

A química da formação do cordão na soldagem TIG

(The chemistry of TIG weld bead formation)

Paulo J. Modenesi¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, modenesi@demet.ufmg.br

Resumo

A soldagem TIG apresenta elevados níveis de estabilidade e permite um controle mais apurado do que a maioria dos demais processos de soldagem a arco. É bem conhecido, contudo, que pequenas variações de composição química do metal base ou da região de operação do arco podem ter um efeito pronunciado no formato do cordão de solda, o que reduz a capacidade de controlar e a previsibilidade do processo. Este trabalho apresenta uma revisão da variabilidade do cordão de solda obtido no processo TIG com pequenas alterações na composição química do metal base e das soldagens A-TIG e TIG com gás ativo. Aspectos comuns e particulares de cada caso são realçados e discutidos e os mecanismos propostos na literatura em cada caso são apresentados e comparados.

Palavras-chave: A-TIG, GTAW, enxofre, oxigênio, penetração.

Abstract: *TIG welding is considered to be one of the most stable and controllable arc welding processes. However, it is now well known that small changes in base metal chemical composition and in the welding environment can have a deep effect on the resulting weld bead. Obviously, this reduces the reliability and controllability of TIG welding. This paper reviews TIG aspects of weld bead changes associated to small changes in base metal composition, and to active flux TIG (A-TIG) and active gas TIG welding. Aspects that are similar and unique to each case are highlighted and discussed. The mechanisms of weld bead shape presented in the literature are also presented and discussed.*

Key-words: A-TIG, GTAW, sulfur, oxygen, penetration.

1. Introdução

Uma tendência para a mecanização e automatização de operações de soldagem vem ocorrendo de forma intensa nas últimas décadas. Paralelamente, avanços significativos em técnicas de modelagem possibilitaram uma verdadeira revolução no estudo e na simulação de processos industriais, o que acabou por alcançar, também, o campo da soldagem. Apesar de tudo isto, as operações de soldagem ainda guardam muito de empirismo e magia que teimosamente resiste aos avanços da automação e da simulação matemática.

Tradicionalmente, a evolução do formato de um cordão de solda é analisada em função das características da fonte de calor e das propriedades termofísicas e geométricas da peça sendo soldada. Regras práticas relacionando a penetração e a largura do cordão com a corrente e a tensão de soldagem respectivamente estão bem estabelecidas e são bem conhecidas. Em alguns casos, efeitos específicos, como o da transferência de metal no processo MIG/MAG, estão, também, relativamente bem estabelecidos. Em contraste, para um processo aparentemente mais simples como é o caso da soldagem TIG, variações expressivas e

surpreendentes no formato do cordão foram associadas com mudanças relativamente discretas no processo de soldagem e nos materiais usados. Embora sejam conhecidos e intensamente estudados nas últimas quatro ou cinco décadas, este fenômeno e outros similares ainda causam efeitos surpreendentes e são motivo de debate quanto aos seus mecanismos atuantes.

O processo de soldagem a arco TIG (ou GTAW) é muito usado na soldagem de materiais mais sofisticados, incluindo aços inoxidáveis e ligas de metais reativos, e quando um bom acabamento e uma elevada qualidade das soldas são requeridos. Frequentemente, o processo é aplicado de forma mecanizada ou automatizada. Especialmente nestes casos, variações expressivas no formato do cordão associadas, por exemplo, com mudanças pequenas de composição química do metal base, usualmente dentro do permitido por normas técnicas, são altamente indesejáveis.

Por outro lado, o processo de soldagem TIG apresenta, em sua forma usual de utilização, uma limitação quanto à máxima espessura soldável, particularmente em juntas sem chanfro, e uma taxa de deposição menor do que as comumente obtidas com processos de soldagem a arco com eletrodo consumível. Estas características tendem a limitar a utilização desse processo para soldagem de peças relativamente finas ou para casos especiais em que as características do material usado ou as demandas da aplicação justifiquem o seu uso em juntas de maior espessura. Assim, a possibilidade de manipular a penetração da solda, par-

Recebido em 17/06/2013. Texto Final em 17/06/2013.

ticularmente aumentando o seu valor em mais de 100%, por mudanças relativamente simples no processo podem, potencialmente, aumentar a aplicação da soldagem TIG de forma expressiva. O uso de fluxos ativos e de gases de proteção levemente oxidantes na soldagem TIG são duas abordagens propostas dentro deste escopo que têm sido muito estudadas nos últimos anos.

O presente trabalho apresenta uma revisão da literatura e uma reflexão sobre diferentes aspectos desta influência, por vezes dramática, de pequenas alterações no processo de soldagem TIG e nos materiais usados sobre o formato do cordão de solda obtido. Neste contexto, serão explorados três aspectos, ou manifestações, deste efeito: (1) a influência da composição química do metal base, (2) a influência do uso de fluxos ativos e da presença de escórias sobre a poça de fusão e (c) o uso de gases de proteção oxidantes (gases ativos). Inicialmente, cada uma destas manifestações será tratada separadamente, procurando, na medida do possível, manter uma perspectiva histórica em cada caso. Vários dos mecanismos que foram propostos para explicar estes efeitos serão apresentados e discutidos de forma separada. Posteriormente, uma análise conjunta será tentada buscando realçar os pontos comuns destes três aspectos frequentemente tratados de forma separada na literatura.

Presentemente, para todas as três manifestações, o mecanismo mais aceito é o da inversão no sentido do movimento de metal líquido na poça de fusão causada pela mudança de sinal da variação da tensão superficial com a temperatura. Contudo, vários outros mecanismos, considerados em conjunto ou separadamente com o anterior foram propostos e continuam a ser propostos em trabalhos analisando alguma das manifestações indicadas.

Finalmente, deve-se reconhecer que a literatura disponível sobre estes temas é bastante extensa e que o presente trabalho não pretende ser uma revisão exaustiva sobre cada um deles. Procurou-se, alternativamente, enfatizar os aspectos comuns dos temas, os quais são geralmente tratados de forma separada na

literatura, procurando por denominadores comuns que ajudem a estabelecer os aspectos mais importantes e gerais deste fenômeno.

2. Efeito de elementos residuais do metal base

Nas décadas de 1960 e 1970, um fenômeno surpreendente tornou-se evidente com o uso crescente da soldagem TIG mecanizada de aços inoxidáveis e de ligas não ferrosas sem o uso de metal de adição [1-4]. Metcalfe & Quigley [1] apresentam um resumo das observações feitas por diferentes autores relativas a este efeito até a metade da década de 1970.

Foram observadas alterações significativas na relação entre a penetração e a largura do cordão (P/L) e no aspecto do cordão que foram relacionadas com diferenças, frequentemente muito pequenas, em teores de elementos como Al, Se, Ti, Mn, Si e, principalmente, S e O. Cordões mais largos e rasos podiam apresentar a superfície do cordão azulada enquanto que os mais finos e profundos apresentavam uma cor mais amarelada [1]. Estes últimos foram observados em ligas com teores mais baixos de, por exemplo, Al, Ti, Mn e Si e com teores mais elevados de Se, S e O [2,4-5], sendo que, em geral, estes teores ficavam dentro da faixa permitida por normas técnicas para a composição química da liga. Alterações na aparência do arco elétrico e nas dimensões da mancha anódica também foram observadas em função destas diferenças pequenas de composição química. Além disto, na soldagem de juntas de topo compostas por chapas de uma mesma liga, mas que apresentavam diferenças nos teores dos elementos considerados, foi observada uma tendência para o arco defletir em direção à liga que teria menor relação penetração/largura (P/L) quando soldada separadamente [6]. A Figura 1 ilustra este último efeito, tendo os desenhos sido feitos com base em imagens de vídeo feitas por um fabricante de equipamentos para soldagem automática com o processo TIG.

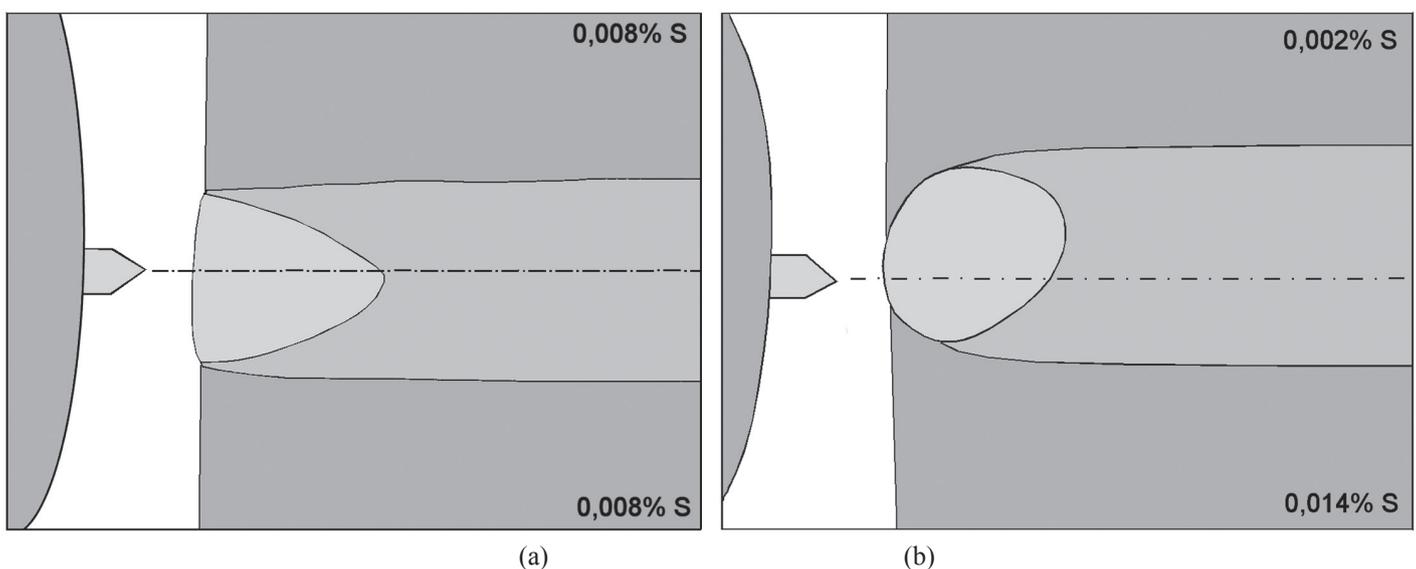


Figura 1. Representação de soldas sendo produzidas entre tubos com mesmo teor de enxofre (a) e com teor diferente deste elemento (b). Esquemas baseados em imagens disponíveis na internet (acessadas, em 01/04/2013, em: <http://www.arcmachines.com/news/case-studies/effects-sulfur>).

