do processo dentro das indústrias, é possível aumentar a velocidade de soldagem de maneira quase proporcional ao aumento da corrente de soldagem. Quando se busca velocidades de soldagem mais elevadas, na ordem de 1 m/min, torna-se necessário o aumento da corrente de soldagem, porém, o comportamento da poça de fusão muda, e o resultado na maioria das vezes é um cordão descontínuo. Essa descontinuidade, comumente é composta de regiões de crateras, e regiões de protuberâncias, de maneira alternada, com morfologia semelhante ao mostrado na Figura 1. Esse tipo de falta de continuidade do cordão de solda que ocorre quando se utilizam correntes e velocidades de soldagem elevadas, é denominado “*humping*” nos trabalhos publicados internacionalmente [1-6].

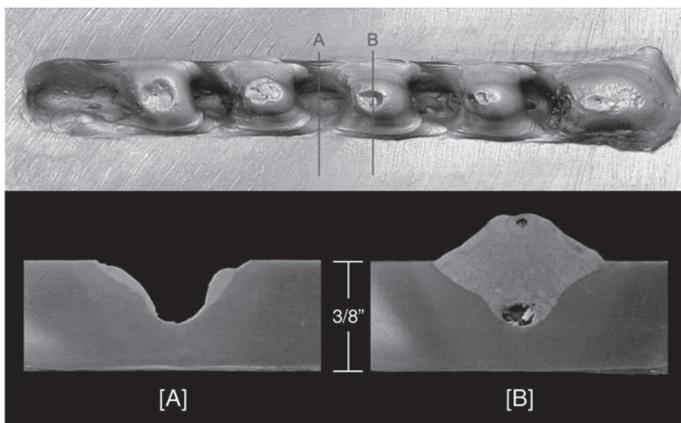


Figura 1. Cordão sobre chapa realizado com o processo TIG. A e B são seções transversais dos locais indicados na figura do cordão. Chapa de aço 3/8” de espessura.

2.2. Mecanismo de formação de defeitos

A explicação que segue sobre a formação dos defeitos na soldagem de elevada produtividade foi baseada nos trabalhos [1-3]. Assim, em síntese, a poça de fusão da soldagem TIG em elevadas correntes adquire uma configuração semelhante à da Figura 2. Ao invés de formar uma poça metálica líquida sob o arco, como ocorre na soldagem TIG em baixas correntes, conforme a corrente de soldagem é aumentada a pressão do arco também aumenta, e com elevadas correntes a pressão do arco se torna suficientemente grande para empurrar o metal líquido para região posterior da poça de fusão, formando uma cratera sob o arco.

Segundo Mendez [1], o que irá determinar o aparecimento da cratera com posterior surgimento do *humping* conforme mostrado na Figura 2, será o resultado de um complexo balanço entre as forças que agem sobre a poça de fusão, sendo as consideradas mais importantes: Pressão do arco (Pa): Pressão produzida pela ação do plasma contra a superfície da poça metálica; Pressão hidrostática: (Ph): Originada devido à coluna de metal líquido; Forças capilares (Pc): Devido ao ângulo de curvatura do metal líquido. De acordo com a combinação entre os parâmetros de soldagem, principalmente corrente de soldagem e velocidade de deslocamento da tocha, irão existir diferentes condições. Para situações de correntes mais baixas, existe a tendência de que as forças Ph e Pc sejam maiores do que Pa, e não ocorra o aparecimento da cratera. À medida que a corrente vai aumentando, Pa começa a se tornar maior do que as outras forças, e começa a existir a formação de cratera.

A interface entre o fundo da cratera e a poça de metal líquido é chamada ponto de transição. Com o aumento da velocidade de soldagem, toda a poça de fusão tende a ter uma maior extensão, afastando o ponto de transição e o centro do arco. O *humping* irá ocorrer quando a combinação de parâmetros colocarem a região de transição em uma posição onde o calor do arco não é mais suficiente para manter o metal líquido.

2.3. Influência dos parâmetros de soldagem no aparecimento dos defeitos

A velocidade limite para o aparecimento de defeitos diminui drasticamente com o aumento da corrente de soldagem. A Figura 3 (esquerda) mostra os resultados experimentais de Savage, *et al* [4], onde se observa a forte queda da velocidade limite para formação dos defeitos em função do aumento da corrente na soldagem TIG. Nota-se ainda, que a velocidade limite para o hélio seria cerca de três vezes superior em comparação com o argônio para a mesma corrente média. Pode-se destacar também que segundo os resultados de Savage, *et al* [4], a velocidade limite para formação dos defeitos no processo TIG diminui com o aumento da distância eletrodo-peça.

Os resultados de Savage, *et al* [4] serviram de referência para outros trabalhos que foram encontrados [1-3, 5-6] sobre a problemática da soldagem TIG de elevada produtividade. Os trabalhos [1-3, 6] compartilham da mesma explicação mostrada no item 2.2., onde a pressão do arco tem papel fundamental. Em [6] os autores mostram o gráfico da diferença de pressão dos arcos com argônio e com hélio, o qual está mostrado na Figura 3 (direita). Pode-se ver que a intensidade da pressão no centro

