



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO **EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“AVALIAÇÃO DE FLUXOS ATIVOS NA FORMAÇÃO DE CORDÕES DE
SOLDA EM AÇO ESTRUTURAL A36 E AÇO INOXIDÁVEL ABNT 304 PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW”**

Luiz Gustavo de Oliveira Abreu

Ouro Preto, julho de 2019

Luiz Gustavo de Oliveira Abreu

**“AVALIAÇÃO DE FLUXOS ATIVOS NA FORMAÇÃO DE CORDÕES DE
SOLDA EM AÇO ESTRUTURAL A36 E AÇO INOXIDÁVEL ABNT 304 PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Rangel Porcaro

Ouro Preto, julho de 2019



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

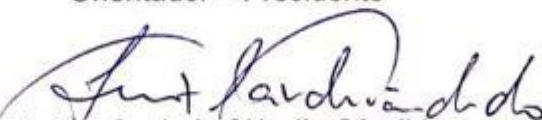


ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Ao décimo oitavo dia do mês de julho de 2019, às 08 horas e 30 minutos, no Laboratório de Tratamentos Térmicos e Metalografia (LTM) do DEMET, no prédio anexo à Escola de Minas, Campus, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **Luiz Gustavo de Oliveira Abreu** sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Rodrigo Rangel Porcaro (Orientador), Luiz Cláudio Cândido e Geraldo Lúcio de Faria. O aluno apresentou a monografia intitulada: *"Avaliação de Fluxos Ativos na Formação de Cordões de Solda em Aço Baixo Carbono e Inoxidável Austenítico pelo Processo GTAW"*. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 18 de julho de 2019.


Prof. D.Sc. Rodrigo Rangel Porcaro
Orientador – Presidente


Prof. D.Sc. Luiz Cláudio Cândido
Membro


Prof. D.Sc. Geraldo Lúcio de Faria
Membro


Luiz Gustavo de Oliveira Abreu
Aluno

AVALIAÇÃO DE FLUXOS ATIVOS NA FORMAÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EM AÇO ESTRUTURAL A36 E AÇO INOXIDÁVEL ABNT 304 PELO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW⁽¹⁾

Luiz Gustavo de Oliveira Abreu⁽²⁾, Rodrigo Rangel Porcaro⁽³⁾

RESUMO

Os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados na indústria alimentícia, farmacêutica, química, petroquímica, aeroespacial e de equipamentos hospitalares, devido à sua elevada resistência à corrosão uniforme. Neste contexto, a união desses materiais por um processo de soldagem se torna de suma importância. O processo de soldagem TIG é amplamente usado devido a sua versatilidade, alta qualidade, bem como o bom acabamento da solda. Uma solução para se aumentar a aplicabilidade do processo TIG e melhorar tanto sua produtividade, quanto a penetração da solda é o processo de soldagem A-TIG. Os ganhos são obtidos por meio da aplicação de uma camada de material chamado de fluxo ativo. O efeito do fluxo é a constrição do arco, ou seja, redução do diâmetro da coluna do arco, com o conseqüente aumento da densidade de corrente, o que aumenta o efeito do jato de plasma na poça líquida de soldagem, aumentando a penetração e conseqüentemente a sua produtividade. O objetivo do trabalho foi avaliar a influência de três diferentes fluxos ativos, aplicados sobre chapas de aço inoxidável austenítico e chapas de aço estrutural A36, avaliando os efeitos nos seguintes parâmetros: penetração, largura do cordão na face e área fundida. Análises macrográficas foram realizadas para determinar os aspectos visuais dos cordões de solda obtidos. Análises micrográficas determinaram a morfologia dos constituintes presentes no metal base e nos cordões de solda obtidos. Ensaio de microdureza *Vickers* foi empregado para avaliar os efeitos da utilização dos fluxos na dureza do material. Os resultados indicaram que os fluxos ativos formados a partir de revestimento celulósico e cloreto de cálcio têm potencial para melhorar a penetração e a produtividade na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos e do aço estrutural A36.

Palavras-chaves: Soldagem A-TIG; Metalurgia da Soldagem; Aço Inoxidável Austenítico; Aço Estrutural A36; Fluxos Ativos.

(1) Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

(2) Engenheiro Metalúrgico, Graduando, Estudante, DEMET, EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

(3) Engenheiro Metalúrgico, Dr., Professor, DEMET, EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

ASSESSMENT OF ACTIVE FLUXES IN FORMATION OF WELDING BEAD IN A36 STRUCTURAL STEEL AND ABNT 304 STAINLESS STEEL BY THE GTAW WELDING PROCESS

ABSTRACT

Austenitic stainless steels are widely used in the food, pharmaceutical, chemical, petrochemical, aerospace and hospital equipment industries due to its high corrosion resistance. In this context, the joining of these materials by a welding process becomes of major importance. TIG welding process is widely used due to its versatility, high quality as well as the good weld finish. A solution for increasing the applicability of the TIG process, improving your productivity and weld penetration is the A-TIG welding process. Gains are obtained by applying a layer of material called the active flux. Effect of flux is the constriction of the electric arc, which is, the reduction of electric arc column diameter, with the consequent increased current density, which increases the plasma jet effect in the welding liquid pool, increasing the penetration and consequently their productivity. The objective of this work was to assessment the influence of three different active fluxes applied on austenitic stainless steel plates and structural steel plates, evaluating the following parameters: penetration, weld bead width on face and fused area. Macrographic analyzes were performed to determine the visual aspects of the weld beads. Micrographic analysis determined the morphology of the constituents present in the base metal and the weld beads. Vickers microhardness test was employed to evaluate the effects of flux utilization on material hardness. Results indicated that the active fluxes formed from cellulosic coating and calcium chloride have the potential to improve penetration and welding productivity of ABNT304 stainless steels and A36 structural steel.

Key words: Welding A-TIG; Welding Metallurgy; ABNT 304 Stainless Steels; A36 Structural Steel; Actives Fluxes.

(1) Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

(2) Engenheiro Metalúrgico, Graduando, Estudante, DEMET, EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

(3) Engenheiro Metalúrgico, Dr., Professor, DEMET, EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

1 INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis austeníticos são ligas ferrosas resistente à corrosão em diversos ambientes. São compostas basicamente por ferro-cromo-níquel (Fe-Cr-Ni) e apresentam estrutura predominantemente austenítica à temperatura ambiente, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Formam o grupo mais usado e numeroso de aços inoxidáveis, sendo o tipo mais comum os aços ABNT 304. Apresentam, à temperatura ambiente, um baixo limite de escoamento, um limite de resistência alto e grande ductilidade. Todos os aços inoxidáveis austeníticos apresentam boa soldabilidade, maior resistência elétrica e menor condutividade térmica em relação aos aços inoxidáveis ferríticos. Os três processos mais utilizados para a soldagem de aços inoxidáveis são SMAW, GTAW e GMAW, embora vários outros sejam também usados (MODENESI, 2011). Neste cenário, o processo GTAW é utilizado quando se precisa um bom acabamento e uma elevada qualidade das soldas, podendo ser facilmente aplicado de forma mecanizada ou automatizada.

Por outro lado, o processo de soldagem GTAW 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 que os demais processos de soldagem. 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, particularmente aumentando o seu valor em mais de 100%, por mudanças relativamente simples no processo podem, potencialmente, aumentar a aplicação da soldagem GTAW de forma expressiva. O uso de fluxos ativos é uma abordagem proposta dentro deste escopo (MODENESI e APOLINÁRIO, 2013).

O processo chamado de A-TIG (“Active Flux TIG”) é o mesmo processo GTAW (ou TIG) convencional sem a necessidade de nenhum tipo de dispositivo especial. A diferença encontra-se na adição de uma fina camada de um fluxo na superfície da junta antes da soldagem (AZEVEDO *et al.*, 2005). Diversos trabalhos publicados tentam explicar os mecanismos de constrição e o aumento da penetração observados no processo de soldagem A-TIG. Entre eles os dois mecanismos mais citados para justificar o aumento

na penetração são: (i) a constrição do arco a partir de reações entre o arco e o fluxo, o que causa um aumento na densidade de corrente; e (ii) a inversão no sentido do fluxo de convecção em função de reações químicas com a poça de fusão (MARYA, 2002; PERRY *et al.*, 1998; FAN *et al.*, 2001 e WALSH *et al.*, 1998 *apud* AZEVEDO *et al.*, 2005).

A maioria dos pesquisadores acredita que o efeito de constrição ocorre devido ao fato de que as moléculas do fluxo dissociadas pelo intenso calor gerado pelo contato com o arco elétrico são capazes de capturar elétrons nas regiões periféricas do arco (mais frias), formando ali íons negativos. A captura de elétrons por parte destes elementos reduz a densidade periférica de elétrons livres no arco e, desta forma, o principal canal condutor de eletricidade é reduzido, resultando em um efeito de constrição (redução do diâmetro da coluna do arco elétrico) (MIDDEL e DEN OUDEN, 1998 e PERRY *et al.*, 1998 *apud* AZEVEDO *et al.*, 2005).

Os fluxos comerciais normalmente são compostos de óxidos, cloretos e fluoretos, interferem na penetração do cordão de solda para os mesmos parâmetros de soldagem utilizados. E os elementos isolados do tipo TiO_2 , SiO_2 , $CaCO_3$, CaF_2 , $CaCl_2$, $LiCl$, ou em combinações de 2 ou 3 fluxos na soldagem A-TIG são utilizados na fabricação desses fluxos (KUNRATH e PARIS, 2005).