Valores da razão P/L encontrados na literatura para aços que apresentam baixa e alta penetração variam muito, o que é esperado considerando-se as diferenças de materiais, suas composições e condições de soldagem. Com base em uma série de trabalhos que usaram diferentes tipos de aços inoxidáveis austeníticos e, também, uma superliga de níquel [1,5,7-9], os valores da razão P/L, para as corridas consideradas de baixa penetração, ficam em torno de 0,21 (com valores variando entre 0,18 e 0,3) em testes com o processo TIG. Para as ligas que apresentam maior penetração, essa relação ficou em torno de 0,45 (com valores entre 0,37 e 0,63), representando, em média, uma variação de 114% na razão P/L. Variações similares são observadas quando se considera apenas a penetração do cordão. A figura 2, de um trabalho realizado em 1993 [8], quando o papel do teor de enxofre no formato do cordão na soldagem TIG já estava bem estabelecido, mostra a variação com a corrente de soldagem da relação P/L para duas corridas de aço AISI 316 com teores diferentes de enxofre (15 e 95 ppm).

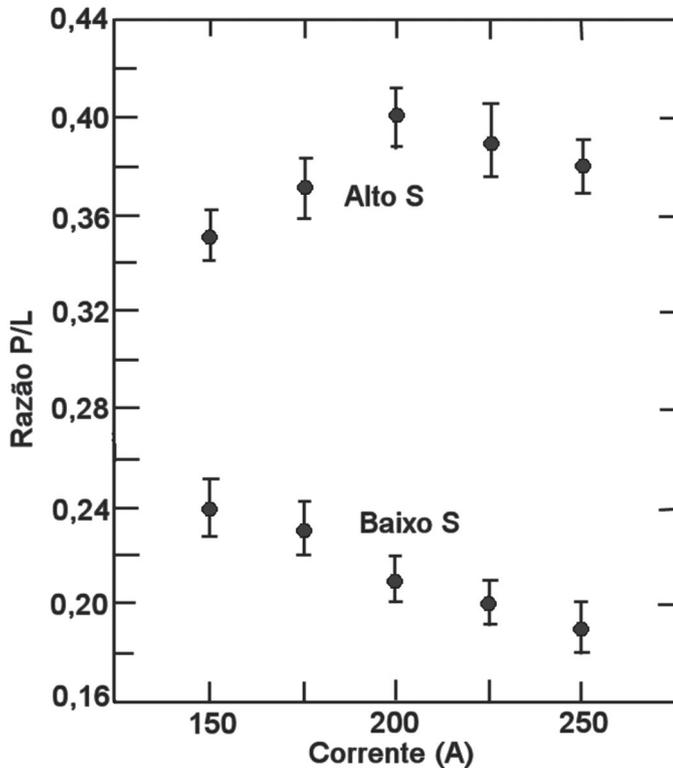


Figura 2. Variação da relação P/L em função da corrente para soldas TIG em duas corridas de aço inoxidável 316, uma com menor (15 ppm) e outra com maior (95 ppm) teor de enxofre [8].

Desde que este fenômeno foi evidenciado, diferentes mecanismos já foram propostos para explicá-lo, sendo estes relacionados principalmente a alterações ocorrendo na poça de fusão ou no arco elétrico.

Chase & Savage [10] observaram mudanças na tensão do arco causadas por pequenas variações nos teores de alguns elementos em um anodo de níquel. Os autores consideraram que estas variações de tensão poderiam ser uma causa provável

para mudanças no formato do cordão no caso da soldagem TIG quando esta fosse realizada com controle automático do comprimento do arco pela tensão (“Automatic Voltage Control” – AVC). Contudo, mudanças no formato do cordão observadas quando o comprimento do arco era mantido constante não podiam ser explicadas desta forma e os autores consideraram não ser possível propor, na época, um modelo adequado para esse efeito. Eles também consideraram a possibilidade de que estes elementos reduzissem a tensão superficial do metal líquido na poça, permitindo que esta assumisse uma maior curvatura em resposta à pressão do arco e, assim, ocorresse um aumento da penetração.

Savage & colaboradores [4] propuseram, como uma causa de variações de penetração com os teores de Si, Ti e Al em soldas de inconel 600 feitas com o processo TIG, alterações na quantidade de energia fornecida ao anodo e resultantes de mudanças na tensão de queda anódica causadas pela emissão de elétrons secundários no anodo, e no tamanho da mancha anódica. A redução de penetração associada a teores mais elevados de alumínio no metal base foi explicada pela formação de uma camada de óxido refratário e isolante na superfície do metal base.

Bennet & Mills [5] também associaram ao teor de alumínio as variações de penetração observadas na solda de um aço inoxidável austenítico de alto teor de manganês. Análise espectral do arco durante a soldagem sugeriu que o teor de alumínio do metal base influenciava a quantidade de vapor de manganês presente no arco. Isto afetaria a temperatura do arco e, segundo os autores, seria a causa da mudança na relação (P/L) da solda. Mudanças no teor de manganês no arco foram, também, consideradas recentemente por Mishra e colaboradores [11] em um estudo teórico e experimental para explicar a deflexão do arco, na soldagem de aço inoxidável austenítico com diferentes teores de enxofre. Como já mencionado, nesta situação, o arco tende a defletir para o metal base de menor teor de enxofre.

Em 1982, Heiple e Roper [2] propuseram que o teor de elementos tenso-ativos (por exemplo, O, S e Se) controlaria o sentido do movimento de convecção do metal líquido na poça de fusão e que este seria o fator determinante da penetração da poça. Outros elementos químicos como Al, Mn e Ti atuariam de forma indireta controlando o teor livre dos elementos tenso-ativos. Atualmente, este modelo é bastante conhecido, sendo considerado, pela maioria dos pesquisadores, o principal mecanismo controlador de variações no formato do cordão por pequenas mudanças no teor de elementos químicos presentes na poça de fusão. Diversos trabalhos descrevem este modelo [2,12] de forma detalhada, assim, neste artigo, o mesmo será apresentado de forma resumida.

Segundo este mecanismo, em ligas com teores suficientemente baixos de elementos tenso-ativos, ou com adições de outros elementos capazes de se combinar com os primeiros e retirá-los de solução no metal líquido, a tensão superficial do líquido metálico na poça de fusão diminuiria com a temperatura (figura 3, curva A). Como a temperatura da poça de fusão é maior próximo de seu centro, a tensão superficial tenderia a ser menor nesta região e maior próximo das suas bordas. Assim, o fluxo de metal líquido tenderia a ocorrer do centro para as bordas da poça

de fusão, direcionando para esta região o metal superaquecido do centro da poça e resultando em um cordão largo e de baixa penetração (figuras 4a). Quando os teores de elementos tenso-ativos forem suficientemente elevados, a tensão superficial seria fortemente reduzida para temperaturas próximas da temperatura de fusão do material e passaria a aumentar com a temperatura (figura 3, curva B). Nesta situação, como o metal líquido próximo das bordas da poça apresentaria menor energia de superfície (devido a sua menor temperatura), o fluxo de metal seria invertido e o metal superaquecido seria empurrado para a raiz da solda, aumentando a penetração e diminuindo a largura (figura 4b). Este efeito é comumente referenciado na literatura como convecção (ou efeito) de Marangoni, em homenagem ao físico italiano Carlo Marangoni que estudou este fenômeno no século XIX. O fenômeno é também chamado de convecção termocapilar. Segundo Mills [12], a inversão do sentido de convecção na poça de fusão em aços inoxidáveis austeníticos ocorre para teores de enxofre tipicamente entre 30 e 60 ppm.

$$M_a = \frac{d\gamma}{dT} \frac{dT}{dx} \frac{L^2}{\alpha \eta} \tag{1}$$

Onde γ é a tensão superficial, T é a temperatura, dT/dx é o gradiente térmico, α é a difusividade térmica e η é a viscosidade do líquido.

Variações similares de formato do cordão foram também observadas em testes com processos, que não usam o arco como fonte de calor para criar a poça de fusão, em particular, nas soldagens a laser (LW) e por feixe de elétrons (EBW). Com estes processos, o feixe de energia foi desfocado (de modo a não formar o “keyhole”) de para criar condições de formação da poça de fusão parecidas com as que ocorrem na soldagem a arco [13-15]. Pierce e colaboradores [13] compararam a variação no formato do cordão em aços inoxidáveis austeníticos com diferentes teores de enxofre usando os processos TIG e EBW. Mudanças similares foram observadas no formato do cordão obtidos com os dois processos. Contudo, o efeito foi mais pronunciado para a soldagem com o processo EBW usando potências maiores. Nos testes com o processo TIG, o efeito da composição química era reduzido com o aumento da corrente na soldagem. Isto foi atribuído ao aumento do arraste ocorrendo na superfície da poça de fusão pelo jato de plasma e à diminuição do gradiente térmico na superfície da poça devido ao aumento das dimensões do arco. Kou e colaboradores [14], estudando a formação de pontos estacionários de solda com o processo de soldagem a laser, observaram não apenas diferenças no formato dos pontos, mas também em seu aspecto superficial em função do teor de enxofre de um aço inoxidável austenítico (figura 5). A solda no metal de base com menor teor de enxofre (42 ppm) apresentava uma menor penetração e marcas superficiais

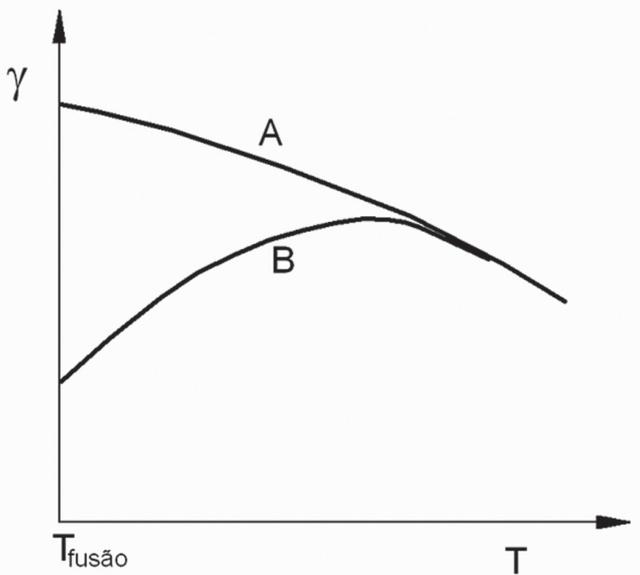


Figura 3. Curvas esquemáticas de variação da tensão superficial com a temperatura em um metal líquido. (A) Material de alta pureza ($dg/dT < 0$) e (B) material contaminado com um elemento tenso-ativo ($dg/dT > 0$).

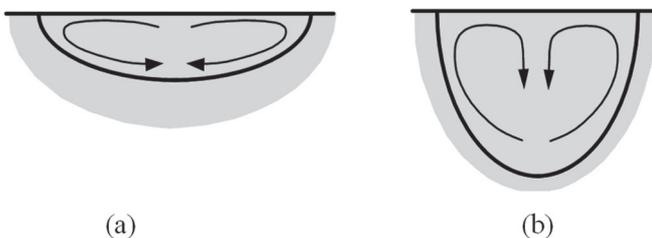


Figura 4. Fluxo de metal líquido induzido na poça de fusão para (a) $dg/dT < 0$ e (b) $dg/dT > 0$.