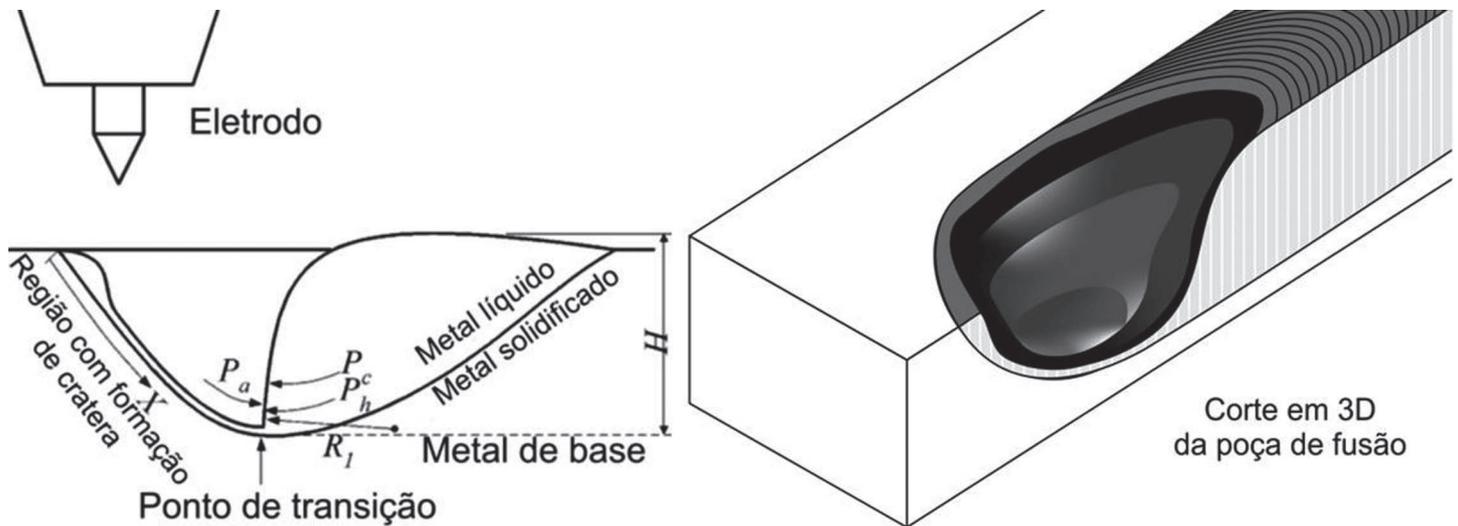


Figura 2. Representação da poça de fusão do processo TIG em elevadas correntes (adaptado de [1]).

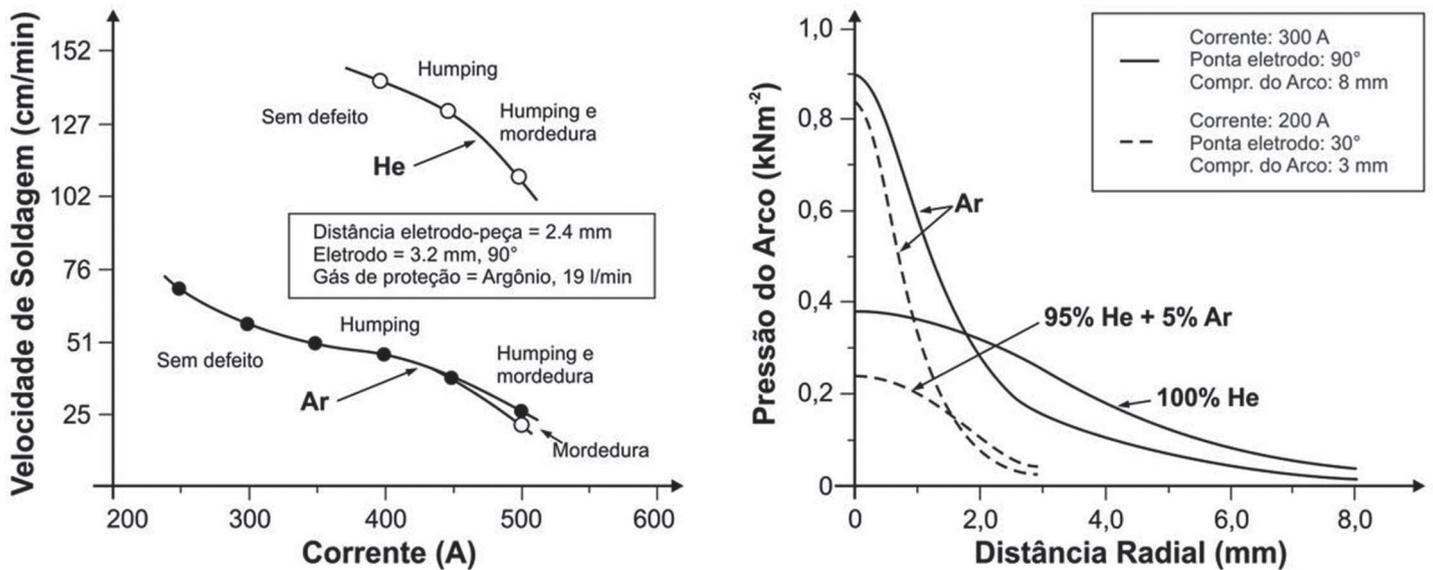


Figura 3. Efeito do gás de proteção na velocidade limite para aparecimento de defeitos na soldagem TIG (esquerda) [4]. Efeito do gás de proteção na distribuição de pressão do arco durante a soldagem TIG (direita) [6].

do arco para o caso do Ar é muito maior em comparação com o He, sendo que essa distribuição de pressão mais aberta no caso do hélio é atribuída à sua menor densidade e maior viscosidade em elevadas temperaturas. Dessa forma, os autores em [5-6] afirmam que essa menor pressão efetiva para o caso do He é o motivo para a grande diferença na velocidade limite para o aparecimento de defeitos entre He e Ar.