Neste contexto, este trabalho apresenta os resultados do estudo sobre o efeito do processo A-TIG em um aço inoxidável ABNT 304 e de um aço estrutural A36, avaliando a influência dos fluxos: óxido de titânio comercialmente puro (TiO_2); cloreto de cálcio comercialmente puro ($CaCl_2$) e revestimento de eletrodo do tipo celulósico, pois o revestimento é composto de quantidades significativas de TiO_2 , SiO_2 , além de materiais celulósicos e também pela geração de H_2 , o que aumentaria o poder calorífico do arco (KUNRATH e PARIS, 2005), aplicados sobre o metal base, sobre os aspectos macroestruturais e microestruturais de cordões de solda autógenos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para a realização dos experimentos do presente trabalho foram utilizados dois aços na forma de chapas com espessura de 3mm, de modo a obter cordões de solda autógenos pelo processo GTAW e para verificar a influência de fluxos ativos. Um dos aços foi do

tipo inoxidável austenítico, ABNT 304, especificação química na Tabela 2.1. O outro material foi um aço comum ao carbono, de aplicação estrutural ASTM A36, cuja especificação é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.1. Especificação química para o aço inoxidável austenítico (ABNT 304), % em massa.

C (máx.)	Cr	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Si (máx.)	Ni	Outros
0,08	18,00-20,00	2,00	0,045	0,03	0,75	8-10,50	0,10

Tabela 2.2. Especificação química para o aço estrutural (ASTM A36), % em massa.

C (máx.)	Cr	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Si (máx.)	Ni	Outros
0,26	-	0,90	0,04	0,05	0,40	-	0,20

2.2. Fluxos Ativos

Foram empregados três fluxos ativos na soldagem GTAW: fluxo A – óxido de titânio comercialmente puro (TiO_2); fluxo B – cloreto de cálcio comercialmente puro ($CaCl_2$) e fluxo C – revestimento de eletrodo do tipo celulósico. Os fluxos foram escolhidos com base na disponibilidade e revisões bibliográficas (AZEVEDO *et al.*, 2005, MODENESI *et al.*, 2013, MODENESI, 2013 e KUNRATH e PARIS, 2005).

Para preparação dos fluxos, os materiais que precisavam ser processados, no caso, apenas o revestimento de eletrodo do tipo celulósico, foi pulverizado manualmente em gral com pistilo, até obter uma granulometria menor que 100#. Os demais já foram obtidos na forma pulverizada. A aplicação na superfície das chapas antes da soldagem foi feita por meio de um “spray” manual, utilizando uma suspensão em álcool etílico absoluto para os fluxos A e C, e uma solução para o fluxo B, como será melhor detalhado no item seguinte.

2.3. Soldagem

As soldas foram produzidas pelo dispositivo de soldagem mecanizado construído para soldagem na posição plana, com controles de velocidade e de comprimento de arco e que está localizado no Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET/EM), conforme ilustra a Figura 2.1. A injeção de gás de proteção

foi feita na forma de purga simultaneamente à solda, criando uma atmosfera de gás inerte por baixo para uma melhor proteção gasosa da poça de fusão.



Figura 2.1. Dispositivo de soldagem mecanizada, do Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET/EM).

Para avaliar os efeitos da presença dos fluxos ativos nos diferentes materiais, o fluxo ativo foi aplicado na metade da superfície das amostras que foram submetidas à soldagem, conforme Figura 2.2. Deste modo, uma parte do cordão foi obtida com o processo GTAW convencional e a outra metade com o processo A-TIG.

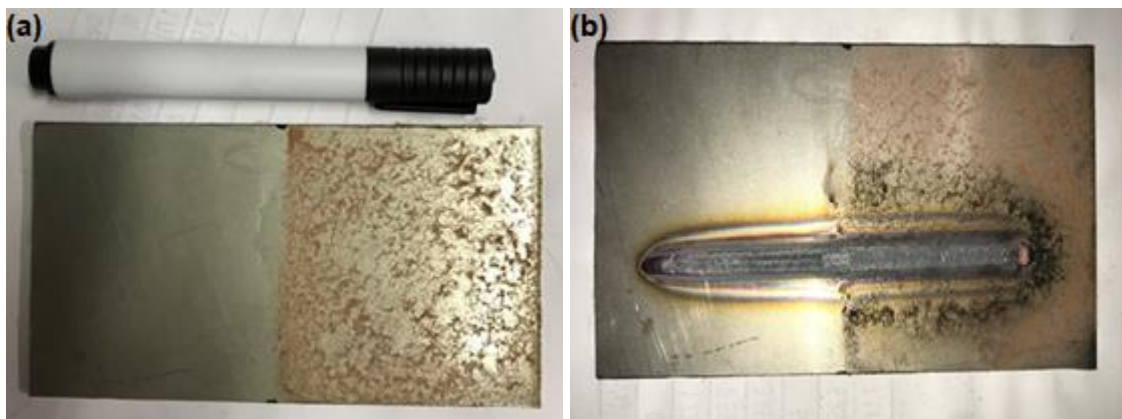


Figura 2.2. Figura indicando o procedimento para avaliação dos efeitos de fluxo ativo na soldagem TIG (Neste caso, revestimento de eletrodo celulósico). O fluxo ativo foi aplicado na metade da superfície das amostras. (a) Pré-soldagem e (b) Pós-soldagem.

Os parâmetros mais adequados de soldagem GTAW, no caso, limites de corrente, velocidade de soldagem e valor fixo para o fluxo de gás foram determinados em função da espessura da chapa, baseados na literatura e em experimentos exploratórios, de modo a não se obter penetração total sem a utilização do fluxo. Ensaios exploratórios também foram realizados em chapas de aço estrutural.

Foi utilizada uma fonte GTAW, para a soldagem autógena, com gás de proteção argônio comercialmente puro com vazão de 12 l/min (2 l/min na parte inferior e 10 l/min na parte superior). O processo de soldagem foi efetuado de forma mecanizada para manter a velocidade constante, onde foi realizado um cordão sobre o centro das chapas, por meio de eletrodos de tungstênio, com 2% de tório, de diâmetro igual a 1,6mm. A corrente de soldagem foi ajustada em 85A, e a velocidade de soldagem em 144 mm/min (2,4 mm/s). Todas as soldas foram realizadas na posição plana, com polaridade direta CC⁻.

2.4. Caracterização Estrutural

Para comparar os efeitos dos diferentes fluxos ativos na soldagem dos materiais, análises macrográficas foram realizadas de modo comparativo nas regiões dos cordões obtidos com e sem a presença de fluxos ativos. Os seguintes parâmetros foram comparados em seções transversais aos cordões de solda: penetração, largura do cordão na face e área fundida. Como os melhores resultados foram obtidos nas amostras de aço inoxidável ABNT 304 com o uso de fluxo celulósico e cloreto de cálcio, estas amostras foram selecionadas para análise macrográfica, para isso, imagens macrográficas foram obtidas em estereoscópio óptico Leica do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Metalografia e as imagens foram processadas com auxílio do *software ImageJ*, após o aço inoxidável ABNT 304, sofrer um polimento eletrolítico e, e logo após, ataque em uma solução de Ácido Oxálico (10%), por cerca de 25 segundos.

Análises micrográficas foram realizadas com o intuito de se determinar a morfologia das fases e constituintes presentes no metal base e nos cordões de solda obtidos pelo processo de soldagem GTAW em comparação com o processo A-TIG, de modo a verificar a influência dos procedimentos de soldagem na microestrutura do material. A análise metalográfica foi realizada por meio de microscópio automatizado óptico Leica, com a preparação das amostras seguindo os procedimentos padrão para metalografia e utilizando reagentes químicos para revelar as fases e constituintes. No caso do aço estrutural, o ataque foi realizado com o reativo Nital (2%), no caso do aço inoxidável ABNT 304, foi feito um polimento eletrolítico e, após o polimento, foi feito o ataque em uma solução de Ácido Oxálico (10%), por cerca de 25 segundos.

2.5. Ensaio Mecânico

Foram obtidos perfis de microdureza na escala *Vickers* na seção transversal dos cordões de solda (Figura 2.3), obtidos com as variações das condições de soldagem, os ensaios foram realizados de acordo com a Norma ASTM E92 (2016), com carga de 100gf por 15s. Os espaçamentos foram definidos iguais a 0,3 mm, abrangendo o metal base, toda a ZTA e a zona fundida.

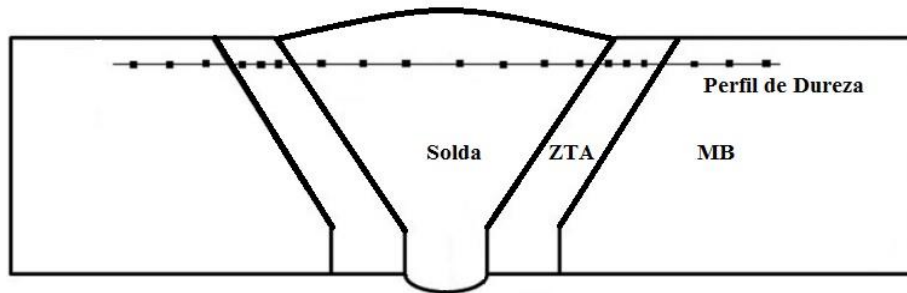


Figura 2.3. Representação esquemática do perfil de microdureza *Vickers* realizado na parte superior dos cordões de solda com variações dos parâmetros de soldagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Microestrutural dos Metais Base

As microestruturas obtidas nos metais base são apresentadas nas Figuras 3.1 e 3.2, para o aço carbono e para o aço inoxidável austenítico, respectivamente.