A intensidade da convecção termocapilar pode ser caracterizada pelo número de Marangoni (M_a) definido como [12]:

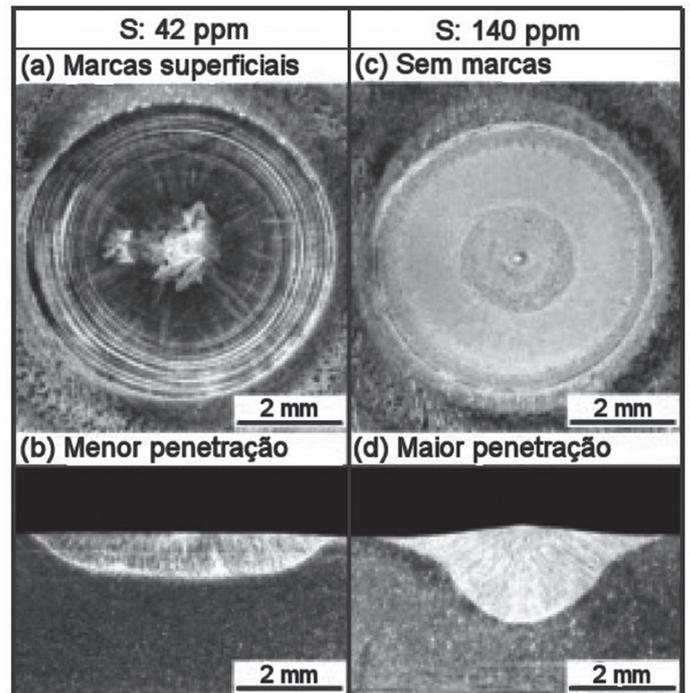


Figura 5. Formato do cordão de pontos de solda produzidos por soldagem a laser em aços inoxidáveis 304 com diferentes teores de enxofre [14].

próximas da borda resultantes de oscilações superficiais na poça de fusão. O perfil de penetração e as oscilações na poça de fusão foram explicados considerando o mecanismo da convecção de Marangoni.

O convecção de Marangoni na poça de fusão foi simulada fisicamente usando NaNO_3 como “base de base” Limmaneevichitr & Kou [16] e um feixe desfocado de laser como fonte de calor. Padrões de convecção atribuídos ao efeito Marangoni foram observados.

3. Soldagem TIG com fluxo ativo (A-TIG)

A soldagem TIG com fluxo ativado (A-TIG) é uma variação muito simples do processo TIG convencional na qual uma fina camada de fluxo é depositada sobre a junta antes da soldagem. Este fluxo é constituído principalmente por óxidos e haletos na forma de pó fino e disperso em um solvente orgânico, em geral, a acetona. Durante a soldagem, a presença do fluxo favorece a formação de um cordão mais estreito e profundo, permitindo um aumento de penetração de 50 a 150% (ou mais) em relação à soldagem sem fluxo nas mesmas condições e com o mesmo equipamento [17]. O processo foi desenvolvido na União Soviética, na década de 1960 [18], inicialmente para a soldagem de ligas de titânio e posteriormente de aços inoxidáveis austeníticos. De forma aparentemente independente, Majestick e Yeo [19] preencheram, em 1969, uma patente nos Estados Unidos na qual propunham um meio para minimizar a variabilidade de penetração na soldagem TIG de diferentes corridas de aço inoxidável austenítico (seção anterior). O processo consistia em revestir a superfície da junta com uma camada de diferentes óxidos ou, alternativamente, oxidar a superfície da peça com um tratamento térmico. Atualmente, além de seu uso inicial para aços inoxidáveis austeníticos e ligas de titânio, existem referências sobre o uso ou o estudo da aplicação deste processo para aços carbono e de baixa liga, alumínio e suas ligas, ligas de magnésio, ligas de cobre e ligas de níquel [17,20-23]. Uma interessante revisão sobre a soldagem A-TIG, englobando tanto aspectos fundamentais como tecnológicos, foi feita por Jarvis para o livro de Ahmed [17].

Na soldagem de titânio e suas ligas, o fluxo é composto principalmente por fluoretos e cloretos, enquanto que, na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, o fluxo é constituído, majoritariamente, por óxidos. Diversos autores [20,24-29] mostraram que, para aços inoxidáveis austeníticos, fluxos compostos por apenas um óxido (por exemplo, Fe_2O_3 , FeO , Cu_2O , Cr_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , MnO , MoO_3 ou NiO_2) já têm uma elevada capacidade de aumentar a profundidade de penetração. Efeito similar foi observado por Tseng [30] para um fluxo de FeS . Leconte e colaboradores [31] concluíram que muitos óxidos metálicos teriam alguma capacidade de aumentar a penetração na soldagem TIG com fluxo, sendo a temperatura de fusão um parâmetro capaz de indicar a efetividade do óxido para aumentar a penetração. Neste sentido, óxidos com temperatura de fusão em torno de 1000 K seriam os mais efetivos. Leconte e colaboradores [32] também avaliaram vários fluoretos para a soldagem A-TIG de aços inoxidáveis austeníticos. Aumento

da penetração em relação à obtida na soldagem sem fluxo foi observado quando criolita (Na_3AlF_6), fluoreto de cálcio (CaF_2) e de magnésio (MgF_2) foram usados. Fluxos compostos por óxidos (MgO , CaO , MnO_2 , Cr_2O_3 , SiO_2 e TiO_2) são também citados em trabalhos envolvendo a soldagem A-TIG de ligas de alumínio e de magnésio [22,33-35]. Marya & Edwards [36] observaram um aumento de penetração superior a 100% na soldagem de ligas de magnésio com diferentes cloretos, em especial com CdCl_2 . Por sua vez Custódio [37] usou cloreto de zinco (ZnCl_2) como fluxo na soldagem de TIG de alumínio com eletrodo negativo visando auxiliar na remoção da camada de alumina da superfície da junta.

As mudanças típicas no cordão de solda devido à presença do fluxo são (lista baseada em [38]):

- Redução da largura do cordão;
- Aumento de penetração;
- Aumenta da área fundida na seção transversal do cordão;
- Formação de uma cratera mais alongada e mais profunda;
- Maior tendência à formação de mordedura.

Algumas destas alterações são mostradas nas figuras 6 e 7.

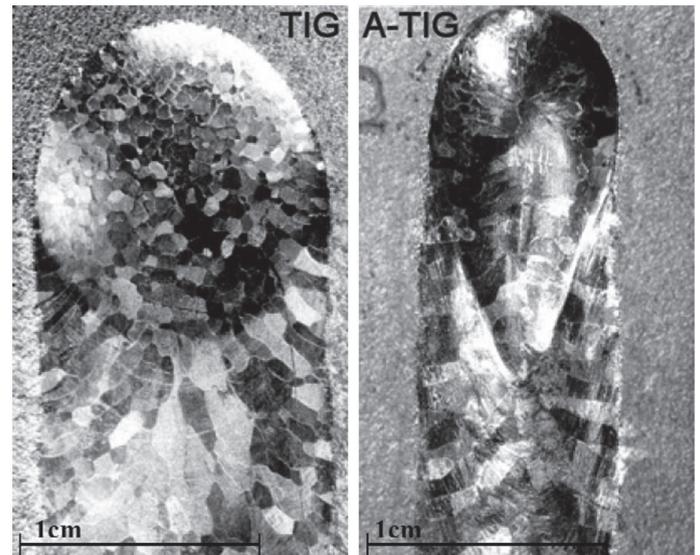


Figura 6. Crateras de soldas TIG e A-TIG em liga de titânio [38].

Deslocamento lateral do cordão, de certa forma, similar ao citado no item anterior para a soldagem com aços inoxidáveis com diferentes teores de enxofre (figura 1), ocorre na soldagem A-TIG quando apenas um dos lados da junta recebe a camada de fluxo (Figura 8).

Adicionalmente, reduções nas dimensões do arco (constricção do arco) e da mancha anódica (Figura 9) são comumente descritas para a soldagem A-TIG [27,30,41-43].

Através de técnicas diversas, incluindo a filmagem da superfície da poça, com e sem o uso de traçadores [27], e videoradiografia [27,44], mudanças na convecção do metal líquido contido na poça de fusão foram demonstradas. Dong e colaboradores [27] observaram que fluxos a base de óxido mudam o sentido da convecção na poça de fusão em aços inoxidáveis austeníticos. Esta se desenvolveria normalmente em direção às bordas da poça de fusão na soldagem TIG de aços

inoxidáveis com baixo teor de enxofre e, na presença do fluxo, inverteria o seu sentido.

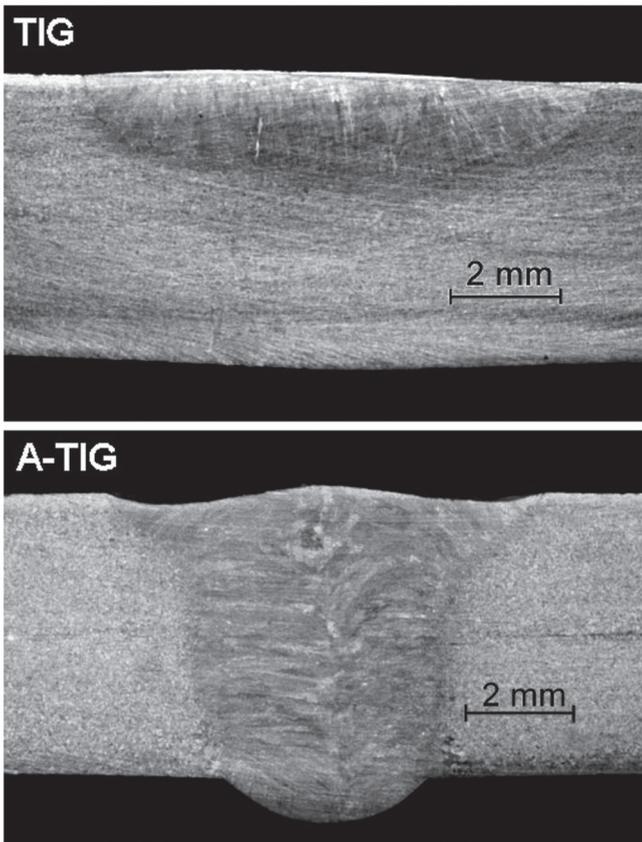


Figura 7. Seções transversais de cordões de solda TIG e A-TIG em aço inoxidável austenítico obtidos com as mesmas condições de soldagem. Adaptado da referência [39].