2.5. Aplicação do hidrogênio na soldagem TIG

A aplicação do hidrogênio ou de misturas gasosas que contenham frações de hidrogênio nos processos de soldagem a arco tem sido bastante restrita. A história da soldagem a arco mostra que o hidrogênio é um elemento que facilmente promove a formação de defeitos de soldagem como trincas e poros, especialmente no caso da soldagem dos aços. A formação de

trincas induzidas por hidrogênio, certamente é o defeito mais famoso relacionado à presença de hidrogênio na soldagem a arco. De maneira geral, os trabalhos encontrados sobre o assunto concordam que as trincas de hidrogênio ocorrem quando quatro situações ocorrem simultaneamente: hidrogênio presente no metal de solda, microestrutura susceptível (dura e frágil), elevadas tensões na região soldada, e temperaturas relativamente baixas (menores que 200°C). Segundo Hooijmans [7], a formação de porosidade devido ao hidrogênio ocorre primeiramente devido à elevada quantidade de H₂ presente durante a soldagem, e também depende: da microestrutura do material, sendo que o H₂ possui maior solubilidade nos metais CFC do que nos CCC; da presença de impurezas e elementos de liga, os quais formam sítios de nucleação e aprisionamento de H₂; e também das condições de soldagem, em particular a taxa de solidificação. De fato, é esperado que um aumento na taxa de solidificação (como

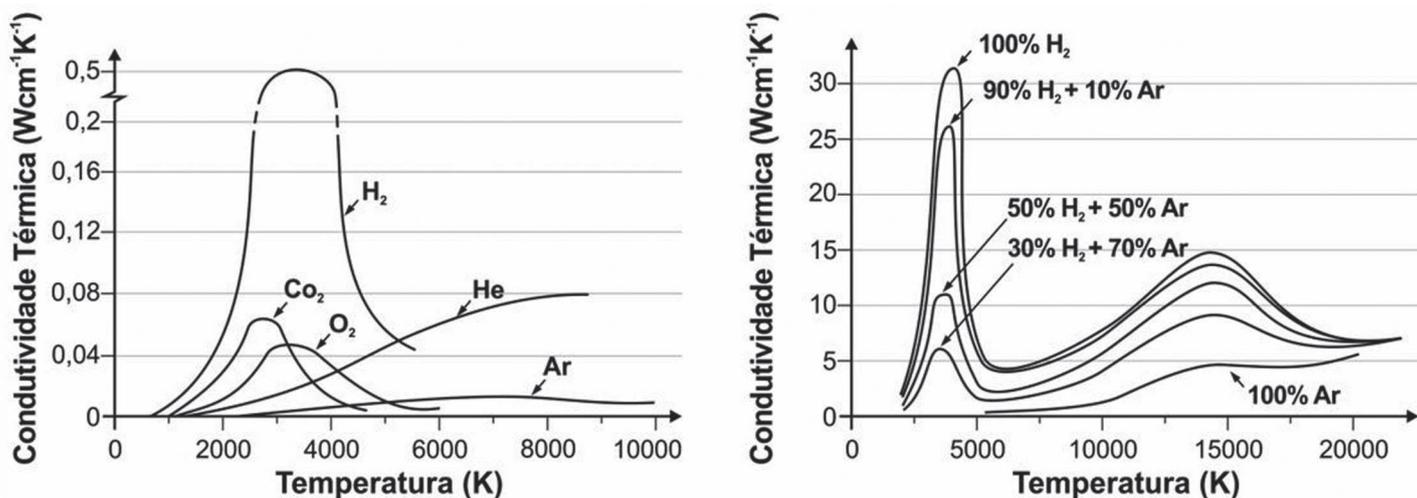


Figura 4. Condutividade dos gases em função da temperatura (esquerda) [8]. Condutividade térmica de algumas misturas argônio hidrogênio em função da temperatura (direita) [7].

um aumento na velocidade de soldagem para a mesma corrente média, por exemplo) irá facilitar o aprisionamento e a formação dos poros no cordão solidificado.

2.6. Propriedades físicas de misturas com hidrogênio

As propriedades físicas do gás influenciam decisivamente nas características do arco elétrico. Um importante parâmetro do gás é a energia de ionização. O valor da energia de ionização encontrado em [7] para o He é 24,6 eV, consideravelmente maior do que o valor do Ar com 15,7 eV. Já o hidrogênio possui energia de ionização de 13,6 eV bem próxima ao valor do Ar.

A Figura 4 mostra dois exemplos de gráficos da condutividade térmica em função da temperatura para diferentes gases. No gráfico da esquerda pode-se ver os valores para os principais gases utilizados nos processos de soldagem à arco. É possível destacar a maior condutividade térmica do He em comparação com o Ar, e também o elevado pico de condutividade térmica para o H₂ na faixa compreendida entre 3000 e 4500 K. O gráfico da direita mostra a condutividade térmica total em função da temperatura para algumas misturas Ar-H₂. É possível notar que a condutividade térmica do hidrogênio é bastante elevada em comparação com a do argônio e possui um pico proeminente (devido à dissociação) em aproximadamente 4000 K e um pico menos pronunciado (devido à ionização) em aproximadamente 14000 K.[7]