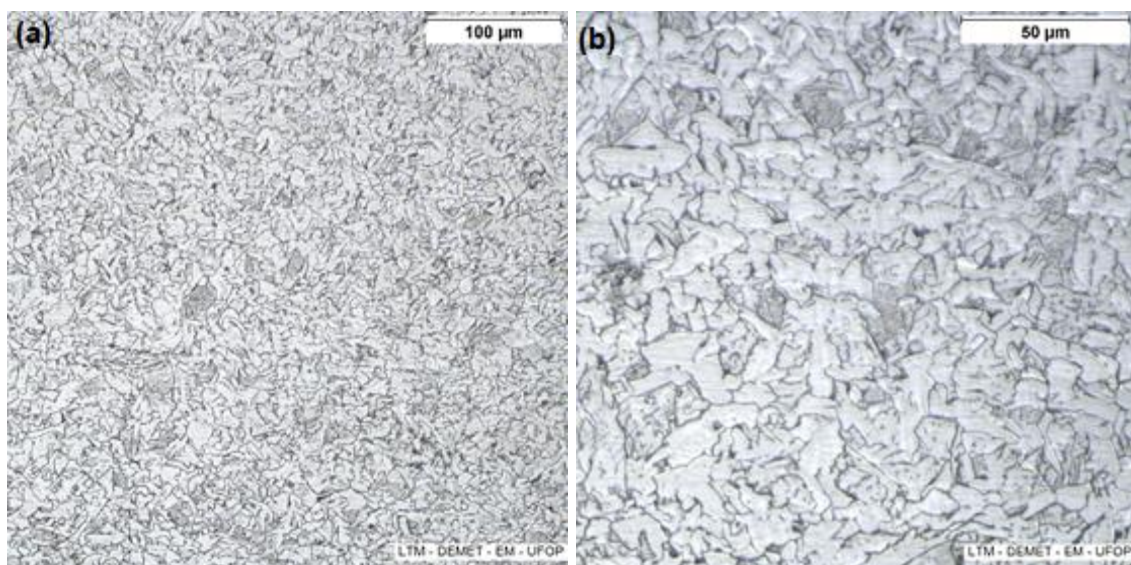


Figura 3.1. Microestrutura do aço estrutural com (a) 200x e (b) 500x. Ataque Nital 2%.

Percebe-se pela Figura 3.1, que a amostra de aço estrutural apresenta uma microestrutura heterogênea em relação ao tamanho de grão, com presença de ferrita e perlita, além de apresentar grãos bem refinados.

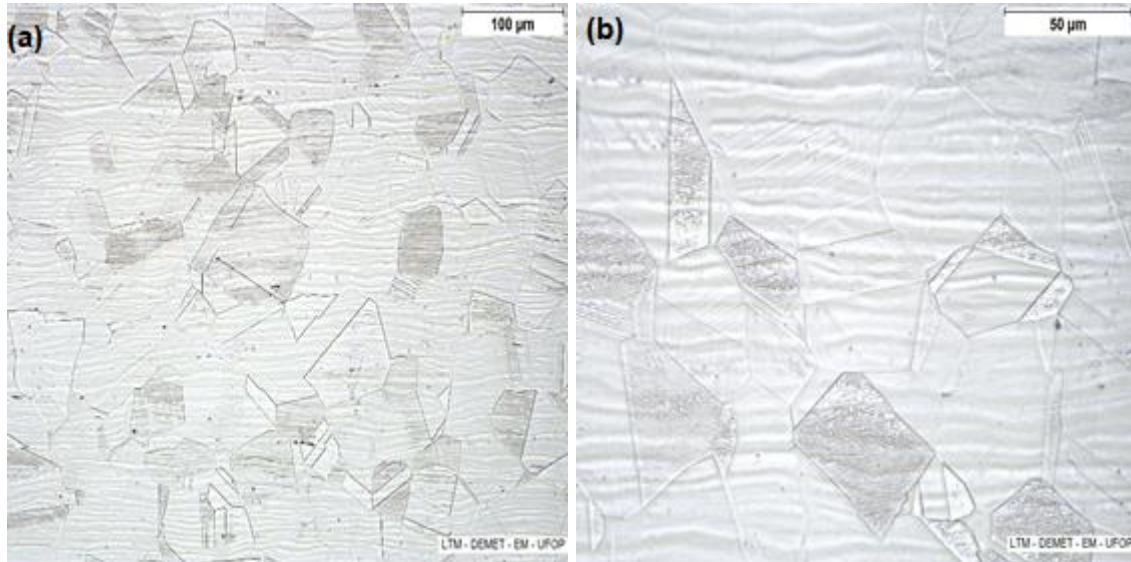


Figura 3.2. Microestrutura do aço inoxidável ABNT 304 com (a) 200x e (b) 500x. Ataque Ácido Oxálico 10%.

Pela Figura 3.2, pode-se perceber que a amostra de aço inoxidável também apresenta microestrutura típica desse tipo de material. Pode-se identificar uma grande quantidade de maclas de recozimento e grãos poligonais, além disso as marcas de deformação podem indicar que o material passou por conformação mecânica (laminação) ou que o material sofreu uma precipitação preferencial causada pelo fósforo, que se caracteriza por ser incompatível com o carbono, ou seja ele tende a expulsar o carbono da austenita, de modo que, quando no resfriamento se ultrapassa a linha Ar, as áreas ricas em fósforo ficam praticamente constituída somente de ferrita, com ausência quase que completa de perlita. O resultado desse fenômeno é uma estrutura denominada “ghost line” (CHIVERINE, 2008).

3.2 Análise Macrográfica das Juntas Soldadas

Fotografias dos cordões de solda na região da face e da raiz são apresentadas para todos os fluxos ativos aplicados no aço inoxidável austenítico e aço carbono nas Figuras 3.3 a 3.8. Uma linha vermelha nas Figuras indica a transição entre o cordão produzido sem o fluxo e com o fluxo.

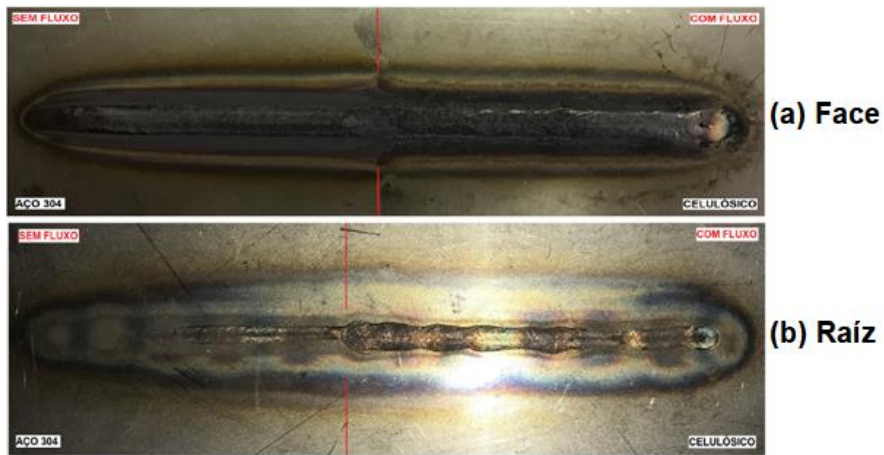


Figura 3.3 Fotografias da (a) face e (b) raiz do cordão obtido. – Amostra de aço inoxidável ABNT 304 com fluxo celulósico.

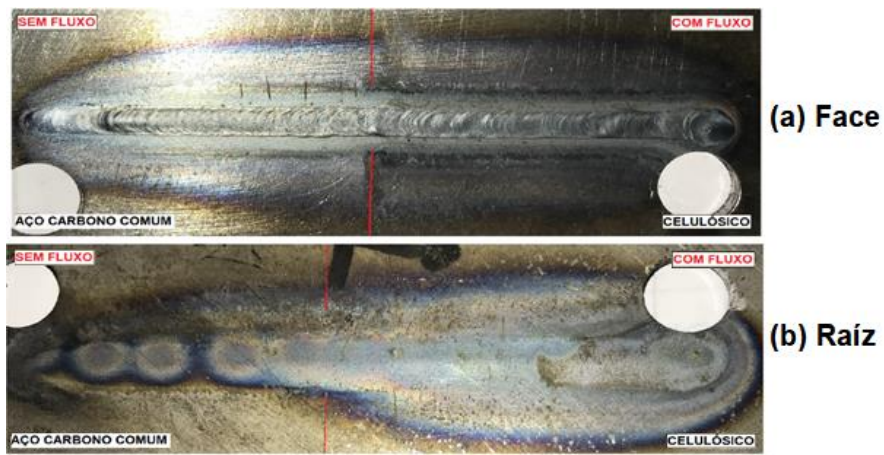


Figura 3.4. Fotografias da (a) face e (b) raiz do cordão obtido. – Amostra de aço estrutural com fluxo celulósico.



Figura 3.5. Fotografias da (a) face e (b) raiz do cordão obtido. – Amostra de aço inoxidável ABNT 304 com fluxo CaCl_2 .



Figura 3.6. Fotografias da (a) face e (b) raiz do cordão obtido. – Amostra de aço estrutural com fluxo CaCl_2 .

