



Estudo da geometria e microdureza do cordão de solda em processo de soldagem a plasma do aço ABNT304 sem e com fluxo ativo/caminho preparado

José Rubens Gonçalves Carneiro, Dr. Professor PUCMG/FEAMIG (joserub@pucminas.br)
Frederico Henrique Santana, aluno de mestrado PUCMG(fredericosantana28@yahoo.com.br)
Marcelo ferreira de souza, engenharia de produção da FEAMIG (marcelotryout@yahoo.com.br)
Diego Raimundi Corradi, aluno de engenharia mecatrônica da PUCMG, (diego.corradi@yahoo.com.br)

Resumo: A soldagem a plasmas (PAW) com aplicação de um fluxo ativo a base de óxidos e fluoretos tem sido proposta como uma alternativa para aumentar a produtividade do processo, designado por A-PAW ("Active Flux PAW"). Para minimizar o efeito da diluição do fluxo ativo na poça de fusão, foi desenvolvida uma metodologia de aplicação da camada de fluxo, denominada "Caminho Preparado de fluxo". Nesta técnica, o arco é forçado a passar por um caminho delimitado por um fluxo, reduzindo a diluição e, portanto, diminuindo a formação de escória e os efeitos na poça de fusão. Para verificar a potencialidade do processo de soldagem A-PAW em aço inoxidável ABNT 304, foi proposto neste trabalho o estudo da evolução da largura e penetração do cordão de solda, utilizando-se o processo sem fluxo e com fluxos ativos de TiO_2 , SiO_2 , escória de processo de soldagem a arco submerso e mistura na proporção de 50% em peso de TiO_2 e SiO_2 . Constatou-se realizando o ensaio metalográfico e de microdureza ao longo da seção transversal da solda, que a microestrutura da região fundida apresentou ferrita delta o que alterou a resistência mecânica do cordão.

Palavras chave: penetração; largura; micro dureza

1. Introdução

Aços inoxidáveis constituem um grupo de aço de alta liga baseado no sistema Fe-Cr, Fe-Ni-Cr e Fe-Cr-C, que contém percentual de cromo em peso superior a 10,5%. Os aços inoxidáveis apresentam boa resistência à corrosão e mecânica em temperaturas elevadas e em diferentes ambientes. São utilizados em uma variedade de aplicações na indústria química, alimentícia, na fabricação de bens duráveis, indústria farmacêutica, automobilística etc. Os aços inoxidáveis podem ser classificados em martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex e endurecíveis por precipitação (Fisher, L.W. 2005).

A soldagem é um dos mais importantes processos de união de metais utilizados em todos os setores da indústria, como a microeletrônica, de construção (estruturas simples e complexas), química, petrolífera e nuclear, etc. Os aços inoxidáveis são soldáveis, mas a soldagem resulta em alterações da microestrutura do metal de solda e da zona termicamente afetada em relação ao metal base. Isso pode constituir uma mudança na fase desejada, formação de compostos intermetálicos, crescimento de grão, segregação de ligas, impurezas e outras reações. Dentre os aços inoxidáveis, têm-se os austeníticos que formam o grupo mais numeroso, de melhor soldabilidade e não endurecíveis por tratamento térmico (Lippold, C.; Kotecki, D.J., 2005).



A soldagem a arco plasma é um processo que produz a união por fusão das partes através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e a peça ou entre o eletrodo de tungstênio e o bocal constritor (Modenesi, 2004). O processo PAW é usado em soldagem de aços-carbono, aços inoxidáveis, liga de níquel, titânio, magnésio, alumínio e conjunto de aço inoxidável martensítico/austenítico, com custo elevado o que pode, às vezes, inviabilizar a sua utilização (Wang, Y.;Cheng,Q.,2002;Kurt, B.,2009). A soldagem a plasma pode ser realizada em qualquer posição, com velocidade elevada e, em geral, com menor energia de soldagem e maior razão penetração/largura do cordão. Esses fatos resultam em vantagens em aplicações onde se deseja produtividade, precisão dimensional da peça soldada como, por exemplo, na soldagem em passe único, sem metal de adição, até espessuras em torno de 12mm. Em soldagem de materiais mais espessos, uma nova estratégia de pulso controlado com novos sensores e sistema de controle foi proposta (Zhang, Y.; Wu, C.;Jia, C., 2009). O processo de soldagem a arco plasma pode ser usado como uma alternativa ao processo de soldagem TIG (Tungstênio inerte gás).Outra aplicação do arco plasma é em corte de materiais metálicos e não metálicos, podendo-se apresentar variação na quantidade e distribuição de partícula (Gullu,A.;Atici, U.2006).