2.7. Influência da adição de hidrogênio no gás de proteção do arco

A adição de percentuais de hidrogênio ao argônio no gás de proteção do processo TIG causa aumento da tensão do arco e aumento na quantidade de material fundido para mesma corrente média [7-8]. A Figura 5 mostra: a variação da tensão do arco em diferentes correntes para o Ar puro e misturas Ar-H₂ (esquerda) e o resultado da medição da área fundida na seção transversal para diferentes teores de H₂ no gás de proteção (direita). As

diferenças na tensão do arco devido a mudanças na composição do gás de proteção podem ser atribuídas a diferenças no potencial de ionização primário do gás. Entretanto, conforme foi citado anteriormente, não existe diferenças significativas entre o potencial de ionização primário do argônio e o hidrogênio. Segundo Hooijmans [7], a diferença que é observada na tensão do arco entre o caso com Ar puro e com misturas Ar-H₂ ocorre devido à grande diferença da condução térmica dos gases de proteção, sendo que mais energia é dispensada por unidade de tempo no caso do arco de Ar-H₂ do que no caso do arco de Ar puro, mais energia é requerida para manter uma determinada corrente. O mesmo autor sugere que para compensar essa maior perda de energia, aparentemente, seria necessário um maior campo elétrico, resultando em aumento da tensão do arco.

A adição de hidrogênio ao argônio do gás de proteção no processo TIG também causa o aumento da eficiência de fusão do arco para a mesma corrente média em comparação ao Ar puro. Segundo Hooijmans [7], o aumento observado na eficiência de fusão é consequência direta da contração da coluna do arco, e do aumento da condutividade térmica do gás de proteção com a adição de hidrogênio.

3. Objetivos e justificativas

A motivação para realizar o presente estudo surgiu durante um trabalho realizado no LABSOLDA – UFSC, o qual visava o desenvolvimento de uma solução para aplicação industrial. O trabalho consistiu na soldagem de uma junta sobreposta de aço carbono de 3 mm de espessura. Tradicionalmente, essa junta é soldada utilizando o processo MIG/MAG convencional com velocidade de soldagem de aproximadamente 1,2 m/min. O desafio era realizar essa soldagem utilizando o processo TIG de maneira autôgena (sem utilizar material de adição), para obter uma junta com qualidade e velocidade equivalente ao que estava sendo obtido com o processo MIG/MAG.

Com base em combinações de parâmetros específicos: ângulo de ataque da tocha de soldagem; posição do eletrodo em

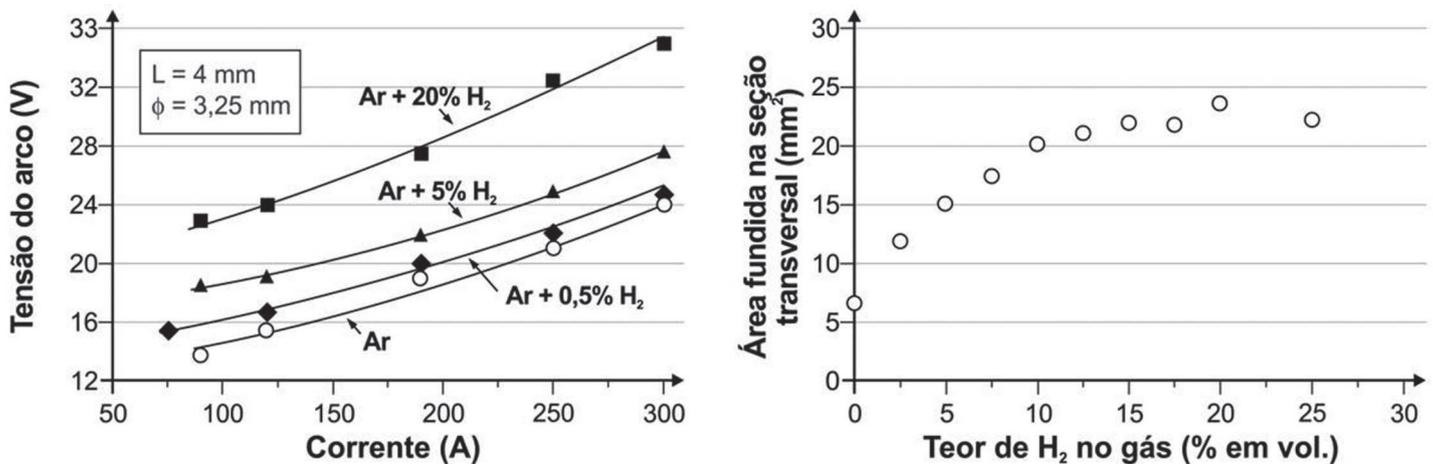


Figura 5. Característica estática na soldagem TIG com diferentes gases de proteção (Distância eletrodo-peça = 4 mm, eletrodo negativo) (esquerda) [8]. Área da seção transversal no ferro puro em função da percentagem de hidrogênio no gás de proteção (I:100 A, DEP 3 mm, Vs: 3 mm/s) (direita) [7].

relação à junta; distância eletrodo-peça; afiação do eletrodo e principalmente gás de proteção, foi possível obter a soldagem da junta com boa qualidade com velocidade de até 1,5 m/min. A Figura 6 mostra o aspecto superficial e a seção transversal do cordão de solda obtido. O uso de misturas Ar-H₂ com teor de 15% de hidrogênio foi o fator chave que possibilitou obtenção da velocidade de soldagem elevada sem o aparecimento de *humping*.