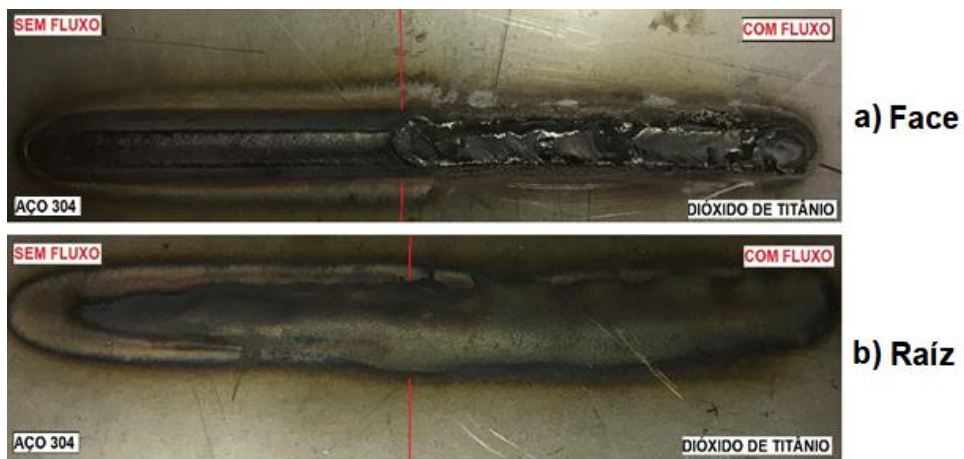


Figura 3.7 Fotografias da (a) face e (b) raiz do cordão obtido. – Amostra de aço inoxidável ABNT 304 com fluxo TiO_2 .

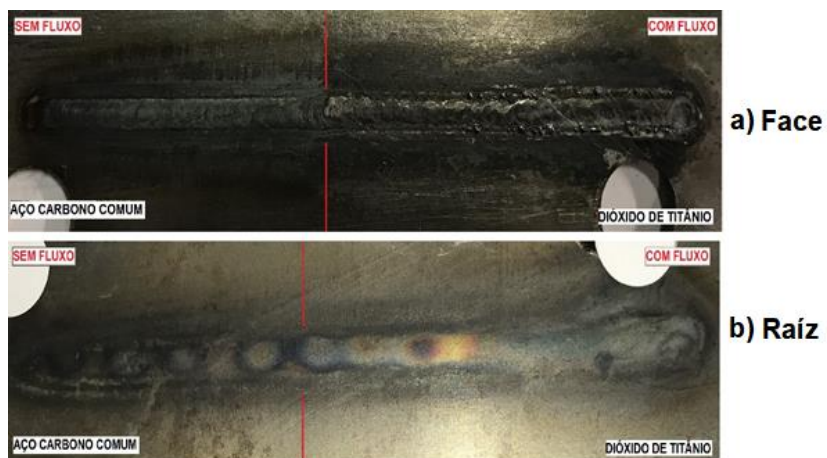


Figura 3.8. Fotografias da (a) face e (b) raiz do cordão obtido. – Amostra de aço estrutural com fluxo TiO_2 .

Pelas Figuras 3.3 a 3.8 apresentadas, o acabamento superficial das amostras onde foram aplicados fluxos ativos apresentaram presença de escória sobre a junta soldada; os resultados foram agravados com a utilização de fluxo de TiO_2 puro, pois visualmente apresentaram o pior acabamento superficial, conforme Figuras 3.7 e 3.8. Segundo Modenesi e Apolinário (1999), esse resultado já era previsto, pois segundo os autores, uma das principais desvantagens da soldagem A-TIG reside principalmente na propensão à formação de escória sobre a superfície da solda, o que acarreta uma piora no acabamento superficial.

Outro resultado foi a baixa efetividade do uso de fluxo ativo em aço estrutural A36, conforme Figuras 3.4, 3.6 e 3.8 pois independentemente do tipo de fluxo ativo utilizado, os resultados se mostraram pouco efetivos, isso pode ser explicado, segundo Heiple e Roper (1982 *apud* AZEVEDO *et al.*, 2005), porque as mudanças substanciais na forma da zona de fusão são produzidas pela adição de pequenas quantidades de determinados elementos, incluindo S, Se, Al e O. Assim, propôs-se que quando a concentração dos elementos tensoativos fossem elevadas na poça de fusão, produziria um coeficiente positivo da tensão superficial, e então o gradiente da tensão superficial juntamente com as forças de Lorentz seriam combinados, obtendo-se assim uma maior penetração. Por outro lado, quando a concentração de elementos tensoativos for insignificante, o gradiente da tensão superficial é negativo, ocasionando penetrações menos significativas (Figura 3.9). Segundo Vilarinho *et al.* (2010), a baixa penetração em aço estrutural se explicaria devido à presença de um teor relativamente alto de enxofre (S) neste material, com isso, o efeito do fluxo seria menos pronunciado.

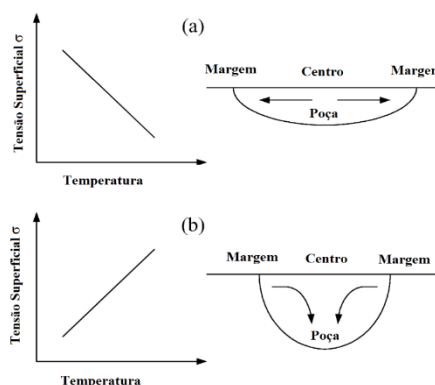


Figura 3.9. Representação esquemática da reversão do sentido de fluxo de massa em poça de fusão durante a soldagem em função do gradiente de tensão superficial, efeito Marangoni. (a) Processo TIG convencional em materiais inoxidáveis austeníticos; (b) Processo A-TIG em materiais inoxidáveis austeníticos. Adaptado de Lu (*et al.*, 2004).

Além disso, nota-se que nas amostras de aço inoxidável austenítico, com uso de fluxos celulósicos e de cloreto de cálcio, apresentaram os melhores resultados em relação à penetração da solda, uma vez que penetração total foi percebida na raiz (Figuras 3.3 e 3.5). O que pode explicar essa maior penetração quando se aplica o fluxo ativo, segundo Vilarinho *et al.* (2010), é a aparência constricta do cordão de solda quando comparada com a aparência difusa do GTAW convencional.

Esta constrição, segundo Middel e Den Ouden (1998 *apud* AZEVEDO *et al.*, 2005) leva a uma maior tensão do arco elétrico na soldagem com fluxo ativo em relação ao processo convencional. Ao mesmo tempo, o efeito de constrição induz um aumento na temperatura e na pressão do arco elétrico, permitindo aumentar significativamente a profundidade de penetração da solda.

Como os melhores resultados foram obtidos nas amostras de aço inoxidável austenítico com o uso de fluxo celulósico e cloreto de cálcio, estas amostras foram selecionadas para análise macrográfica em estereoscópio óptico, sendo submetidas a ataque eletrolítico com ácido oxálico a 10%.

Na Figura 3.10 apresentam-se as faces dos cordões de solda realizados sem e com a presença do fluxo celulósico em aço inoxidável austenítico.

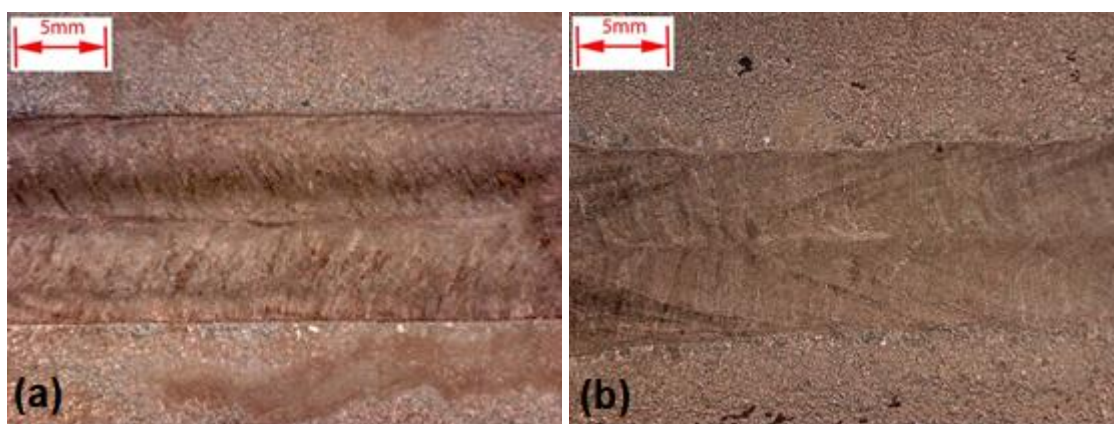


Figura 3.10. Aspecto visual da superfície do cordão de solda obtido com fluxo celulósico: (a) – Sem fluxo, (b) – Com fluxo. Aço inoxidável ABNT 304. Ataque Ácido Oxálico (10%).

Na Figura 3.11, a imagem macrográfica apresenta a junta soldada na região de transição do processo GTAW para o A-TIG, onde, pode-se observar uma mudança na morfologia da poça de fusão, pela Figura 3.11 (a), apresenta-se uma morfologia elíptica na ausência de fluxo e, pela Figura 3.11 (b), apresenta-se na forma de gota com a presença do fluxo

celulósico. Outro aspecto que se ressalta na Figura 3.11 é a significativa redução da largura do cordão com a presença do fluxo ativo celulósico.



Figura 3.11. Aspecto visual da superfície do cordão de solda obtido com fluxo celulósico: região de transição do processo TIG (à esquerda) para o A-TIG (à direita). Aço inoxidável ABNT 304. Ataque Ácido Oxálico (10%).