Os fluxos são compostos por uma mistura de óxidos que podem conter ferro-liga que estabilizam e protegem o arco e o metal aquecido da contaminação da atmosfera. Fornecem elementos de liga à poça de fusão, minimizam impurezas no metal de solda e influenciam o aspecto/formato do cordão. A aplicação de um fluxo ativo à base de óxidos e fluoretos é uma proposta alternativa para aumentar a penetração da solda e produtividade do processo, designado por A-PAW. Essa aplicação de fluxo promove a constrição do arco, aumenta a densidade de corrente/a força do arco atuante na poça e, também, altera o fluxo do metal na poça (Li, Q.; Xin-Hong, W.; Zeng-da, Z.; Ju, W.,2007). Entre as desvantagens desse processo, há a formação de escória com a possibilidade da fragilização do metal de solda devido às interações entre o fluxo e a poça de fusão.

Este problema foi minimizado com o desenvolvimento de uma nova metodologia de aplicação da camada de fluxo, denominada “caminho preparado de fluxo”. Nesta técnica, o arco é forçado a passar por um caminho delimitado pelo fluxo, reduzindo-se a diluição e, portanto, diminuindo-se a formação de escória e os efeitos no metal de solda. A utilização da técnica do “caminho preparado de fluxo” também parece viável como ferramenta para melhoria do processo. Richetti,A. e Ferraresi, V. 2005 comprovaram a aplicação destes fluxos no processo de soldagem TIG que proporcionou um aumento da penetração na junta soldada. O processo de soldagem a arco plasma se desenvolveu a partir do processo de soldagem TIG, diferindo-se apenas por operar com um arco elétrico constringido por um orifício. O jato de plasma como fonte de calor é utilizado para fundir o metal a ser soldado na condição de corrente contínua ou pulsada (Correa, E.O.;Costa, S.C.;Santos, J.N. 2008).

Baseado nas informações anteriores, o objetivo deste trabalho é verificar a potencialidade da aplicação da técnica do fluxo ativo e caminho preparado na soldagem a plasma em aço inoxidável ABNT 304. Este trabalho apresenta como objetivo o estudo da técnica de soldagem a arco plasma utilizando-se fluxo ativo, visando um aumento da produtividade e qualidade do cordão de solda sobre o ponto de vista geométrico e estrutural.



2. Metalurgia da soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos

2.1 Metal de base

A microestrutura da zona fundida à temperatura ambiente dos aços inoxidáveis austeníticos depende do comportamento da solidificação e da transformação no estado sólido. Schaeffler elaborou o diagrama de constituição para metal de solda e previu a microestrutura baseado na composição química (Kotecki, et al. 2000). Os aços inoxidáveis austeníticos solidificam como ferrita δ e austenita como fases primárias. Alterações na composição da liga podem mudar a formação primária de ferrita para austenita. Posteriormente, no estado sólido, a ferrita primária pode vir a se transformar em austenita. Duas espécies de martensita (α' CCC e magnética) com expansão de volume de 2,57% e (ϵ HC e não magnética) com contração de 0,81% podem se formar a partir da austenita.

As temperaturas M_s e M_d ($^{\circ}C$) podem ser calculadas a partir das equações (1) e (2):

$$M_s = 1302 - 42(\%Cr) - 61(\%Ni) - 33(\%Mn) - 28(\%Si) - 1667(\%[C + N]) \quad (1)$$

$$M_d(30/50) = 413 - 13,7(\%Cr) - 9,5(\%Ni) - 8,1(\%Mn) - 18,5(\%Mo) - 9,2(\%Si) - 462(\%[C + N]) \quad (2)$$

onde as composições estão em peso e $M_d(30/50)$ é a temperatura em que 50% do volume de α' é formado após deformação verdadeira de 30% em tração. A precipitação de carbonetos nos contornos de grão reduz a resistência à corrosão. Balmforth, M.C.; Lippold, J.C. 2000, apresentou um novo diagrama constitucional para aço inoxidável ferrítico-martensítico, evidenciando as regiões de martensita, ferrita e mistura de fases, figura 2.