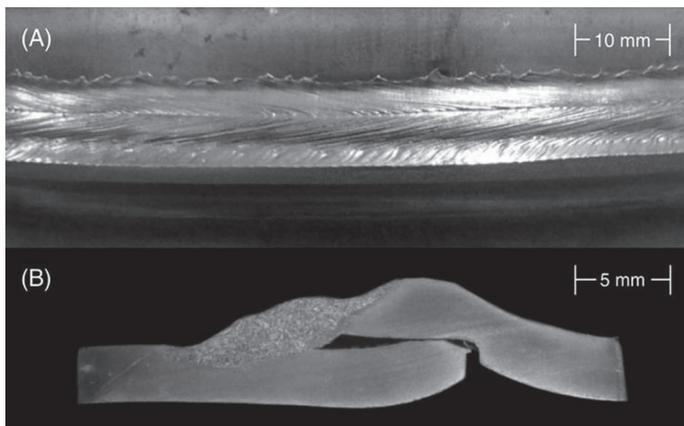


Figura 6. Cordão soldado com processo TIG sem material de adição: aspecto superficial (A). Seção transversal (B). Junta sobreposta, aço carbono 3 mm espessura. Velocidade de soldagem: 1,5 m/min.

Não foram encontrados trabalhos que discutam a soldagem de elevada velocidade para o caso de misturas Ar-H₂. Conforme foi mostrado anteriormente, as teorias que tratam dos defeitos da soldagem de elevada produtividade têm como base a pressão do arco como fator chave para formação dos defeitos, e foram construídas com base em comparações de soldagens realizadas com hélio puro e argônio puro somente. De acordo com essas teorias, a menor pressão do arco no caso do He seria o motivo para a maior velocidade em comparação com o Ar. Porém, para o presente exemplo prático, onde o uso de misturas Ar-H₂ resultou em velocidade de soldagem muito superior ao Ar

puro, a diferença de velocidade não pode ser explicada por uma suposta diferença de pressão do arco, já que não existem indícios que a pressão do arco poderia sofrer alguma diminuição devido à adição de uma pequena fração de H₂ ao Ar.

Diante dessa falta de informação da literatura corrente sobre o aparecimento de defeitos na soldagem TIG de elevada velocidade utilizando misturas Ar-H₂, decidiu-se realizar o presente trabalho científico cujo principal objetivo consiste em tentar fornecer novas informações e proporcionar subsídios para uma melhor compreensão dos fenômenos associados ao aparecimento de defeitos na soldagem TIG. Para que fosse possível essa comparação do comportamento do arco nas diferentes situações, foram realizadas soldagens utilizando Ar puro, He puro e misturas Ar-H₂.

4. Equipamentos, Materiais e Metodologia

Os ensaios de soldagem consistiram em realizar cordões sobre chapas. A fonte de soldagem utilizada foi a "IMC Digitec 800", fonte multi-processo micro-processada, transistorizada, chaveada no secundário, com 16 kVA de potência e capacidade de corrente de até 800 A. Em todas as soldagens foi utilizada uma tocha TIG comercial refrigerada à água com capacidade nominal de 500 A. Os ensaios foram realizados com eletrodos de tungstênio EWTh-2 de 3,2 mm de diâmetro e afiação com ângulo de aproximadamente 90°. Todas as soldagens foram realizadas com distância eletrodo-peça de 3,0 mm e tocha de soldagem posicionada com o eletrodo perpendicular à superfície da peça. As vazões de gás foram reguladas com aproximadamente 15 l/min medidos na ponta da tocha de soldagem com um fluxômetro. As soldagens foram realizadas em chapas de aço carbono comum com dimensões 200 mm x 73 mm x 9,5 mm.

A movimentação da tocha de soldagem foi realizada utilizando um robô de soldagem de seis eixos, e a velocidade utilizada nos ensaios foi 5 mm/s em todos os casos. As correntes testadas foram 200 A, 300 A e 400 A. Os gases testados foram argônio puro, hélio puro, e misturas Ar-H₂ com 5, 10 e 15% em volume molar de hidrogênio. Os gases puros foram de padrão

comercial. Os cilindros das misturas Ar-H₂ foram encomendados como misturas para padrão de calibração, fornecidos com certificado de análises sinais de corrente e tensão foram medidos utilizando o sistema de aquisição de sinais “IMC SAP 4.0”. Este sistema permite realizar aquisição dos sinais de corrente e tensão com frequência de 5 kHz. Entre outras opções, o software permite calcular as médias de corrente e tensão selecionando intervalos do tempo de aquisição.

Para medição da área fundida, cada corpo de prova soldado foi cortado transversalmente, em duas seções diferentes, à 100 mm, e à 150 mm de distância do início da soldagem. Cada uma das seções retiradas, foi embutida em resina, e preparada metalograficamente. As amostras foram atacadas quimicamente para revelar a área fundida utilizando reagente composto por: 20 g Iodo sublimado, 40 g Iodeto de Potássio e 200 g de água destilada.

Após ataque, as amostras foram fotografadas, e a área do cordão foi medida utilizando um software de análise de imagens que permite realizar a medição de áreas selecionadas em imagens, usando como calibração de uma distância conhecida. Para todas as medições realizadas, a calibração foi feita utilizando a espessura da chapa.