Resultados diversos sugerem que, na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos com fluxos de óxidos, a penetração da solda aumenta com a quantidade de fluxo usada até um máximo, mantendo-se constante ou se reduzindo para maiores quantidades

de fluxo [24,39,45,46], figura 10. Em paralelo, foi determinado que o teor de oxigênio da solda aumenta com a quantidade de fluxo aplicada [24], figura 11. A alteração no perfil do cordão, com aumento de penetração, associado com a presença do fluxo ocorre na faixa de 70 a 300 ppm de oxigênio na solda [24,25,47], quando a razão P/L aumentaria de 150 a 200% [24-25]. Uma relação entre a penetração da solda e a densidade superficial de fluxo parecida com a descrita acima foi descrita para soldas feitas em ligas de magnésio [22].

De uma forma similar à descrita na seção anterior, valores da razão P/L encontrados na literatura, em comparações entre as soldagens TIG e A-TIG de aço inoxidável austenítico, apresentam diferenças consideráveis. Com base em uma série de trabalhos que usaram diferentes tipos de aços inoxidáveis austeníticos e, também, uma superliga de níquel [24,27,46,48,49], os valores da razão P/L, para cordões obtidos na soldagem TIG, ficam em torno de 0,23 (com valores variando entre 0,12 e 0,34). Para soldas feitas com o processo A-TIG, com diferentes tipos de fluxos, essa relação ficou em torno de 0,69 (com valores entre 0,48 e 1,02), representando, em média, um aumento de 300% na razão P/L em relação à obtida com a soldagem TIG. Variações similares ocorrem quando se compara a penetração do cordão. A figura 12 mostra a evolução da razão P/L com a corrente para as soldas TIG e A-TIG obtidas em condições similares, sendo que, para a soldagem A-TIG, foi usado um fluxo composto por vários óxidos e um fluoreto. Os valores da razão P/L indicados acima para a soldagem TIG são similares aos citados, na seção anterior, para as soldas feitas com o processo TIG em ligas com baixa capacidade de penetração. Considerando-se que os trabalhos de soldagem A-TIG são relativamente mais recentes e que os aços mais modernos tendem a apresentar menores teores de enxofre e oxigênio, este resultado pode ser considerado esperado. Por outro lado, os valores obtidos para a razão P/L para a soldagem A-TIG tendem a ser maiores do que os indicados, na seção anterior, para aços que tendem a ter maior penetração na soldagem TIG. Assim, a presença do fluxo se mostra mais efetiva para aumentar a penetração da solda do que as variações de composição química citadas na seção anterior.

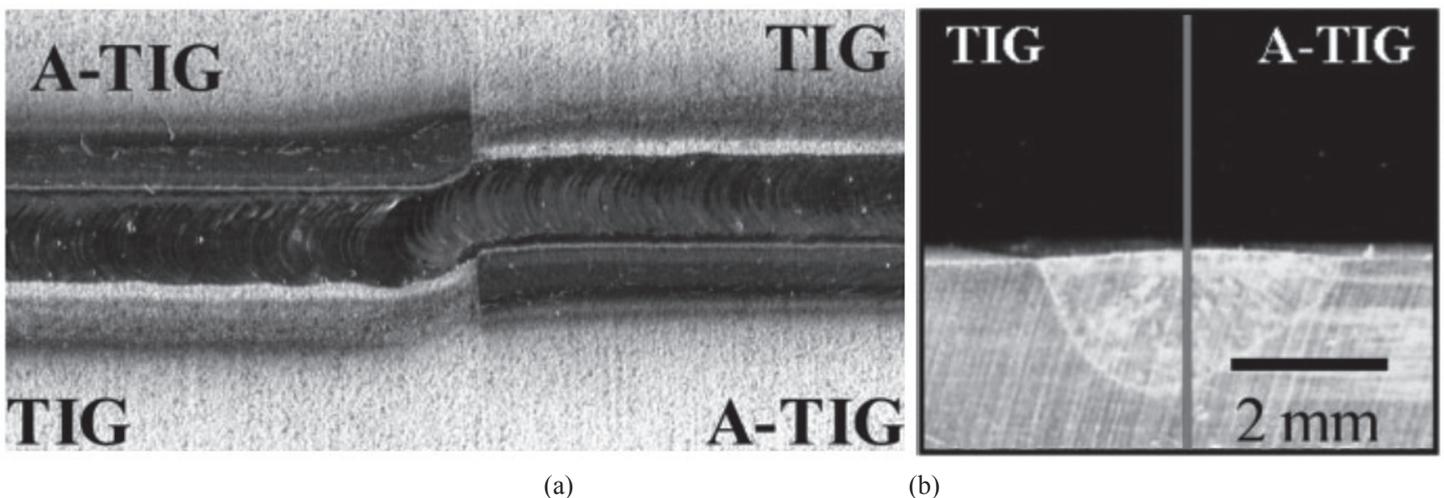


Figura 8. Deflexão lateral do cordão quando apenas um lado da junta recebe o fluxo [40]. Resultado muito similar ao da soldagem de corridas de aço inoxidável austenítico com diferentes teores de enxofre – ver seção anterior e a figura 1.

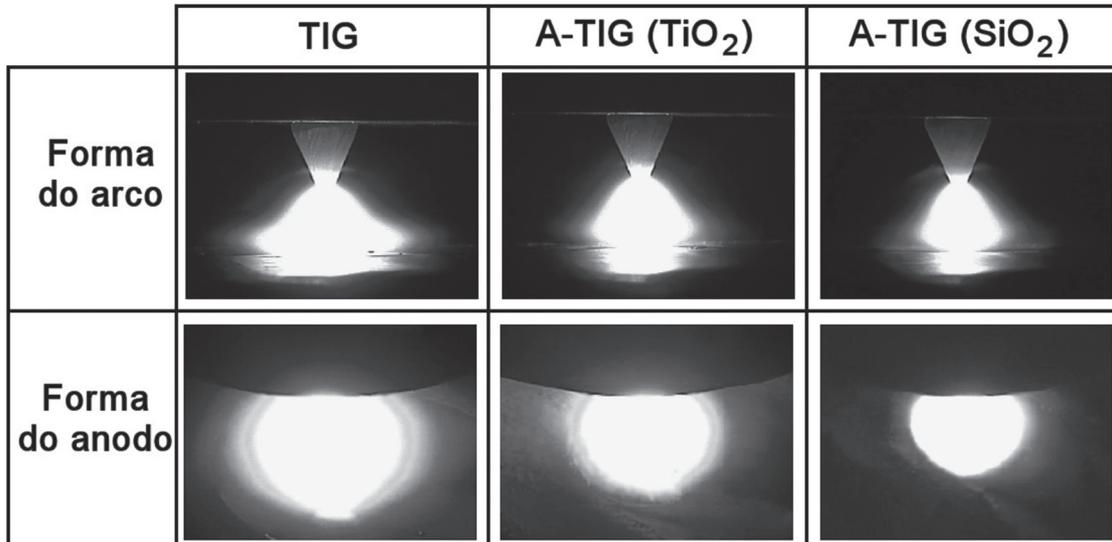
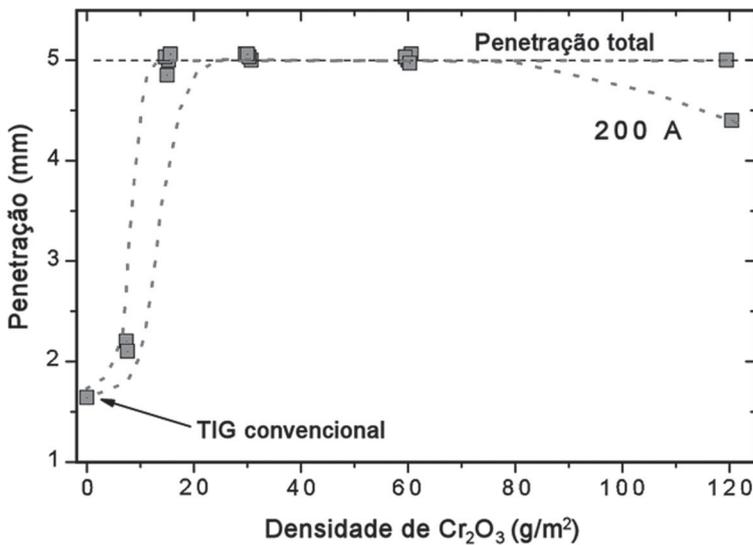
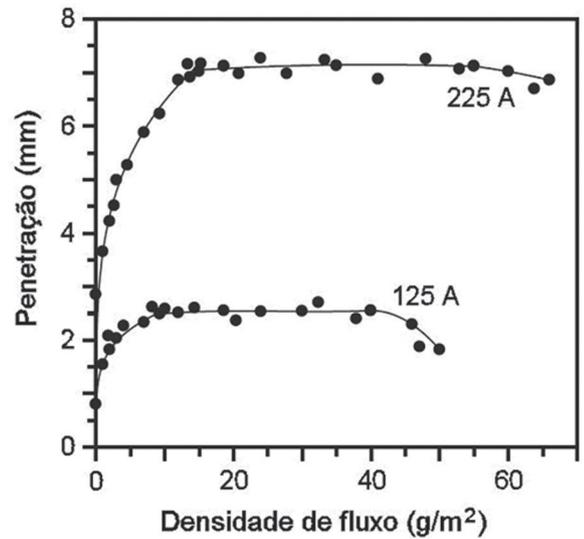


Figura 9. Imagens de contração do arco e do anodo na soldagem TIG e A-TIG [30].



(a)



(b)

Figura 10. Variação da penetração da solda em função da concentração de fluxo. (a) Fluxo de um componente e proteção de Ar [39]. (b) Fluxo complexo e proteção de He [46].

Sándor e colaboradores [48,50] descrevem quatro modelos principais para explicar o efeito do fluxo na soldagem A-TIG, que são apresentados abaixo. Deve-se observar, também, que, considerando as semelhanças entre o que é observado na soldagem A-TIG e na variação de penetração associada à composição do metal base na soldagem TIG, alguns dos modelos propostos são similares aos citados na seção anterior.

- Alterações na composição química do arco causariam uma redução no seu diâmetro (constricção) que levaria a uma maior densidade de corrente elétrica e de energia atuando sobre a poça de fusão. A causa mais comumente considerada para esta contração é a captura de elétrons, nas regiões periféricas do arco, por átomos de elementos eletronegativos, particularmente o flúor e o oxigênio [18]. Outros fatores são citados,

por exemplo, a vaporização preferencial de metais de fácil ionização em determinadas regiões da poça de fusão ou da cobertura de fluxo [28,45,51], para explicar a contração do arco.

- Os fluxos ativos reduziriam a tensão superficial do metal líquido na poça de fusão. Como a tensão superficial é um dos principais fatores que se opõem à ação da pressão do arco sobre a poça, a sua redução permitiria uma maior depressão da poça pela pressão do arco, aumentando a penetração. Este mecanismo seria o mesmo proposto por Chase & Savage [10] como uma possível explicação do efeito de variações na composição química do metal base na penetração (ver seção anterior). Embora uma maior depressão da poça de fusão seja realmente observada na soldagem A-TIG (figura 6), Sándor e colaboradores [50] apresentam evidências experimentais de

que este mecanismo não seria importante para aumentar a penetração na soldagem A-TIG.