A zona termicamente afetada (ZTA) representa a região próxima da região de contorno do cordão de solda, que não sofreu fusão, mas que teve sua estrutura alterada devido ao aporte térmico aplicado nessa região. A natureza da zona termicamente afetada depende da composição e microestrutura do metal base. O crescimento de grão é usualmente restrito, se a energia de soldagem não é extremamente elevada. Em metal base deformado a frio, a recristalização e o crescimento de grão resultam em amaciamento da ZTA. A formação de ferrita nos contornos de grão da austenita restringe o crescimento de grãos e de trincas na ZTA. Precipitados existentes no metal base podem se dissolver, e, posteriormente, precipitam durante e após o resfriamento com distribuição, tamanho e morfologia dependentes do ciclo térmico na ZTA e composição química do metal base.

O controle de temperatura entre passes e pré-aquecimento não é necessário em soldagem dos aços inoxidáveis, uma vez que têm pouco efeito na transformação ferrita-austenita. O tratamento térmico de pós-aquecimento é, algumas vezes, necessário para juntas espessas em temperaturas na faixa de 550-650 $^{\circ}C$ (abaixo do nariz da curva de precipitação) o que promove alívio de tensão. Aquecimento acima de 950 $^{\circ}C$ com resfriamento rápido pode dissolver ferrita e carbonetos dependendo do tempo, composição da solda e teor de ferrita. Os aços inoxidáveis são susceptíveis à fragilização pela formação da fase sigma.

A ausência de transformação martensítica durante a soldagem e sua boa tenacidade implica em insensibilidade a fissuração pelo hidrogênio. A sensibilidade a formação de porosidade também é baixa e a zona fundida tem propriedades que se assemelham às do metal de base. Assim, pode-se obter soldas adequadas sem pré-aquecimento e utilizadas em serviço sem tratamentos térmicos pós-soldagem.



2.2 Processo de soldagem a arco plasma

A soldagem a arco plasma é um processo que produz união por fusão através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e a peça ou um bocal constritor. O processo de soldagem arco plasma difere do processo TIG pelo fato do arco estar restringido por um bocal que limita o diâmetro do arco e aumenta a intensidade da fonte de calor. Utilizam-se dois fluxos de gases. O primeiro é de gás inerte que circunda o eletrodo, e deixa-o por um orifício no bocal constritor, na forma de um jato de gás aquecido, chamado gás de plasma. O segundo fluxo serve para a proteção e passa por um bocal externo, concêntrico ao bocal constritor. Este gás pode ser inerte ou uma mistura de gases. O plasma é formado através da ionização dos gases. A Figura 1 ilustra o processo de soldagem a plasma, evidenciando o eletrodo e os gases de proteção e de plasma.

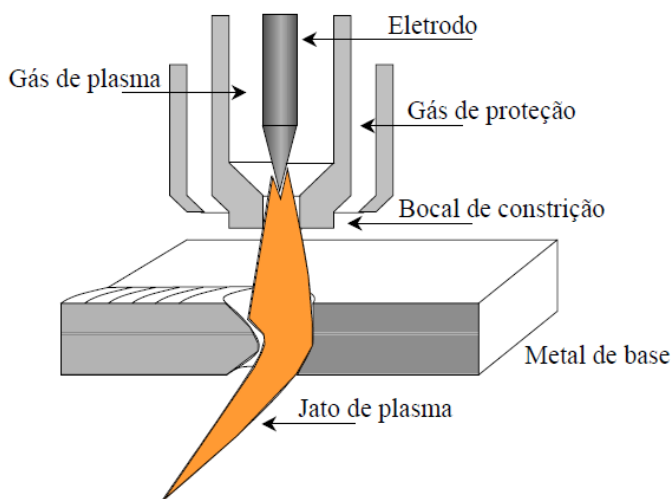


Figura 1: Processo de soldagem a plasma com o eletrodo, gases de proteção e de plasma e chapa metálica (Richetti, A.;Silva, H.R.;Oliveira,O.M. et al., 2003).

Há os processos de arco transferido (aberto entre o eletrodo de tungstênio e a peça) e não transferido (estabelecido entre o eletrodo de tungstênio e o bocal constritor) em que o calor necessário para a fusão é transmitido às peças somente pelo gás de plasma. Em soldagem de peças condutoras, utiliza-se o arco transferido pela sua melhor eficiência.

O arco na soldagem a arco plasma é estável, de alta intensidade, e o cordão de solda é pouco afetado pela distância da tocha de soldagem à peça. O equipamento de soldagem plasma exige cuidados especiais, com manutenção difícil, custo elevado o que pode, às vezes, inviabilizar o uso do processo em algumas aplicações.