O cálculo do valor da eficiência de fusão, representado pelo símbolo η_m , foi realizado usando a Equação (1):

$$\eta_m = \frac{QA_m v}{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i} \quad (1)$$

Sendo: Q , a entalpia de fusão, em J/mm³ (Quantidade de energia requerida para elevar a temperatura do metal sólido até a temperatura de fusão e para converter esse volume do estado sólido para o estado líquido); A_m , a área fundida medida na seção transversal em mm²; v , a velocidade de soldagem em mm/s; $\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n}$, a média da potência elétrica calculada por meio do produto da corrente e da tensão do arco nos diferentes instantes. O valor da entalpia de fusão do aço utilizado para o cálculo da eficiência de fusão foi de 10,5 J/mm³. [9]

5. Resultados e discussões

Os ensaios com argônio puro no gás de proteção mostraram a forte tendência de formação de *humping*, mesmo com velocidade de soldagem de 5 mm/s, que é relativamente baixa. Os ensaios realizados no presente trabalho foram planejados com essa velocidade de soldagem baixa com objetivo de obter cordões contínuos que possibilitassem a medição e análise da área fundida. Porém, para o caso do Ar puro, obteve-se o cordão contínuo somente na corrente de 200 A. Para a corrente de 300 A já ocorreu formação de defeitos em cerca de metade do cordão, e com 400 A de corrente, ocorreu formação de defeitos em todo o cordão.

Para o caso dos ensaios realizados com He, não ocorreu a formação dos defeitos em nenhuma das correntes testadas. Esses resultados estão de acordo com os resultados de Savage, *et al* [4], mostrando que a utilização de hélio no gás de proteção no processo TIG resulta em maior velocidade limite para aparecimento de defeitos em comparação com o argônio puro, considerando a mesma corrente média e distância eletrodo-peça.

Os ensaios realizados com as mistura Ar-H₂ mostraram que a adição do hidrogênio ao argônio resultou em um melhor desempenho em relação à formação de *humping* em comparação com o Ar puro. Para o caso da mistura Ar+5% H₂, no cordão soldado com 300 A não ocorreu a formação de *humping*. No ensaio com 400 A ficou nítido uma grande instabilidade durante a soldagem, sendo que a poça de fusão formava uma cratera que quase resultava em *humping*, porém, o metal líquido ainda conseguiu preencher as crateras e formar o cordão contínuo antes da solidificação completa. O cordão ficou com aspecto escamado devido a essas instabilidades. Os ensaios realizados com as misturas Ar+10% H₂ e Ar+15% H₂ apresentaram cordões sem aparecimento de *humping* em todas as correntes testadas. Para a mistura Ar+15% H₂ ocorreu um forte aparecimento de porosidade aberta na superfície do cordão. A Figura 7 mostra as seções transversais cortadas a 150 mm do início de cada cordão soldado.

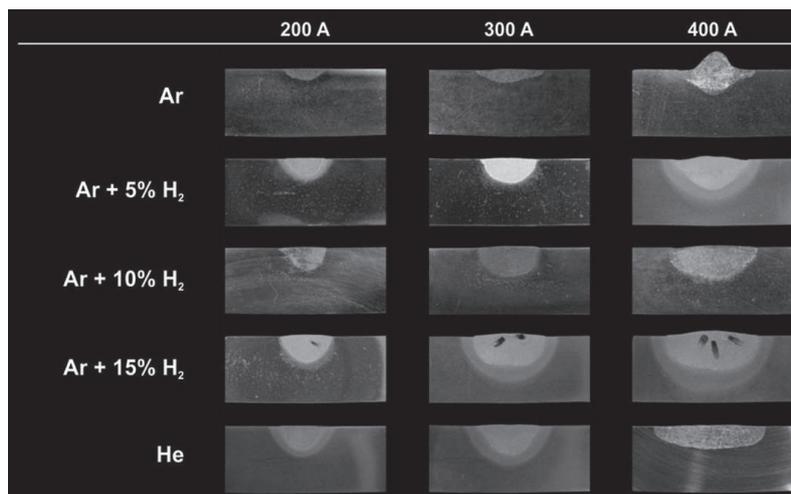


Figura 7. Seção transversal dos cordões cortados a 150 mm de distância do início da solda. Vs: 30 cm/min. DEP: 3 mm. Eletrodo 3,2 mm diâmetro com afiação em 90°.

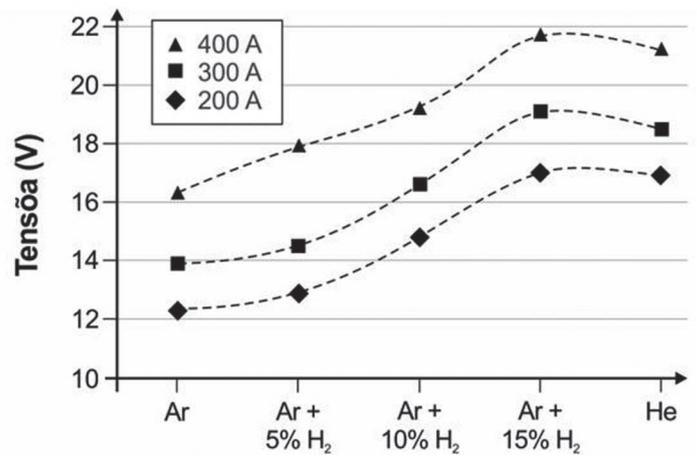
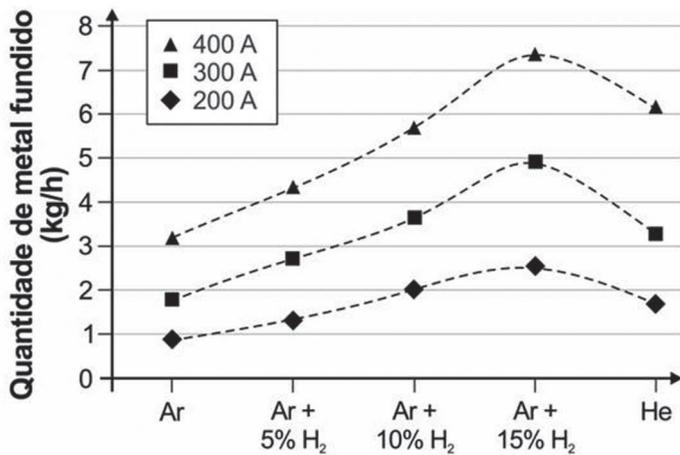