- Os fluxos alterariam a variação da tensão superficial do metal líquido com a temperatura, mudando o sinal de dg/dT de negativo para positivo. Esta mudança alteraria o sentido do movimento de convecção do metal líquido na poça de fusão (efeito Marangoni), direcionando o metal líquido mais aquecido para a raiz da poça de fusão e aumentando a penetração. Este mecanismo foi apresentado na seção anterior e atualmente é mais comumente considerado para explicar o efeito da influência de pequenas alterações no teor de oxigênio e, principalmente, de enxofre do metal base no formato de cordões de solda TIG.
- Os fluxos, por apresentarem baixas condutividades elétrica e térmica, além de possuírem, em geral, elevada temperatura de fusão, dificultariam a passagem do arco para a poça nas regiões em que a sua temperatura fosse menor. Desta forma, as dimensões da mancha anódica seriam reduzidas e a densidade de corrente seria aumentada, isto é, o fluxo atuaria como uma barreira causando uma constrição física do arco. Além desta, Wang e colaboradores [52] citam, para um fluxo a base de SiO_2 , a tendência do arco defletir para trás, aumentando o seu comprimento e tensão e, desta forma, a quantidade de energia gerada no arco. Deve-se considerar, contudo, que o aumento de tensão observado na soldagem A-TIG, em comparação com a TIG, é relativamente pequeno, em geral, inferior a 1 V.

Possivelmente, uma das primeiras propostas que considera a contração “química” do arco como a principal causa de aumento de penetração na soldagem A-TIG foi feita por Simoniuk [53] ao estudar a soldagem de ligas de titânio com fluxos a base de compostos halogênicos. O mecanismo proposto se baseia em evidências de que, na presença do fluxo, o arco sofre uma contração, isto é, reduz as suas dimensões laterais como já mencionado, figura 9. Essa contração levaria a um aumento da densidade de corrente na raiz do arco, aumentando a densidade de energia transferida para a poça de fusão e, assim, sua penetração. Adicionalmente, a pressão de origem eletromagnética no arco aumentaria com a contração do arco favorecendo o aumento de penetração [51]. O modelo considera a formação de

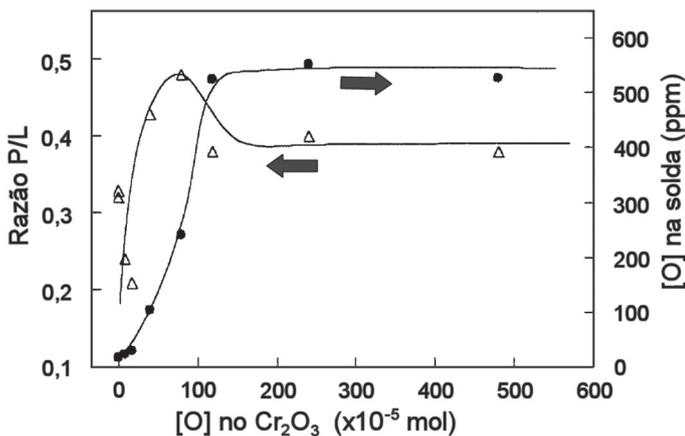


Figura 11. Variação da razão P/L e do teor de oxigênio da solda em função da concentração de fluxo (Cr_2O_3) expressa em moles de oxigênio [24].

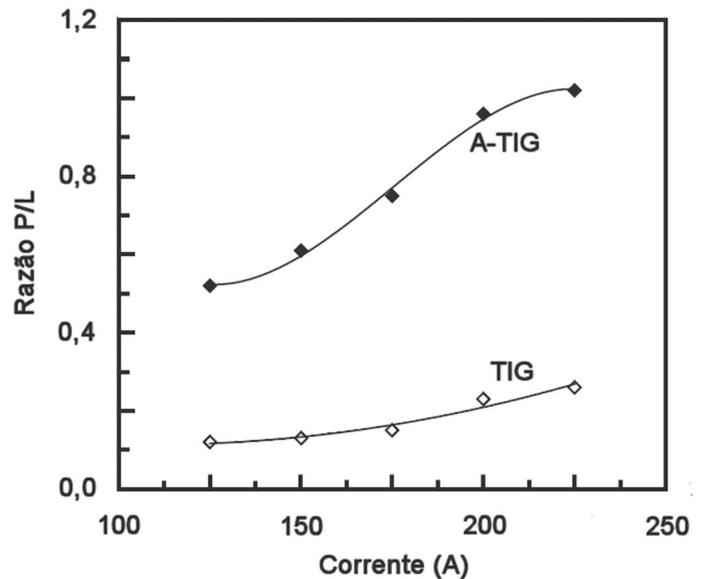


Figura 12. Variação da razão P/L na soldagem TIG e A-TIG [46]. Comparar esta figura com a figura 2.

íons negativos de elementos de elevada eletronegatividade nas regiões periféricas do arco, figura 13, que tornariam a condutividade elétrica do arco mais sensível à sua temperatura. Como consequência, a passagem da corrente elétrica se concentraria na região central do arco, aumentando a densidade de energia transferida no anodo.

Um aumento da tensão de soldagem ocorre frequentemente com o uso do fluxo ativo na soldagem TIG e é atribuída por alguns autores à contração do arco. Medidas da variação de (ΔU) na passagem entre as soldagens TIG sem e com fluxos simples de óxido e cloretos e carbonatos (ΔU) na passagem entre as soldagens TIG sem e com fluxos simples de óxido e cloretos e carbonatos foram feitas [20,41] e valores relativamente pequenos foram encontrados. Por exemplo, a maior variação encontrada foi para o uso da sílica (SiO_2) como fluxo, sendo igual a 1,2 V. Admitindo-se a relação entre ΔU e a constrição do arco, poderia ser esperada uma relação entre este parâmetro e o aumento de penetração obtido na soldagem A-TIG, o que não foi encontrado por Modenesi e colaboradores [20], figura 14.

Lucas & Howse [18] testaram um fluxo para soldagem A-TIG com os processos TIG, plasma, laser e feixe de elétrons. Alterações significativas no formato do cordão foram observadas somente para os processos que apresentam a formação de plasma (incluindo a soldagem a laser) sobre a poça de fusão. Os autores consideraram este resultado como uma evidência de que, na soldagem com fluxo, fenômenos ocorrendo na poça de fusão têm um papel secundário no aumento de penetração observado na soldagem A-TIG e que este seria causado pela contração do arco pela presença neste de elemento eletronegativos. Por outro lado, Skvortsov [54], baseado em cálculos termodinâmicos, não encontrou evidências de que a captura de elétrons por átomos de elementos eletronegativos levaria à contração da coluna do arco. Mais recentemente, Lowke e colaboradores [55], a partir do desenvolvimento de um modelo matemático, chegaram à conclusão de que a captura de elétrons por átomos de oxigênio

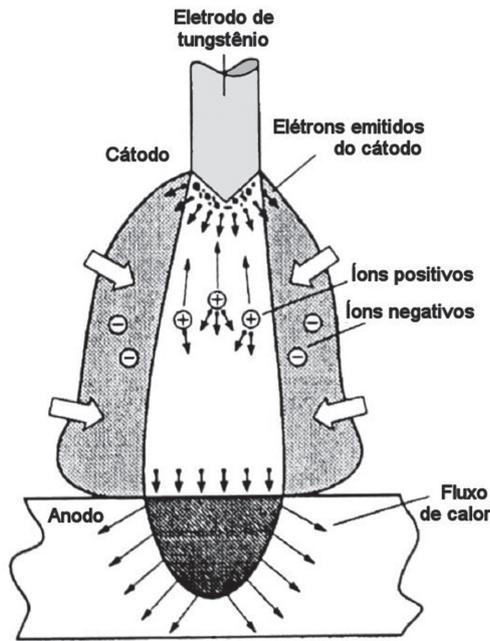


Figura 13. Desenho ilustrando o mecanismo de contração do arco por formação de anions [18].

no arco teria um efeito pouco importante no aumento de penetração na soldagem TIG com fluxos. Este modelo, por outro lado, indicou que a constrição mecânica (ver abaixo) teria um papel importante na redução das dimensões da mancha anódica e aumentaria as correntes de convecção de origem eletromagnética na poça, favorecendo um aumento da penetração.

O efeito Marangoni é, atualmente, o mecanismo mais citado para explicar o aumento de penetração observado na soldagem A-TIG com fluxos que contém óxidos em aços inoxidáveis austeníticos, por exemplo, nas referências [24,25,27,29,31,40,44]. A sua ocorrência foi demonstrada através da filmagem do movimento de partículas na superfície da poça ou no interior desta por videoradiografia [27,44], pela determinação da evolução do teor de oxigênio na solda e da evolução do formato do cordão com a composição e densidade do fluxo [24,25,45], figuras 10 e 11, e por modelagem numérica do processo [47,50]. A possibilidade de ocorrência do efeito Marangoni é também citada para a soldagem A-TIG de ligas de magnésio [34,36], embora a sua ocorrência não esteja claramente determinada neste caso [36]. Além disto, um aumento importante de penetração pode ser conseguido na soldagem A-TIG de diferentes ligas metálicas com fluxos a base de cloretos e fluoretos, sem a presença de óxidos. Nestes casos, não é, em geral, caracterizada a presença de um elemento tenso-ativo e, assim, é mais difícil considerar a possibilidade de ocorrência do efeito Marangoni, sendo necessário, portanto, considerar a ocorrência de outros mecanismos [32,36].

A constrição “mecânica” do arco é considerada por diversos autores, em conjunto ou não com o efeito Marangoni, para explicar o aumento de penetração na soldagem A-TIG tanto em ligas de magnésio e de alumínio [34,35,56] como em ligas ferrosas [21,28,34,49,57]. Esta ideia foi inicialmente aplicada no desenvolvimento de uma variante do processo A-TIG, conhecida

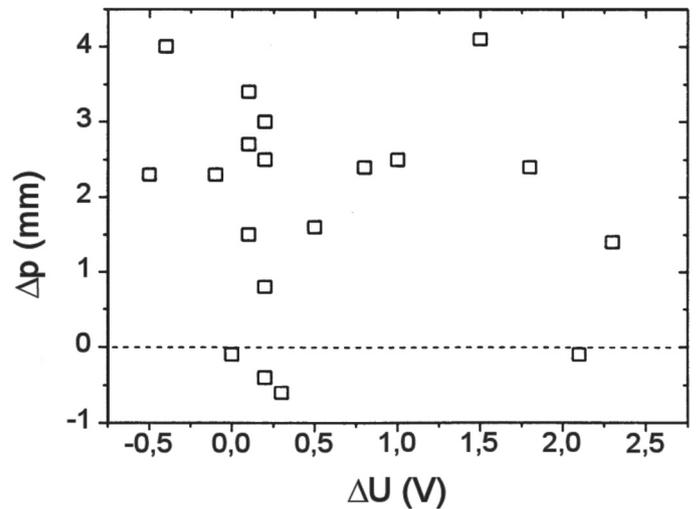


Figura 14. Ausência de relação entre as variações de tensão (ΔU) e de penetração (Δp) entre soldas obtidas com o processo TIG e A-TIG (usando diferentes fluxos de um componente) [20].

como processo FBTIG (“Flux-Bounded TIG”) em que o fluxo é aplicado como duas faixas laterais paralelas à junta [33,58].