As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam as macrografias da junta soldada do aço inoxidável austenítico sem e com o fluxo de cloreto de cálcio.

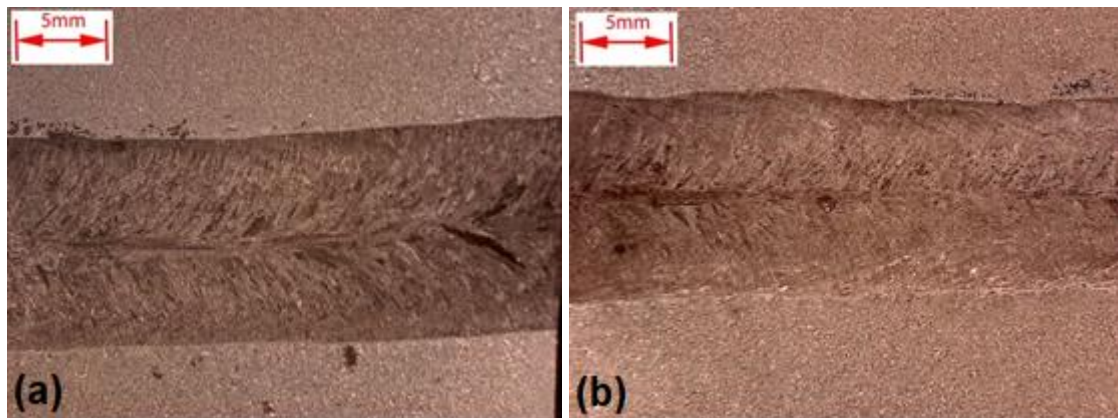


Figura 3.12. Aspecto visual da superfície do cordão de solda obtido com fluxo de cloreto de cálcio: (a) – Sem fluxo, (b) – Com fluxo. Aço inoxidável ABNT 304. Ataque Ácido Oxálico (10%).

Na Figura 3.13 apresenta-se a junta soldada na região de transição entre o material sem fluxo e com a presença do fluxo ativo de cloreto de cálcio. Assim como na aplicação de fluxo celulósico, também, pode-se observar a mudança na morfologia da poça de fusão, elíptica à esquerda (sem fluxo) e na forma de gota à direita (com fluxo CaCl_2). Outro

ponto de destaque na Figura 3.13 é a presença de regiões escuras que não saíram com o ataque eletrolítico, oriundas de escória produzida pelo cloreto de cálcio.

A transição do formato da poça de fusão de elíptica para gota é um fenômeno associado à extração de calor latente de fusão e depende, principalmente, da velocidade de soldagem (KOU, 2003). Na literatura consultada, não foram encontradas relações entre a mudança da morfologia e a presença de fluxos ativos.

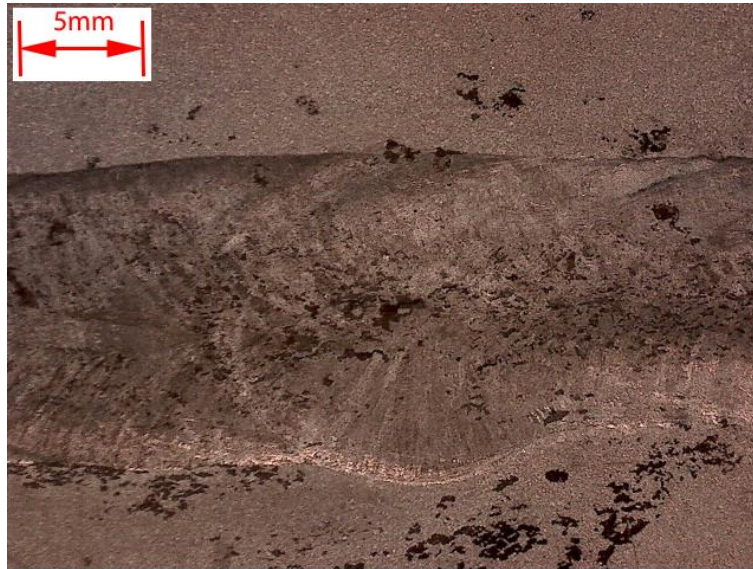


Figura 3.13. Aspecto visual da superfície dos cordão de solda obtido com fluxo cloreto de cálcio: região de transição do processo TIG (à esquerda) para o A-TIG (à direita). Aço inoxidável ABNT 304. Ataque Ácido Oxálico (10%).

As Figuras 3.14 e 3.15, apresentam uma visão lateral das juntas soldadas, seguindo os mesmos parâmetros de soldagem para cada caso, percebe-se que a penetração foi total onde se aplicou o processo de soldagem A-TIG. Nota-se, ao se comparar as imagens (1) das Figuras 3.14 e 3.15, que a penetração dos cordões sem a presença de fluxo ativo foi diferente para as duas amostras, apesar dos parâmetros de soldagem terem sido, em princípio, mantidos os mesmos. Provavelmente, este resultado foi devido a variação no comprimento de arco entre as duas amostras, o que pode ter resultado em menor eficiência de transferência de calor e menor penetração na amostra apresentada na Figura 3.15. Portanto, as amostras com e sem fluxo são comparadas aos pares para os fluxos ativos a base de celulose e cloreto de cálcio.

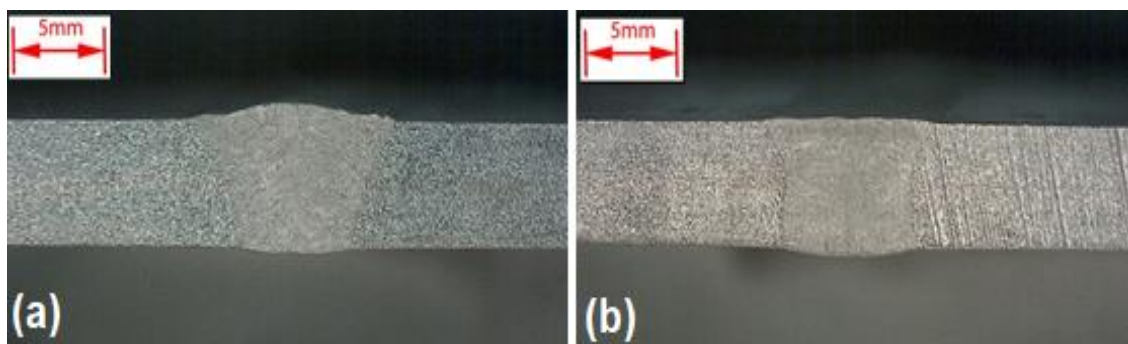


Figura 3.14. Aspecto visual da superfície do cordão de solda obtido com fluxo celulósico: (a) – Sem fluxo, (b) – Com fluxo. Aço inoxidável ABNT 304. |Ataque Ácido Oxálico (10%).

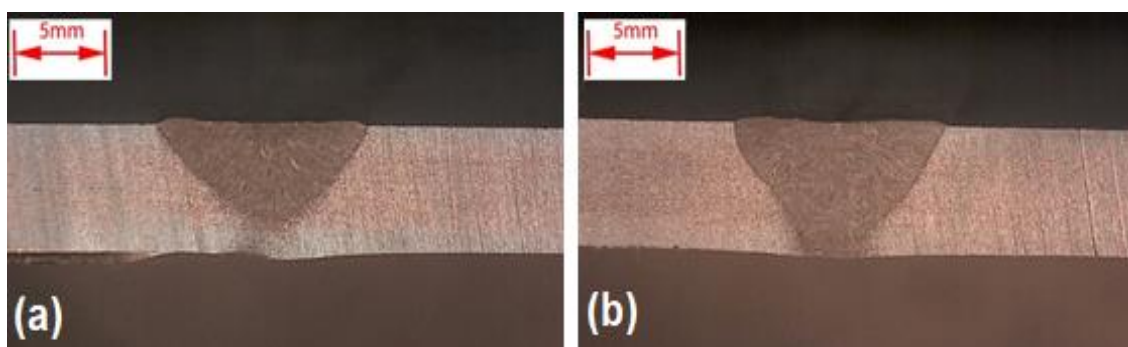


Figura 3.15. Aspecto visual da superfície dos cordões de solda obtidos com fluxo de cloreto de cálcio: (a) – Sem fluxo, (b) – Com fluxo. Aço inoxidável ABNT 304. Ataque Ácido Oxálico (10%).

A partir das macrografias das seções transversais, medidas de largura do cordão, penetração total e área fundida foram realizadas com auxílio do *software* ImageJ, como ilustrado na Figura 3.16. Os resultados quantitativos são apresentados na Tabela 3.1.