Figura 8. Quantidade de metal fundido para os diferentes gases (esquerda). Tensão do arco para os diferentes gases (direita).

A Figura 8 (esquerda) mostra a quantidade de metal fundido em kg/h a partir da média da área da seção transversal de cada cordão. É possível verificar que para a mesma corrente média o hélio funde uma quantidade maior de material em comparação com o argônio puro. Nas misturas Ar-H₂, conforme o teor de hidrogênio foi aumentado, aumentou-se fortemente a quantidade de metal fundido para a mesma corrente média, sendo que para a mistura com maior teor de H₂ a quantidade de metal fundido foi consideravelmente maior do que utilizando He puro, e cerca de 2,5 vezes maior do que utilizando Ar puro.

A Figura 8 (direita) mostra a tensão média para os diferentes gases testados com correntes de 200 A, 300 A, e 400 A. Conforme já era esperado devido à diferença na energia de ionização dos dois gases, o arco com He apresentou tensão consideravelmente maior do que o arco com Ar para mesma distância eletrodo-peça e mesma corrente média. Essa diferença foi superior a 4 V em todas as correntes testadas. Os ensaios com as misturas Ar-H₂ confirmaram a mesma tendência apresentada nos trabalhos [7-8], sendo que a tensão do arco foi proporcionalmente maior conforme era maior o teor de H₂ presente no gás de proteção. A tensão do arco da mistura Ar+15% H₂ apresentou valores próximos a tensão do arco com He puro considerando as mesmas distância eletrodo-peça e corrente média.

A Figura 9 mostra a média da eficiência de fusão calculada com a Equação 2 para cada corrente testada. Pode-se verificar que a adição de H₂ ao Ar no gás de proteção resultou em um forte aumento da eficiência de fusão em comparação com o Ar puro, concordando com os resultados dos trabalhos [7-8]. Nota-se também que as misturas Ar-H₂ com teores de 10% e 15% de H₂ resultaram em maior eficiência de fusão do que o He.

Inicialmente, destaca-se que a adição de frações de H₂ ao Ar no gás de proteção aumentou a velocidade limite para surgimento de defeitos em comparação com o Ar puro para a mesma corrente média. Não foram encontradas publicações que mostrem que a adição de H₂ ao Ar causa diminuição da pressão do arco. Então esses resultados não podem ser explicados pela teoria principal apresentada nos trabalhos [4-6], na qual a diferença na velocidade limite para surgimento de defeitos entre He e Ar é decorrente da menor pressão do arco para o caso do He.

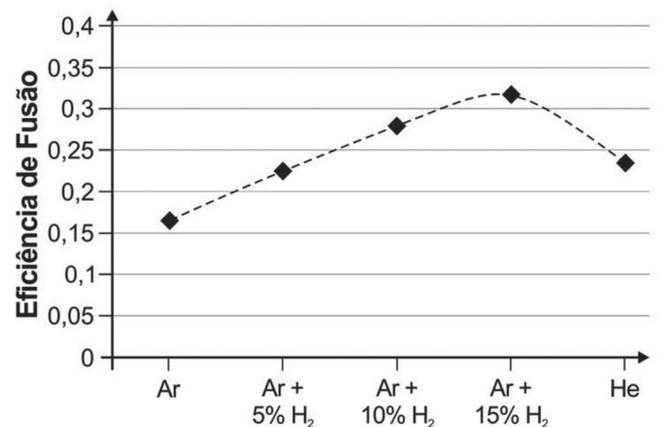


Figura 9. Média da eficiência de fusão calculada para diferentes misturas gasosas.

Os resultados encontrados no presente trabalho, mostraram que para a mesma corrente média a tensão do arco e a quantidade de metal fundido pelo arco com He são muito maiores do que para o arco com Ar. Essa maior quantidade de metal fundido modifica totalmente o tamanho e a dinâmica de solidificação da poça de fusão. Os trabalhos [1-6] que tratam dos defeitos da soldagem de elevada produtividade para o processo TIG ignoram essas diferenças, e focam suas análises somente na diferença de pressão entre os arcos com Ar e He. Essa diferença na quantidade de metal fundido entre o arco com Ar e o arco He para mesma corrente média, por si só, independentemente da pressão do arco, já seria um ponto favorável para obtenção de maior velocidade limite para surgimento de defeitos no caso do He, pois, considerando a explicação do item 2.2, uma maior quantidade de metal líquido na poça de fusão retardaria uma possível solidificação prematura da região de cratera, postergando o surgimento dos defeitos. Evidentemente que a diferença de pressão entre os arcos com He e com Ar também pode exercer um papel importante, e é de se esperar que a maior pressão do arco para o caso do Ar realmente tenha a tendência de tornar prematuro o processo de formação do *humping*. Dificilmente será possível determinar qual dos fatores, a pressão

do arco ou a quantidade de metal fundido na poça de fusão, tem maior influência para a formação de defeitos na soldagem TIG de elevada velocidade já que o resultado final da soldagem é uma combinação dos dois efeitos. Porém ficou claro que a considerável diferença na quantidade de metal fundido entre o Ar e He para mesma corrente média tem papel significativo no formato da poça de fusão e conseqüentemente no surgimento de defeitos, e por isso não deveria ser ignorado como ocorreu nos trabalhos encontrados. Além disso, os resultados dos ensaios de Savage et al [4] mostram que com a diminuição da distância eletrodo-peça a velocidade limite para surgimento de defeitos aumenta, enquanto a pressão do arco também aumenta com a diminuição da distância eletrodo-peça, mostrando incoerência nessa questão.