Tanaka e colaboradores [45] consideraram o efeito Marangoni como o mecanismo responsável pelo aumento de penetração na soldagem A-TIG de aço inoxidável austenítico usando TiO_2 e SiO_2 como fluxos. A inversão nas correntes de convecção reduziria a largura do cordão aumentando o gradiente térmico e contraindo o arco. Como consequência, os efeitos eletromagnéticos (força de Lorentz) seriam também aumentados reforçando a tendência de aumentar a penetração. Os autores mostram ainda resultados de medidas da temperatura na superfície da solda (figura 15) que merecem considerações mais profundas. No caso da soldagem TIG (linha pontilhada), a variação de temperatura ao longo da poça (mais larga) é mais suave. Na poça mais estreita obtida durante a soldagem A-TIG (linha cheia), a variação de temperatura é mais abrupta e apresenta um inesperado aumento junto da borda da poça. Tanaka e colaboradores atribuíram este aumento à presença da camada de fluxo. O autor do presente

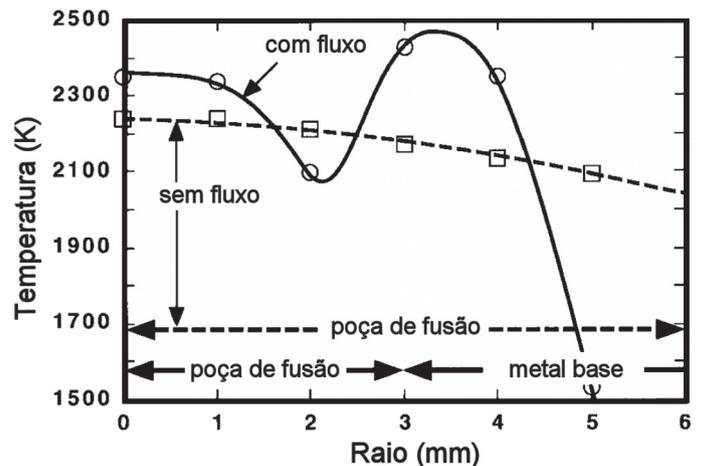


Figura 15. Distribuição transversal de temperatura durante a soldagem TIG e A-TIG com uma corrente de 200 A [45].

trabalho acredita que esta figura também mostra de forma muito forte a grande capacidade de isolamento térmico do fluxo, com este isolamento contribuindo para aumentar o gradiente térmico na poça e, desta forma, reforçar o efeito Marangoni e, ainda, levar à constrição mecânica do arco e a redução das dimensões da mancha anódica. A ideia da atuação conjunta destes dois mecanismos na soldagem A-TIG (pelo menos com fluxos a base de óxidos) já foi considerada por alguns autores [45,52].

4. Soldagem TIG com proteção ativa

A soldagem TIG com proteção ativa pode ser considerada como uma evolução da soldagem A-TIG baseada na constatação de que o aumento de penetração em soldas de aço inoxidável austenítico com fluxos a base de óxidos está associado com o aumento do teor de oxigênio na poça de fusão [24,25]. Essa variante do processo TIG convencional foi estudada e descrita principalmente por Shamping Lu e coautores em uma série de trabalhos publicados ao longo da primeira década de 2000 [59-71]. O processo foi inicialmente desenvolvido usando o equipamento usual da soldagem TIG e adicionando uma pequena quantidade (em geral, 1% ou menos) de gás ativo (O_2 ou CO_2) ao argônio ou hélio. Para evitar a oxidação do eletrodo de tungstênio pelo gás de proteção ativo, um novo projeto de tocha, com proteção dupla, foi desenvolvido, figura 16.

De forma similar ao observado na soldagem A-TIG com fluxo a base de óxidos, o perfil do cordão varia com a quantidade de oxigênio presente na poça de fusão, ocorrendo um máximo na razão P/L para teores intermediários de oxigênio na poça. As figuras 17 e 18 ilustram este efeito para soldas feitas, respectivamente, em ferro Armco e em aço inoxidável austenítico. Três regiões características podem ser consideradas (figura 17): para menor quantidade de gás ativo na proteção (Região I) e para maiores quantidades (Região III), a razão P/L é baixa, enquanto que para quantidades intermediárias (Região II), esta razão atingiria um valor máximo. Para o ferro Armco, a razão P/L atinge valores máximos para teores de oxigênio na solda entre aproximadamente 80 e 250 ppm e, para o aço inoxidável, entre 50 e 180 ppm. Estes valores são parecidos com os encontrados na soldagem A-TIG para maximizar a razão P/L

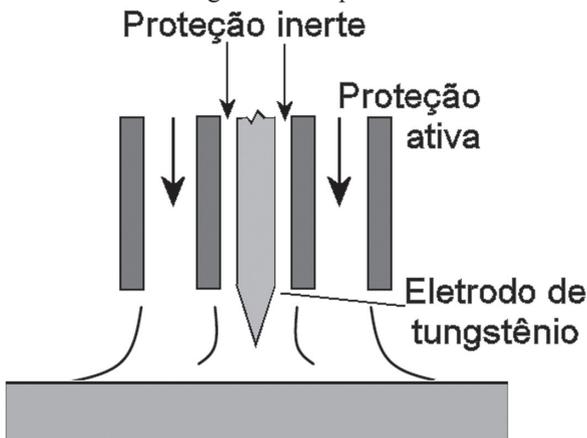


Figura 16. Tocha com proteção dupla para a soldagem TIG com gás ativo [65, 69].

(ver seção anterior).

O aumento da penetração e da razão P/L da solda foi atribuída ao efeito Marangoni, isto é, ao estabelecimento de correntes de convecção na poça de fusão de sua periferia para o centro e deste para a raiz da poça devido à inversão do gradiente da tensão superficial com a temperatura (dg/dT) [2,3]. Quando o teor de oxigênio na poça é baixo, em condições características da Região I, a convecção na poça de fusão seria do centro para a sua periferia e a poça seria larga e rasa. Com maiores quantidades de oxigênio, ocorreria a inversão do sentido da convecção na poça pelo efeito Marangoni e o cordão apresentaria maior penetração e menor largura (Região II). Para teores mais elevados de oxigênio (Região III), foi observada a formação de uma camada de óxido, principalmente Cr_2O_3 e SiO_2 , que se concentraria na periferia da poça de fusão. Lu e colaboradores [59,69] sugerem que esta camada reduziria o efeito Marangoni, reduzindo a penetração e aumentando a largura do cordão.

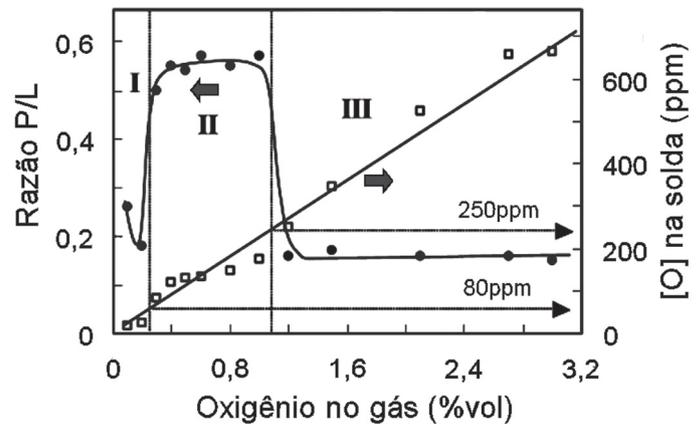


Figura 17. Razão P/L e teor de oxigênio na solda em função da quantidade de oxigênio na mistura $Ar-O_2$ para soldas em Ferro Armco [62].

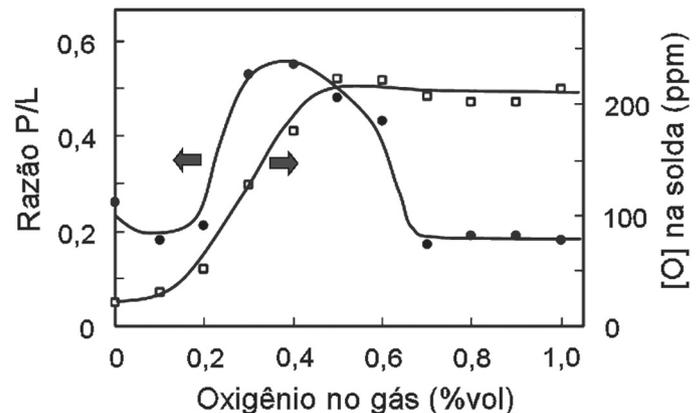


Figura 18. Razão P/L e teor de oxigênio na solda em função da quantidade de oxigênio na mistura $Ar-O_2$ para soldas em aço inoxidável austenítico [62].

Valores da razão P/L reportados nos trabalhos citados variam consideravelmente em função dos gases usados, do projeto da tocha e de outras condições de soldagem. Considerando o uso de

Ar-O₂ e Ar-CO₂ como gás de proteção ativo (com Ar puro como proteção do eletrodo no caso do uso da tocha com proteção dupla) a razão P/L na Região II varia entre 0,4 e 0,65 desde que a velocidade de soldagem não seja muito baixa, da ordem de 1 mm/s, condições que favorecem maiores razões P/L. Para as Regiões I e II, os valores reportados da razão P/L ficam em torno de 0,2 a 0,3, típicos de aços inoxidáveis austeníticos com teores baixos de enxofre. Em testes feitos com gás de proteção contendo He, valores mais elevados da razão P/L foram obtidos e estes, em alguns casos, foram superiores a 1,0 (figura 19).