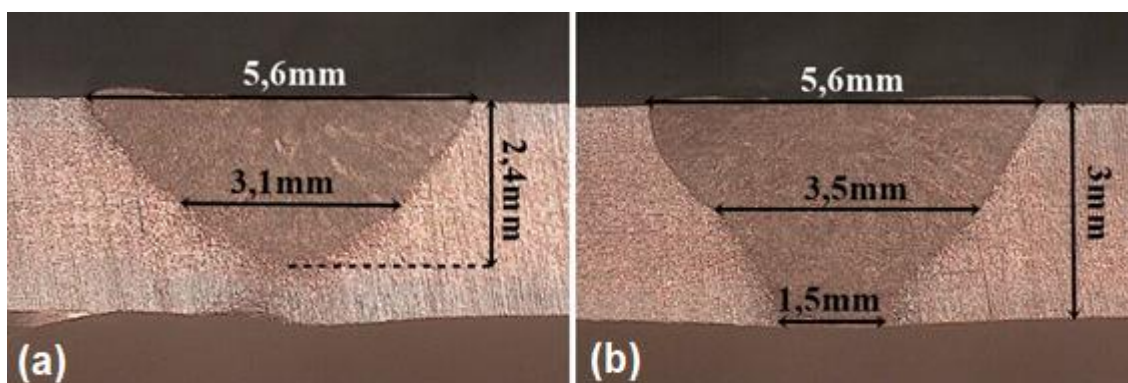


Figura 3.16. Medidas de parâmetros geométricos de cordão de solda obtido em aço inoxidável ABNT 304 (a) sem e (b) com a presença de fluxo ativo CaCl_2 . As medidas foram obtidas com auxílio do *software* ImageJ. Ataque Ácido Oxálico (10%).

Tabela 3.1. Resultados de características geométricas obtidas por processamento de imagens (*ImageJ*) de cordões de solda autógenos em aço ABNT 304 sem e com a presença de fluxos ativos.

Amostra	Penetração (mm)	Largura face (mm)	Largura centro (mm)	Largura raiz (mm)	Área fundida (mm²)
ABNT 304 sem fluxo	3	5,6	3,7	2,9	13,5
ABNT 304 fluxo celulósico	3	4,9	3,6	3,7	12,7
ABNT 304 sem fluxo	2,4	5,6	3,1	-	9
ABNT 304 com fluxo CaCl ₂	3	5,6	3,5	1,5	11,8

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.1 e nas Figuras 3.14 e 3.15, pode-se concluir que os fluxos ativos foram efetivos no aumento da penetração da solda. No caso do fluxo celulósico, observa-se que a área fundida teve uma pequena alteração em relação ao cordão obtido sem fluxo, no entanto, a homogeneidade do cordão em relação à geometria foi maior. Em relação ao fluxo formado por CaCl₂, observou-se um aumento de 25% na penetração e de 33% da área fundida em relação ao cordão sem fluxo.

Os resultados obtidos confirmam a afirmação de Modenesi e Apolinário (1999), que devido ao efeito de constrição do arco, a densidade de corrente e a força do arco atuando na poça de fusão são aumentados e, assim, a penetração e/ou a velocidade de soldagem também poderiam ser aumentadas em comparação com a soldagem GTAW, para o mesmo nível de corrente.

Kunrath e Paris (2005) obtiveram os melhores resultados com fluxo ativo celulósico na soldagem de aço inoxidável austenítico, pois, além de promover aumento na penetração do cordão de solda, também resultou em cordão praticamente uniforme do ponto de vista de largura em relação à espessura da chapa, mantendo os mesmos parâmetros de soldagem.

3.3 Micrografia

De um modo geral, não foram percebidas diferenças de microestrutura nos cordões de solda devido à presença dos fluxos ativos. No aço estrutural A36, do ponto de vista qualitativo, não foram observadas diferenças, como ilustrado na Figura 3.17.

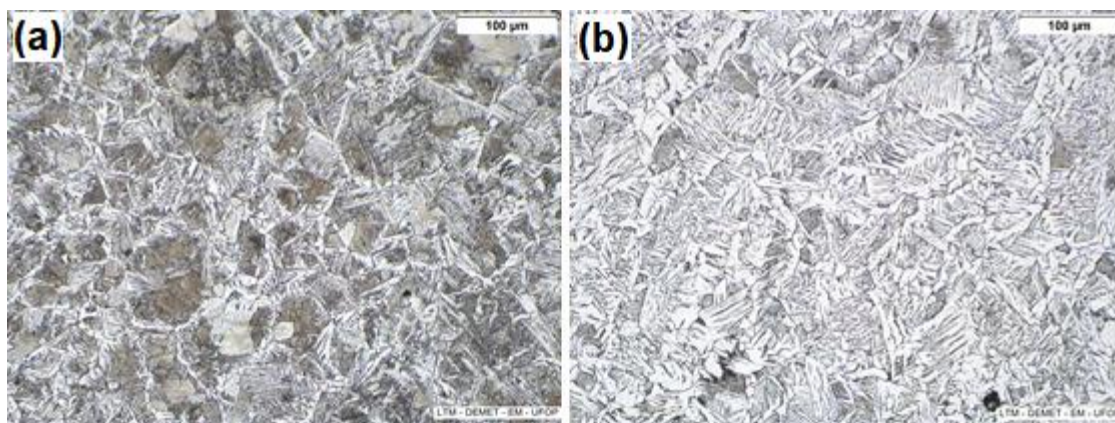


Figura 3.17. Micrografia de junta soldada de um aço estrutural A36, zona fundida. Fluxo celulósico: (a) – Sem fluxo, (b) – Com fluxo. Ataque Nital 2%. 200x.

Para os aços inoxidáveis austeníticos, segundo Ames (2002 *apud* KUNRATH e PARIS, 2005), existiria uma influência do fluxo na microestrutura da solda, aparentemente o fluxo influencia a microestrutura do cordão de solda, onde a microestrutura se torna mais refinada com relação à soldagem sem fluxo, principalmente na soldagem com o fluxo celulósico. No entanto, no presente trabalho, a avaliação qualitativa da estrutura das zonas fundidas obtidas em aço inoxidável ABNT 304, com e sem os diferentes fluxos ativos testados, não indicou mudanças significativas, como ilustrado nas Figuras 3.18 a 3.20.

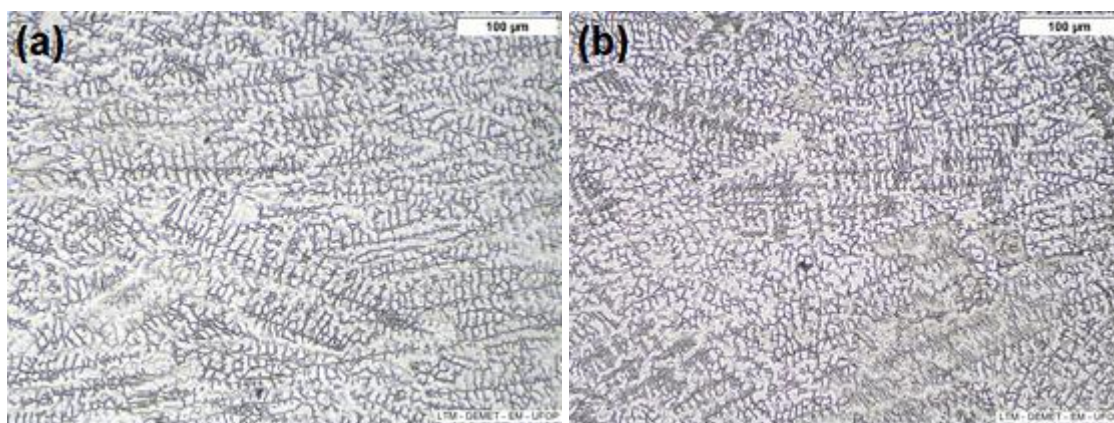


Figura 3.18. Micrografia de junta soldada de um aço inoxidável ABNT 304, zona fundida. Fluxo celulósico: (a) – Sem fluxo, (b) – Com fluxo. Ataque Ácido Oxálico 10%. 200x.

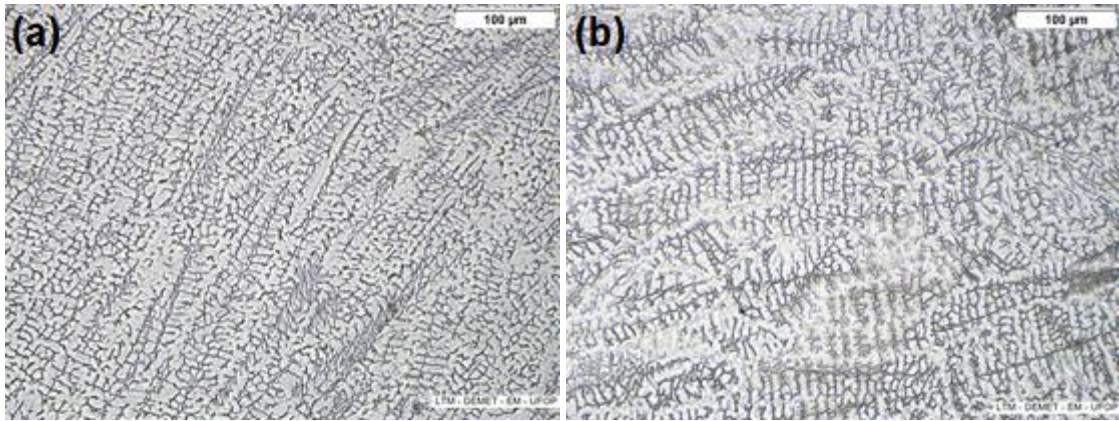


Figura 3.19. Micrografia de junta soldada de um aço inoxidável ABNT 304, zona fundida. Fluxo cloreto de cálcio: (a) – Sem fluxo, (b) – Com fluxo. Ataque Ácido Oxálico 10%. 200x.