Os resultados dos ensaios com as misturas Ar-H₂ fornecem subsídios para a explicação de que a quantidade de material fundido também tem papel decisivo na velocidade limite para surgimento dos defeitos na soldagem TIG de elevada velocidade. Partindo do princípio de que pequenas frações de H₂ no Ar não diminuem a pressão do arco agindo na poça de fusão, a maior velocidade limite para aparecimento de defeitos que se obtém com as misturas Ar-H₂ pode ser atribuída principalmente à maior quantidade de metal fundido proporcionada por estas misturas em comparação com a quantidade de metal fundido usando Ar puro.

Considerando os resultados obtidos, principalmente com relação à elevada eficiência de fusão, a utilização de misturas Ar-H₂ na soldagem TIG de elevada velocidade aparece como uma importante alternativa tecnológica para obter maior velocidade de soldagem. Porém, a aplicação dessas misturas fica restrita aos casos onde a utilização do H₂ não cause problemas. Por exemplo, a utilização dessas misturas somente é possível em aços que não apresentem susceptibilidade à trincas induzidas por hidrogênio. Outra questão importante é a ocorrência de porosidade devido à utilização de H₂ na mistura gasosa, foi possível verificar elevada formação de porosidade nos ensaios de cordão sobre chapa com a mistura Ar+15%H₂, enquanto que no caso da soldagem de união em junta sobreposta usando chapas de 3 mm de espessura não ocorreu porosidade. Essa diferença nas duas situações utilizando a mesma mistura gasosa, pode ser atribuída a diferenças de composição química dos aços utilizados em cada caso e devido à diferentes velocidades de solidificação. Além disso, o formato do cordão certamente influenciou na formação de porosidade no metal solidificado sendo que é possível aceitar que o gás aprisionado no metal tem maior facilidade para deixar o metal líquido no caso da junta sobreposta cujo cordão tem uma relação largura pela profundidade muito maior do que no caso da soldagem cordão sobre chapa onde essa relação é bem menor. Por fim, é importante ressaltar que o H₂ é um gás inflamável e explosivo, por isso, sua utilização mesmo em misturas deve ser feita considerando as devidas precauções de segurança.

6. Conclusões

O arco com o processo TIG utilizando como gás de proteção misturas Ar-H₂ proporciona eficiência de fusão muito mais elevada do que para o caso do Ar puro, e inclusive mais

elevada do que o He dependendo do teor de H₂. Este aumento da eficiência de fusão, de acordo com a literatura, pode ser atribuído principalmente à maior condutividade térmica do hidrogênio.

O uso de misturas Ar-H₂ no gás de proteção se caracteriza como uma importante alternativa para elevar a velocidade de soldagem no processo TIG. Foi possível verificar que a utilização destas misturas diminuiu de maneira acentuada a tendência de formação dos defeitos de soldagem tipo *humping* em comparação com o argônio puro. Considerando que a maior parte das aplicações tradicionais do processo TIG o gás utilizado é o argônio puro, existe então uma grande possibilidade de melhoria de produtividade por meio da utilização de frações de H₂ no gás de proteção, principalmente em aplicações automatizadas que permitem maiores velocidades de soldagem.

Os trabalhos que tratam dos defeitos da soldagem TIG em aplicações de elevada velocidade dão destaque à pressão do arco como fator chave para ocorrência dos defeitos. Porém, os resultados do presente trabalho indicam que o desempenho obtido com cada mistura gasosa parece estar diretamente relacionado com a eficiência de fusão proporcionada pelo gás utilizado.

7. Referências Citadas

- [1] MENDEZ, P. F. Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding. Massachusetts Institute of Technology. 1999.
- [2] MENDEZ, P. F.; EAGAR, T. W. Penetration and defect formation in high-current arc welding. *Welding Journal*, p. 296-306, october 2003.
- [3] MENDEZ, 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: 1999.
- [4] SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding. *Welding Journal*, jul. 1979. 212s-224s.
- [5] KUMAR, A.; DEBROY, T. Toward a Unified Model to Prevent Humping Defects in Gas Tungsten Arc Welding. *Welding Journal*, p. 292-304, December 2006.
- [6] SODERSTROM, E.; MENDEZ, P. F. Humping mechanisms present in high speed welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, p. 572-579, 11(5) 2006.
- [7] HOOIJMANS, J. Hydrogen Absorption in Iron and Steel During Gas Tungsten Arc Welding. thesis. ed. the Netherlands: Delft Univ. Technol., 1994.
- [8] TUSEK, J.; SUBAN, M. Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, n. 25, p. 369-376, 2000.
- [9] AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Handbook - Welding Science and Technology*. 9ª Edição. AWS, v. 1, 2001.