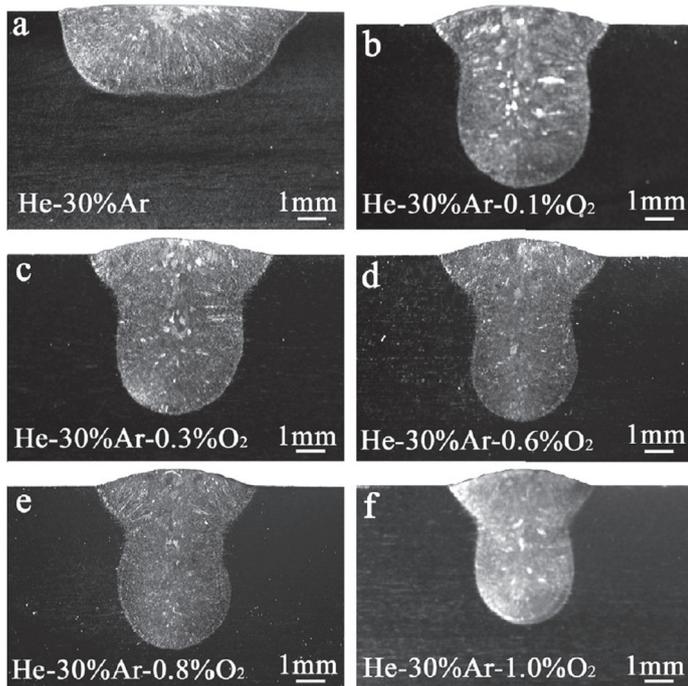


Figura 19. Variação do formato do cordão com misturas ativas He-30%Ar-O₂ obtidos em testes 1 mm de comprimento de arco [68].

5. Considerações finais

O processo de soldagem TIG é caracterizado, quando comparado com a maioria dos outros processos de soldagem a arco, por uma condição operacional mais estável e pela possibilidade de um controle mais fino e preciso desta condição e, em particular, do funcionamento do arco elétrico. Contudo, exatamente por operar sob a influência de menos perturbações, o processo se mostra, em algumas situações, fortemente sensível a pequenas mudanças no metal base ou no ambiente do arco elétrico. O presente trabalho apresentou uma revisão sobre as características e os modelos propostos para três destas situações que estão claramente relacionadas, mas que, no conhecimento do autor, não foram analisadas em conjunto. A 1ª situação (ou 1º caso) é, em geral, indesejável por representar uma perda de controle e reprodutibilidade dos resultados de uma operação de soldagem. Neste caso, uma variável do processo (a composição química do metal base) é mantida dentro de limites usualmente aceitáveis (dentro dos limites da especificação do produto),

mas causa mudanças pronunciadas no formato do cordão. Em contraposição, as duas outras situações ocorrem de forma controlada como variantes do processo TIG convencional. Elas permitem aumentar substancialmente a capacidade de penetração do processo TIG e, ainda, permitem reduzir os efeitos adversos do 1º caso.

Variações no formato do cordão de solda em decorrência de pequenas diferenças na composição química do metal base (1º caso) e do uso de gás de proteção ativo (2º caso) são associadas atualmente, pela grande maioria dos autores, à ocorrência do efeito Marangoni. Para as alterações resultantes da soldagem TIG com fluxo ativo, contudo, nenhum mecanismo parece ser aplicável, pelo menos de forma isolada, em todas as situações possíveis.

No primeiro caso, para ligas ferrosas, o elemento ativo principal é o enxofre, embora variações no teor de oxigênio, resultante, em geral, da menor ou maior quantidade de elementos com elevada afinidade pelo oxigênio, possam também ter algum efeito. No terceiro caso, a situação é ainda mais simples, sendo o teor de oxigênio na poça de fusão controlado pela quantidade de gás ativo (CO₂ ou O₂) na proteção e por outros parâmetros operacionais.

No caso da soldagem A-TIG de ligas ferrosas com fluxos contendo óxidos, a importância do efeito Marangoni na determinação do formato do cordão parece estar bem estabelecida. Contudo, para ligas não ferrosas e, particularmente, para quando fluxos que não contém óxidos são usados, mecanismos alternativos precisam ser considerados. A constrição química pela formação de ânions nas regiões mais frias do arco é, ainda atualmente, um dos mecanismos mais considerados embora resultados de alguns modelos matemáticos sugiram que este efeito possa ser desprezível. A constrição mecânica é uma outra possibilidade considerada atualmente, mas a sua importância para o caso de fluxos de menor temperatura de fusão, como os baseados em cloretos e fluoretos, precisa ser avaliada. Por outro lado, resultados diversos sugerem a sua ocorrência na soldagem com fluxos refratários, particularmente, aqueles a base de sílica. Em particular, existem resultados que sugerem que a constrição mecânica ocorre na soldagem A-TIG de aços inoxidáveis e ajuda a aumentar o efeito Marangoni. Em resumo, ainda existe muito a se aprender nesta área.

Não é possível comparar com segurança as mudanças do formato do cordão que ocorrem em cada um dos casos. No primeiro caso, as mudanças decorrem dos teores de enxofre e oxigênio no metal base e, também, de teores de outros elementos que afetam o comportamento dos primeiros na poça de fusão. Nos outros dois casos, elas dependem dos mesmos fatores, mas, também, de detalhes específicos de cada um; por exemplo, composição e quantidade de fluxo usado no segundo caso e composição dos gases de proteção, teor de gás ativo e projeto da tocha no segundo caso. Além disto, os trabalhos consultados sempre focam em apenas um dos casos e, desta forma, existem importantes diferenças de condições operacionais para os resultados relacionados com cada caso.

De qualquer forma, considerando a média dos dados disponíveis para soldagem de aço inoxidável austenítico com proteção a base de argônio, o valor médio da razão P/L na

soldagem TIG convencional em metal base com baixo teor de enxofre (e de oxigênio) ficou em torno de 0,2. Valores similares foram observados, nos dois outros casos para os dados de comparação com a soldagem TIG convencional, isto é, os aços usados na grande maioria destes estudos podem ser considerados como de baixo teor de enxofre. Ainda no 1º caso, resultados com aços com maior teor de enxofre (ou de oxigênio) indicam uma razão P/L em torno de 0,45. Na soldagem A-TIG, esta razão atingiu valores médios em torno de 0,7 e, na soldagem TIG com gás ativo, em torno de 0,6. Assim, estas duas variantes do processo TIG permitem obter maiores razões P/L e, desta forma, controlar ou minimizar as mudanças oriundas da variação de composição química do metal base. Ambas as variantes resultam em um importante aumento de penetração, mas a um custo, o aumento da oxidação da poça de fusão com potencial perda de elementos de liga (em particular, de cromo, no caso da soldagem de aços inoxidáveis). Embora os poucos trabalhos existentes que avaliam os aspectos metalúrgicos da soldagem A-TIG e TIG com gás ativo indiquem poucas mudanças na microestrutura da solda e, mesmo, vantagens em termos de redução de distorção, este é, ainda, um tema que necessita ser melhor estudado.

5. Agradecimentos

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte dado, o qual foi fundamental para o desenvolvimento de alguns trabalhos mencionados neste artigo.

6. Referências Bibliográficas

- [1] METCALFE, J. C., QUIGLEY, M. B. C., Arc and pool instability in GTA welding, *Welding Journal*, 56 (5), Maio de 1977, 133s-139s.
- [2] HEIPLE, C. R., ROPER, J. R., Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry, *Welding Journal*, 61 (4), Abril 1982, 97s-102s.
- [3] HEIPLE, C. R., ROPER, J. R., STAGNER, R. T., ADEN, R. J., Surface active elements effects on the shape of GTA, laser, and electron beam welds, *Welding Journal*, 62 (3), Março de 1983, 72s-77s.
- [4] SAVAGE, W. F., NIPPES, E. F., GOODWIN, G. M., Effect of Minor Elements on Fusion Zone Dimensions of Inconel 600, *Welding Journal*, Abril de 1977, 126s-132s.
- [5] BENNETT, W. S., MILLS, G. S. (1974) GTA Weldability Studies on High Manganese Stainless Steel, *Welding Journal*, 53 (12), Dezembro de 1974, 548s-553s.
- [6] LUDWIG, H. C., Current Density and Anode Spot Size in the Gas Tungsten Arc, *Welding Journal*, 47 (5), Maio de 1968, 234s-240s.
- [7] SPICER, R. A., BAESLACK III, W. A., KELLY, T. J., Elemental Effects on GTA Spot Weld Penetration in Cast Alloy 718, *Welding Journal*, 69 (8), Agosto de 1990, 285s-288s.
- [8] SHIRALI, A. A., MILLS, K. C., The Effect of Welding Parameters on Penetration in GTA Welds, *Welding Journal*, 72 (7), Julho de 1993, 347s-353s.
- [9] LEINONEN, J. I., Heat-to-Heat Variations in Gas-Tungsten-Arc (GTA) Weld Penetration of Austenitic Stainless Steels, *J. Materials for Energy Systems*, 4 (4) Março de 1987, 409-413
- [10] CHASE JR., T. F., SAVAGE, W. F., Effect of Anode Composition on Tungsten Arc Characteristics, *Welding Journal*, Novembro de 1971, 467s-473s.
- [11] MISHRA, S., LIENERT, T.J., JOHNSON, M.Q., DEBROY, T., An experimental and theoretical study of gas tungsten arc welding of stainless steel plates with different sulfur concentrations, *Acta Materialia* 56 (2008) 2133–2146.
- [12] MILLS, K. C., KEENE, B. J., BROOKS, R. F., SHIRALI, A., Marangoni effects in welding, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (1998) 356, 911-925.
- [13] PIERCE, W., BURGARDT, P., OLSON, D. L., Thermocapillary and Arc Phenomena in Stainless Steel Welding, *Welding Journal*, Feb. 1999, 45s-52s.
- [14] KOU, S., LIMMANEEVICHITR, C., WEI, P. S., Oscillatory Marangoni Flow: A Fundamental Study by Conduction-Mode Laser Spot Welding, *Welding Journal*, Dezembro de 2011, 229s-240s.
- [15] PITSCHENEDER, W., DEBROY, T., MUNDRA, K., EBNER, R., Role of sulfur and processing variables on the temporal evolution of weld pool geometry during multikilowatt laser beam welding of steels, *Welding Journal, Research Supplement*, March 1996, 71s-80s
- [16] KOU, S., LIMMANEEVICHITR, C., WEI, P. S., Oscillatory Marangoni Flow: A Fundamental Study by Conduction-Mode Laser Spot Welding, *Welding Journal*, Dezembro de 2011, 229s-240s
- [17] JARVIS, B. L., Chapter 3: Gas tungsten arc welding, In: *New developments in advanced welding*, Editado por Nasir Ahmed, Woodhead Publishing, 2005, 308p.
- [18] HOWSE, D. S., LUCAS, W., An investigation into arc constriction by active fluxes for TIG (A-TIG) welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 5 (3), 2000, 189-193
- [19] MAJETICH, C., YEO, R. B. C., Methods of Welding Stainless Steel, U.S. Patent, 3,584,187, 1971, 3p.
- [20] MODENESI, P.J., APOLINÁRIO, E.R., PEREIRA, I.M., TIG Welding with single-component fluxes, *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1), 2000, 260-265
- [21] AZEVEDO, A. G. L., FERRARESI, V. A., FARIAS, J. P., Soldagem de um Aço Inoxidável Ferrítico com o Processo A-TIG, *Soldagem Insp.*, 14 (1) p.2-9, Jan./Mar. de 2009
- [22] LINZHI WANG, JUN SHEN, NAN XU, Effects of TiO₂ coating on the microstructures and mechanical properties of tungsten inert gas welded AZ31 magnesium alloy joints, *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 7276-7284
- [23] KOVALENKO, D. V., PAVLYAK, D. A., SUDNIK, V. A., KOVALENKO, I. V., Adequacy of thermohydrodynamic model of through penetration in TIG and A-TIG welding of Nimonic-75 Nickel alloy, *The Paton Welding Journal* 10 2010, 2-6
- [24] SHANPING LU, HIDEOTOSHI FUJII, HIROYUKI SUGIYAMA, MANABU TANAKA, KIYOSHI NOGI, Weld penetration and Marangoni convection with oxide fluxes in GTA welding, *Materials Transactions* 43 (11) 2002, 2926-2931
- [25] SHANPING LU, HIDEOTOSHI FUJII, HIROYUKI SUGIYAMA, MANABU TANAKA, KIYOSHI NOGI, Marangoni

convection and welding penetration in A-TIG welding - Transactions of JWRI 32(1) 2003 79-82