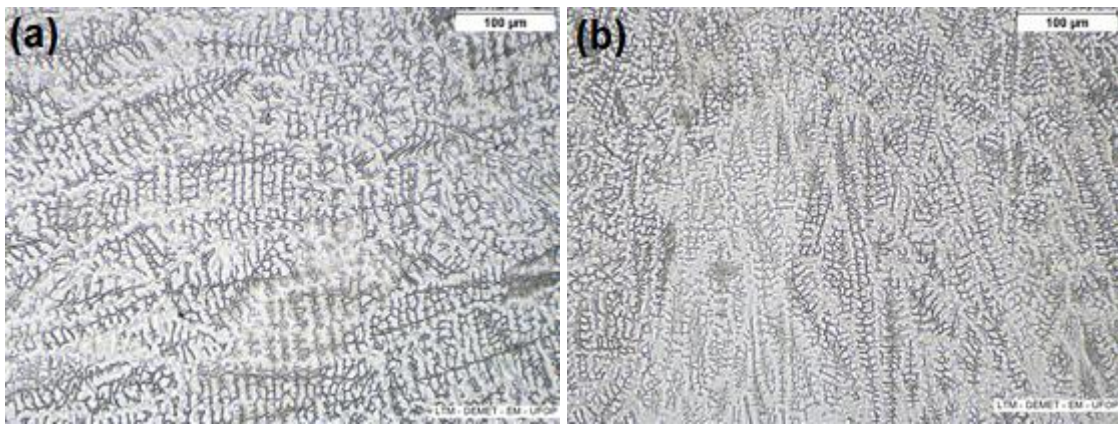


Figura 3.20. Micrografia de junta soldada de um aço inoxidável ABNT 304, zona fundida. Fluxo dióxido de titânio: (a) – Sem fluxo, (b) – Com fluxo. Ataque Ácido Oxálico 10%. 200x.

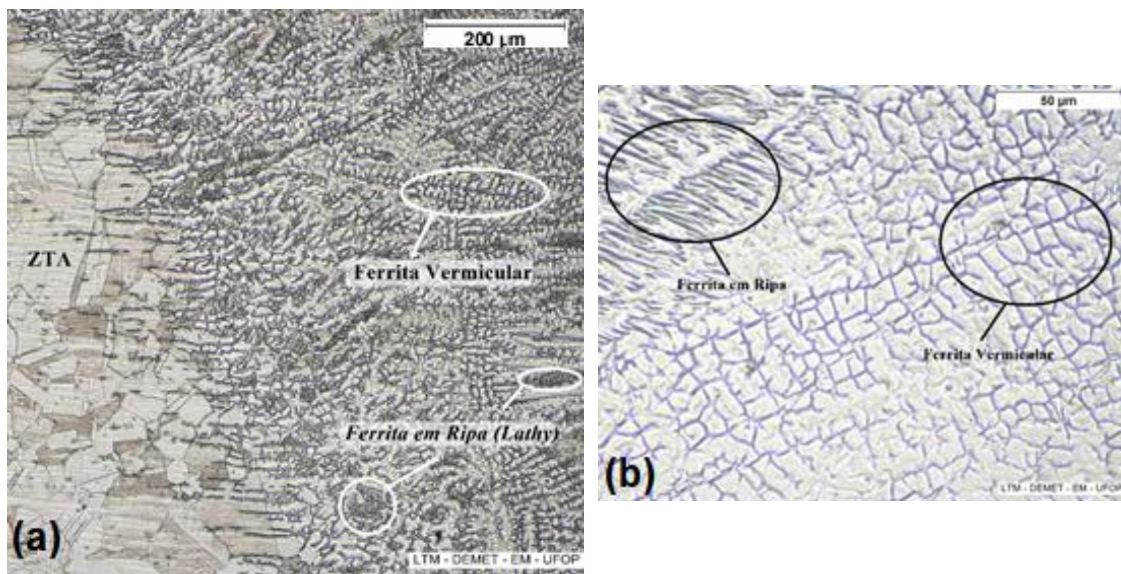


Figura 3.21. Microestruturas de juntas soldadas em aço inoxidável ABNT 304 sem a presença de fluxo ativo. Em destaque a morfologia da ferrita delta. (a) 100x; (b) 500x. Ataque Ácido Oxálico 10%.

A zona fundida do aço ABNT 304 se mostrou típica daquela obtida em processos de soldagem com taxas de resfriamento intermediária, composta por uma matriz austenítica associada a ferrita delta da forma esquelética (ou vermicular) e, em algumas regiões, ferrita delta na forma de ripas (*lathy*) (LIPPOLD e KOTECKI, 2005), como ilustrado na Figura 3.21.

3.4 Ensaio de Microdureza Vickers

Foram obtidos perfis de microdureza na escala *Vickers*, com 100gf por 15 segundos, ao longo da seção transversal dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG e A-TIG, para ambos os metais base. Para o aço estrutural A36 os resultados podem ser analisados pela Figura 3.22.

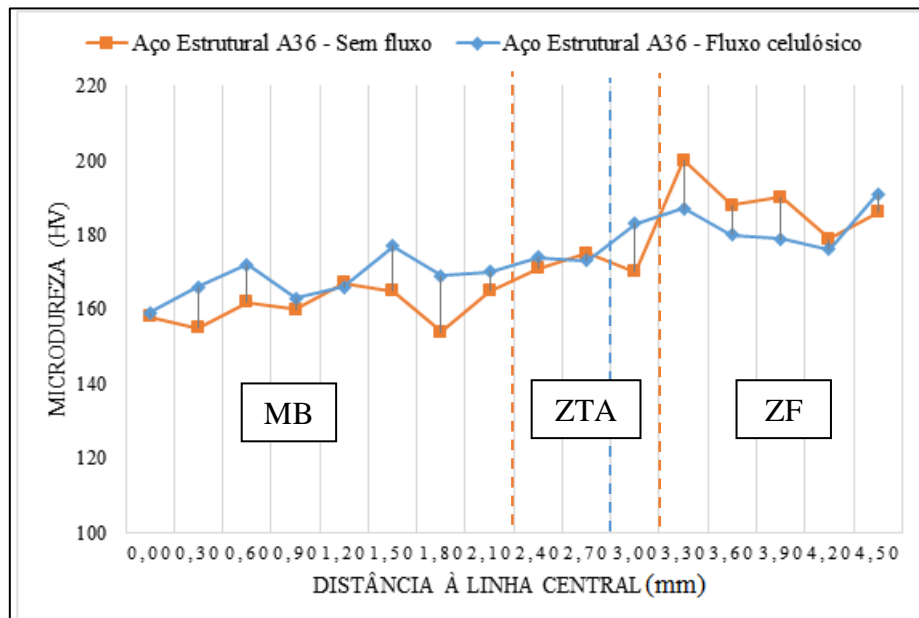


Figura 3.22. Perfis de microdureza *Vickers* em junta soldada pelo processo TIG convencional e A-TIG para o aço estrutural A36 com fluxo celulósico.

Apesar da amostra de aço estrutural A36, quando não utilizado fluxo apresentar uma maior largura da zona termicamente afetada em relação à amostra na qual foi utilizado o fluxo celulósico, esse resultado não está relacionado com a utilização de fluxo ativo, mas a pequenas variações de parâmetros de soldagem (provavelmente, comprimento de arco). Além disso, observa-se que os valores de microdureza praticamente não foram alterados em decorrência do fluxo ativo.

No entanto, para o aço inoxidável ABNT 304, os resultados podem ser analisados na Figura 3.23, onde, assim como o aço estrutural A36, não houve uma variação de microdureza para as amostras com ou sem os fluxos ativos.

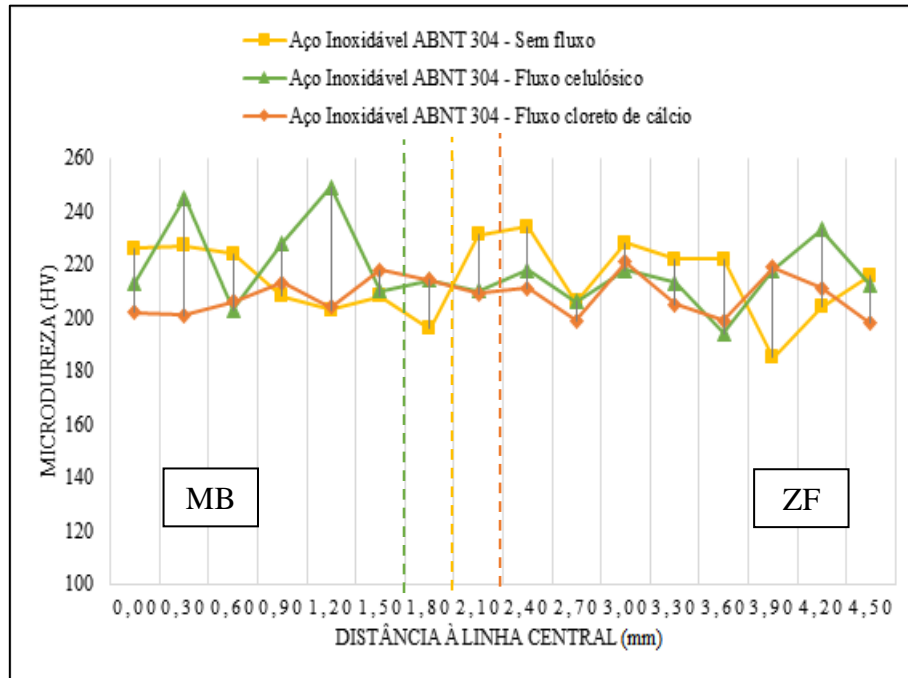


Figura 3.23. Perfis de microdureza *Vickers* de juntas soldadas pelo processo TIG convencional e A-TIG para o aço inoxidável ABNT 304, com fluxo celulósico e cloreto de cálcio.