[26] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, HIROYUKI SUGIYAMA, KIYOSHI NOGI, Mechanism and Optimization of Oxide Fluxes for Deep Penetration in Gas Tungsten Arc Welding, Metallurgical and Materials Transactions A, 34A, Setembro de 2003, 1901-1907

[27] CHUNLIN DONG, YIFENG ZHU, GUOMING CHAI HUI ZHANG, SEIJI KATAYAMA, Preliminary study on the mechanism of arc welding with the activating flux, In Aeronautical Manufacturing Technology, Supplement 2004. Paper presented at International Symposium, High Energy Density Beam Processing Technology, Kunming, China, 12-17 de setembro de 2004. p. 271-278

[28] SHYU, S.W., HUANG, H.Y., TSENG, K.H., CHOU, C.P., Study of the Performance of Stainless Steel A-TIG Welds, JMEPEG (2008) 17:193-201

[29] KUANG-HUNG TSENG, CHIH-YU HSU, Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds, Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) 503-512

[30] KUANG-HUNG TSENG, KUANG-LUNG CHEN, Comparisons Between TiO₂- and SiO₂-Flux Assisted TIG Welding Processes, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 12, 6359-6367, 2012

[31] LECONTE, S., PAILLARD, P., SAINDRENAN, J., Effect of fluxes containing oxides on tungsten inert gas welding process, Science and Technology of Welding and Joining, 11 (1), 2006, 43-47

[32] LECONTE, S., PAILLARD, P., CHAPPELLE, P., HENRI-ON, G., SAINDRENAN, J., Effects of flux containing fluorides on TIG welding process, Science and Technology of Welding and Joining, 12 (2), 2007, 120-126.

[33] SIRE, S., RÜCKERT, G., MARYA, S., Élioration des performances du soudage TIG des alliages d'aluminium: Le procédé FBTIG, Soudage et techniques connexes, 56 (11/12), 2002, 11-13

[34] LIU, L. M., ZHANG, Z.D., SONG, G., WANG, L., Mechanism and Microstructure of Oxide Fluxes for Gas Tungsten Arc Welding of Magnesium Alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, 38A, Março de 2007, 649-658

[35] ZHAODONG ZHANG, LIMING LIU, HAO SUN, LAI WANG, AC TIG welding with single-component oxide activating flux for AZ31B magnesium alloys, J. Mater. Sci., 43, 2008, 1382-1388

[36] Marya, M., Edwards, G.R.: Chloride Contributions in Flux-Assisted GTA Welding of Magnesium Alloys - Welding Journal, Dezembro de 2002, 291s-298s

[37] OLIVEIRA, W. C., Estudo do efeito de Fluxos na soldagem ATIG de alumínio, Tese, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007, 182p.

[38] PERRY, N., Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables, Tese, Ecole Centrale de NANTES, 2000, 243p.

[39] MODENESI, P. J., COLEN NETO, P., APOLINÁRIO, E. R., DIAS, K. B., Efeito da Densidade do Fluxo e da presença de aditivos na Soldagem ATIG de Aço Inoxidável Austenítico,

Soldag. Insp. São Paulo, 18 (2), Abr./Jun. de 2013, 118-126

[40] BERTHIER, A., PAILLARD, P., CARIN, M., VALENSI F., PELLERIN, S., TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation Part 1: Identification of Marangoni effect, Science and Technology of Welding and Joining, 17 (8), 2012, 609-615

[41] MIDDEL, W., DEN OUDEN, G., The effect of additives on arc characteristics in GTA welding, In: Proceedings of the 8th International Conference in Welding Research, ASM International, 1-5 de junho de 1998, 394-399

[42] EROSHENKO, L. E., PRILUTSKII, V. P., ZAMKOV, V. N., Examination of the glow of anode vapours in the arc in TIG welding titanium in argon through a flux layer, The Paton Welding Journal, 9 (11), 1997, 11-13.

[43] PERRY, N., MARYA, S., New perspectives of flux assisted GTA welding in titanium structures, p. 55-62, 1999. Obtido em: www.wahchanglabs.com/pdf/1999/1999009.pdf em janeiro de 2009.

[44] RUI-HUA ZHANG, JI-LUAN PAN, SEIJI KATAYAMA, The mechanism of penetration increase in A-TIG welding, Front. Mater. Sci., 5(2), 2011, 109-118

[45] M. Tanaka, T. Shimizu, H. Terasaki, F. Koshi-ishi, C.-L. Yang, Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding, Science and Technology of Welding and Joining, 5 (6) 2000 397-402

[46] KUANG-HUNG TSENG, Development and application of oxide-based flux powder for tungsten inert gas welding of austenitic stainless steels, Powder Technology 233, 2013, 72-79.

[47] YUZHEN ZHAO, YAOWU SHI, YONGPING LEI, The Study of Surface-Active Element Oxygen on Flow Patterns and Penetration in A-TIG Welding, Metallurgical and Materials Transactions B, 37B, Junho de 2006, 485- 493

[48] SÁNDOR, T., Comparison of penetration profiles of different TIG process variations, In: Stainless Steel World Conference 2009, Nov. 12, 2009, Artigo P9047, 16p

[49] HUANG, H. Y., SHYU, S. W., TSENG, K. H., CHOU, C. P., Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel, Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10 (5), 566-573

[50] SÁNDOR, T., MEKLER, C., DOBRÁNSZKY, J., KAPTAY, G., An Improved Theoretical Model for A-TIG Welding Based on Surface Phase Transition and Reversed Marangoni Flow, Metallurgical and Materials Transactions A, 44A, Janeiro de 2013, 351-361.

[51] KUMAR, V., LUCAS, B., HOWSE, D., MELTON, G., RAGHUNATHAN, S., VILARINHO, L., Investigation of the A-TIG mechanism and the productivity benefits in TIG welding, In: 15th International Conference on the Joining of Materials (JOM 15) and 6th International Conference on Education in Welding (ICEW 6) Helsingor, Denmark, 3-6 de maio de 2009, 11p

[52] LI, Q., WANG, X., ZOU, Z., WU, J., Effect of activating flux on arc shape and arc voltage in tungsten inert gas welding, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 17, 2007, 486-490

[53] SIMONINK, A. G., The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of electronegative elements, Welding Production, 3, 1976, 49-51.

- [54] SKVORTSOV, E. A., Role of electronegative elements in contraction of the arc discharge, *Welding International*, 12 (6), 1998, 471-475
- [55] LOWKE, J. J., TANAKA, M., USHIO, M., Mechanisms giving increased weld depth due to a flux, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 38, 2005, 3438-3445
- [56] LIMING LIU, ZHAODONG ZHANG, GANG SONG, YONG SHEN, Effect of Cadmium Chloride Flux in Active Flux TIG Welding of Magnesium Alloys, *Materials Transactions*, 47 (2), 2006, 446-449
- [57] RÜCKERT, G., HUNEAU, B., MARYA, S., Optimizing the design of silica coating for productivity gains during the TIG welding of 304L stainless steel, *Materials and Design*, 28, 2007, 2387-2393
- [58] SIRE, S., MARYA, S., Productivity Gains by Flux Bounded TIG Welding of Aluminum, *Materials Science Forum*, 4033, 2003, 426-432
- [59] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O₂ and Ar-CO₂ shielded GTA welding, *Materials Science and Engineering A*, 380, 2004, 290-297
- [60] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Marangoni Convection in Weld Pool in CO₂-Ar-Shielded Gas Thermal Arc Welding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35A, Setembro de 2004, 2861-2867
- [61] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Sensitivity of Marangoni convection and weld shape variations to welding parameters in O₂-Ar shielded GTA welding, *Scripta Materialia* 51, 2004, 271-277
- [62] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Marangoni Convection and Gas Tungsten Arc Weld Shape Variations on Pure Iron Plates, *ISIJ International*, 46 (2), 2006, 276-280
- [63] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, T. SATO, Effect of oxygen content in He-O₂ shielding gas on weld shape in ultra deep penetration TIG, *Science and Technology of Welding and Joining*, 12 (8), 2007, 689-695.
- [64] SHANPING LU, DIANZHONG LI, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Time Dependent Weld Shape in Ar-O₂ Shielded Stationary GTA Welding, *J. Mater. Sci. Technol.*, 23 (5), 2007, 650-654
- [65] HIDETOSHI FUJII, SHANPING LU, T. SATO, KIYOSHI NOGI, Effect of oxygen content in He-O₂ shielding gas on weld shape for ultra deep penetration TIG, *Transactions of JWRI* 37 (1) 2008 19-26
- [66] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Marangoni convection and weld shape variations in He-CO₂ shielded gas tungsten arc welding on SUS304 stainless steel, *J Mater Sci.*, 43, 2008, 4583-4591
- [67] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Weld shape variation and electrode protection under Ar-(Ar-O₂) double shielded GTA welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 14 (8), 2009, 726-733
- [68] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Arc ignitability, bead protection and weld shape variations for He-Ar-O₂ shielded GTA welding on SUS304 stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2009, 1231-1239
- [69] LI, D. J., LU, S. P., LI, D. Z., LI, Y. Y., Mechanisms increasing welding efficiency during new development of double shielded TIG process, *Science and Technology of Welding and Joining*, 15 (1), 2010, 528-533
- [70] SHANPING LU, HIDETOSHI FUJII, KIYOSHI NOGI, Weld Shape Variation and Electrode Oxidation Behavior under Ar-(Ar-CO₂) Double Shielded GTA Welding, *J. Mater. Sci. Technol.*, 26 (2), 2010, 170-176
- [71] DONGJIE LI, SHANPING LU, DIANZHONG LI, YIYI LI, Weld pool shape variations and electrode protection in double shielded TIG welding, *Advanced Materials Research*, 97-101, 2010, 3978-3981