Pode-se verificar, pela Figura 3.23, que não houve, também uma variação significativa entre os valores de microdureza entre a ZF e o MB para nenhuma das condições avaliadas, tanto para os cordões depositados pelo processo TIG quanto o A-TIG.

Esperava-se encontrar pouca ou quase nula variação de microdureza, já que os parâmetros de soldagem, como: corrente de soldagem, velocidade de soldagem, tensão e vazão de gás de proteção foram os mesmos para todas as amostras e as microestruturas não foram afetadas de forma significativa devido à presença de fluxos ativos.

4 CONCLUSÕES

Os fluxos ativos avaliados não foram efetivos para o aço estrutural A36 nas juntas soldadas por GTAW e A-TIG;

Os fluxos ativos a base de celulose e cloreto de cálcio foram efetivos em aumentar a penetração nos cordões de solda do aço inoxidável ABNT 304. O fluxo à base de celulose foi responsável por aumentar a uniformidade da largura do cordão de solda em relação à

espessura da chapa no aço inoxidável austenítico. O fluxo a base de cloreto de cálcio promoveu aumento de 25% na penetração do cordão de solda e de 33% na área fundida;

Os fluxos ativos à base de revestimento de eletrodo celulósico e cloreto de cálcio modificaram a morfologia da poça de fusão, passando de uma frente de solidificação elíptica, na ausência dos fluxos, para forma de gota a partir da aplicação dos mesmos sobre as chapas de aço inoxidável austenítico;

A microestrutura das zonas fundidas obtidas no aço estrutural A36 e no aço inoxidável ABNT 304 não sofreram modificações visíveis em microscópio óptico com a aplicação dos fluxos ativos;

Os valores de microdureza *Vickers* nos cordões de solda obtidos no aço estrutural A36 e no aço inoxidável ABNT 304 não foram influenciados pela presença do fluxo ativo.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a influência dos fluxos ativos na penetração da poça de fusão para chapas mais espessas dos aços inoxidáveis ABNT 304.

Avaliar a influência dos fluxos ativos na morfologia de poça de fusão em outros aços inoxidáveis austeníticos para diferentes combinações de velocidade de soldagem e corrente.

Verificar a influência da modificação do sentido de movimentação da poça de fusão (efeito Marangoni) sobre a dissipação do calor latente de fusão e suas relações com a morfologia da frente de solidificação.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe por todo incentivo e estar sempre ao meu lado, por vibrar com as minhas vitórias como se fossem suas próprias e por se fazer presente sempre que preciso.

Ao meu orientador, Dr Rodrigo Rangel Porcaro, pelo conhecimento compartilhado, disponibilidade e dedicação, sendo um grande exemplo de educador, pesquisador e pessoa.

À UFOP, FG, professores e técnicos dos Laboratórios de Soldagem, Ensaio Mecânico e Tratamento Térmico e Microscopia Óptica, que foram essenciais nessa jornada, me ajudando a concretizar essa etapa da minha vida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMES, N.D. Effect of GTAW on the microstructure and properties of austenitic, super austenitic and super duplex stainless steel welds. In.: **Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research**, 2002, p. 29-34.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E92 Standard Test Methods for *Vickers* Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. Philadelphia, 2016, 27 p.

ANDERSON, P.C.J.; WIKTOROWICZ, R. Improving productivity with ATIG welding. **Welding & Metal Fabrication**, 1996, n. 3, p. 108-109.

AZEVEDO, A. G. L.; FERRARESI, V. A.; FARIAS, J. P. Uma revisão sobre o processo de soldagem A-TIG. In.: **16º POSMEC – Simpósio de Engenharia Mecânica**, Uberlândia, 2006.

AZEVEDO, A. G. L.; ROCHA, D. de S.; FARIAS, J. P.; FERRARESI, V. A. Soldagem TIG com fluxo ativo nos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos. In: **15º POSMEC – Simpósio de Engenharia Mecânica**, Uberlândia, 2005.

BRACARENSE, A. Q., **Processo de Soldagem TIG - GTAW**, Apostila Técnica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. ampl e ver. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COLEN NETO, P. **Efeito da concentração do fluxo na soldagem ATIG de aço inoxidável austenítico**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

FAN, D.; ZHANG, R.; GU, Y.; USHIO, M., Effect of Flux on A-TIG Welding of Mild Steels, **Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute)**, 2001, v. 30, n. 1, p. 35-40.

FINOTTI, A. R. **Efeitos da transferência de massa na relação matemática entre espessuras real e aparente em fase livre de gasolina com etanol nas contaminações subterrâneas.** Tese, Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre: UFRS, 2003. 190p.

GUREVICH, S.M. ; ZAMKOV, V.N. Welding titanium with a no consumable electrode using fluxes. **Avtomaticheskaya Svarka**, 1966, n. 12, p. 13-16.

HEIPLE, C.R.; ROPER, J.R., Mechanism for minor element effect on GTA fusion one geometry. **Welding Journal**, 1982, v. 61, n. 4, p.97s-102s.

HOOIJMANS, J. **Hydrogen Absorption in Iron and Steel During Gas Tungsten Arc Welding.** thesis. ed. the Netherlands: Delft Univ. Technol., 1994.

ISMAIL, S.; MACHADO, I. G. **Soldagem TIG: Estudo de Métodos para Aumento da Penetração.** Salão de Iniciação Científica. Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2010, p. 18-22.

KOU, S. **Welding Metallurgy.** 2a ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 468 p.

KUNRATH, L. V.; de PARIS, A. A. F., Efeito do Tipo de Fluxo na Geometria e Microestrutura da Solda de Aço Inox com o Processo ATIG. In.: **III COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Joinville, SC, 2005, 10 p.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J., **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 357 p.

LU, S.; FUJJI, H.; NOGI, K. Marangoni convection and weld shape variations in Ar–O₂ and Ar–CO₂ shielded GTA welding. **Materials Science and Engineering A**, 380, 2004.

LUCAS, W.; HOWSE, D. Activating flux-increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes. **Welding & Metal Fabrication**, 1996, n. 1, p. 11-17.

MACHADO, I. G., **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Editado pelo Autor, 1996, v. 1200, 477 p.

MARYA, M., **Theoretical and Experimental Assessment of Chloride Effects in the A-TIG Welding of Magnesium**. International Institute of Welding Document, Copenhagen, Dinamarca, 2002, 13 p.

MENDEZ, P. F. **Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding**. Massachusetts Institute of Technology. 1999.

MIDDEL, W.; den OUDEN, G., The Effect of Additives on Arc Characteristics in GTA Welding, **Trends in Welding Research, Proceedings of the 5th International Conference**, Pine Mountain, Georgia, EUA, 1998, p. 394-399.

MODENESI, J. P. A química da formação do cordão na soldagem TIG. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, 2013, v. 18, n. 03, p. 287-300.

MODENESI, J. P. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Apostila Técnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011, p. 26.

MODENESI, J. P., APOLINÁRIO, E. R. Estudo da soldagem TIG com fluxos de um Componente. **XXV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM**, Belo Horizonte – MG, 1999.

MODENESI, J. P.; COLEN NETO, P.; APOLINÁRIO, R. E.; DIAS, K. B. Efeito da Densidade do Fluxo e da Presença de Aditivos na Soldagem ATIG de Aço Inoxidável Austenítico. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, 2013, v. 18, n. 02, p.118-126.

PASKELL, T.; LUNDIN, C.; CASTNER, H. GTAW Flux Increases Weld Joint Penetration. **Welding Journal**, 1997, v.76, n.4, p.57–62.

PERRY, N.; MARYA, S.; SOUTIF, E. Study and Development of Flux Enhanced GTA Penetrations in a Commercial Grade Titanium. In.: **Trends In Welding Research, Proceedings Of The 5th International Conference**, Pine Mountain, Georgia, EUA, 1998, p. 520-525.

RICHETTI, A. **Análise e Modelagem Empírica do Processo de Soldagem a Plasma com “keyhole” em Aço Inoxidável**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG. 2003.

SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding. **Welding Journal**, 1979, p. 212-224.

SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C.; OKUYAMA, M. P.; e SILVA, R. H. G., Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos. **Soldagem e Inspeção**, 2011, v. 16, n. 34, p. 333-340.

SODERSTROM, E.; MENDEZ, P. F. Humping mechanisms present in high speed welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, 2006, p. 572-579.

TEIXEIRA, G. S. **Análise da Influência dos Parâmetros de Soldagem sobre a Geometria do Cordão de Solda Depositado pelo Processo de Soldagem TIG - MAG em Tandem**, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Processos de Fabricação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. 244 p.

TUSEK, J.; SUBAN, M. Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of highalloy stainless steel. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2000, n. 25, p. 369-376.

VILARINHO, L. O.; KUMAR, V.; NASCIMENTO, V. A.; LUCAS, B.; RAGHUNATHAN, S. **Soldagem de Alta Produtividade com o Processo A-TIG para Diferentes Metais de Base.** In: VI CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande/PB, 2010.

WALSH, D. W.; DEMMONS, A.; GIBBS, D., The Effects of Sulfide, Oxide and Halide Coatings on Bead Shape in Inconel 718 Weldments, **Trends in Welding Research, Proceedings of the 5th International Conference**, Pine Mountain, Georgia, EUA, 1998, p. 526 – 529.

WOODS, R. A.; MILNER, D. R. Motion in the weld pool in arc welding. **Welding Journal**, v. 50, n. 4, 1971, p. 163-173.