O equipamento básico consiste de uma fonte de energia, sistema para abertura do arco, uma tocha de soldagem plasma, fonte de gases e sistema de controle. A fonte de energia é corrente constante, contínua ou pulsada, com capacidade entre 100A e 500A. A abertura do arco pode ser feita por um ignitor de alta frequência ou através de um arco-piloto. O arco de alta frequência é formado entre o anodo e catodo e transferido ao metal base. O arco de plasma, contudo, oferece maior densidade de energia em razão da colimação e da estabilidade direcional do feixe. Consequentemente, elevadas densidades de corrente e maior concentração de energia produzem maiores temperaturas do arco, maior velocidade de soldagem e a energia fornecida por comprimento é menor no processo PAW do que no processo TIG (



Lakshminarayanan, A.K. et al., 2009). O processo PAW com energia de potência superior a 10^9W/m^2 eleva a temperatura do material acima da fusão ou vaporização. Uma vez que o vapor é formado, expande, libera da superfície e produz uma força que pressiona o líquido para baixo e para a lateral. O resultado é um achatamento que possibilita aos elétrons ou íons do plasma se chocarem com o material da peça que é aquecida novamente. O achatamento torna-se maior e se transforma em furo o qual penetrará através da peça inteira (Wu, C.S. et al., 2009).

As principais variáveis da soldagem a plasma são a corrente, o diâmetro do orifício do bocal constritor, a vazão de gás de plasma e a velocidade de soldagem. O diâmetro do orifício do bocal constritor influi diretamente na concentração e intensidade do arco, e aumenta com a espessura das peças. A penetração do cordão de solda aumenta diretamente com a vazão de gás de plasma ou do orifício. Isso pode resultar em vantagens significativas na soldagem de materiais de difícil soldabilidade ou em aplicações em que se deseja produtividade ou maior precisão dimensional da peça soldada, como, por exemplo, na fabricação de tubos com costura de parede fina de alumínio, titânio ou aço inoxidável até espessuras de 12mm em passe único.

A técnica com fluxo ativo consiste em depositar uma fina camada de fluxo com solvente (acetona ou álcool) sobre a superfície da peça antes da soldagem. Durante a soldagem, o calor do arco funde e vaporiza a camada de fluxo o que altera a poça de fusão e o arco elétrico, produzindo-se um aumento na penetração (Perry, N. et al., 1998; Middel, W.; Den Ouden, G., 1998).

Fan, D.; Zhang, R.; Ushio, M. (2001) estudaram o efeito do uso de fluxos de óxidos de silício, titânio, cálcio, magnésio, cromo e de sais halogênicos na soldagem de chapas de aço médio carbono. Os autores observaram um aumento na penetração duas vezes maior em relação ao processo convencional.

Modenesi, P.J. et al. (2000) observaram aumentos na penetração do cordão de solda de até 300% na soldagem de aços inoxidáveis, usando-se a sílica como único componente de fluxo. Marya, S. (2002) demonstrou que a produtividade do processo pode ser três vezes superior ao processo convencional. Liu, L.M. et al., (2007) concluíram que a soldagem de liga de magnésio AZ31B utilizando apresentou relação profundidade/largura do cordão maior, quando o fluxo revestiu o arame e não a chapa. Uma mistura de 40% MnCl_2 + 60% ZnO como fluxo revestindo o arame produziu um cordão profundo e uma aparência externa satisfatória da junta.

As principais desvantagens da técnica residem na formação de escória sobre a superfície da solda, o que deteriora o acabamento superficial e contamina ou fragiliza o metal de solda (Paskell, T.; Lundin, C.; Castner, H. et al., 1997). A técnica “caminho preparado de fluxo” foi proposta objetivando-se evitar os efeitos negativos da presença do fluxo na geração de escória/propriedades mecânicas da solda. Essa técnica consiste em utilizar o fluxo como uma camada que isole elétrica e termicamente certas regiões da peça de tal forma a direcionar a área de incidência do arco (Richetti e Ferraresy, 2005).

A geometria do cordão de solda pode ser influenciada pela atração do arco elétrico por regiões de escória líquida e partículas sólidas flutuando sobre a poça de fusão e por variações no fluxo de metal líquido na poça de fusão. Os fatores principais considerados como controladores deste fluxo foram as forças eletromagnéticas (forças de Lorentz) resultantes da passagem de corrente elétrica para a poça de fusão, a força de empuxo devido a densidade do



metal líquido diminuir com o aumento da temperatura, as forças resultantes da variação na tensão superficial ao longo da superfície da poça de fusão (efeito Marangoni), e a força de arrasto causada pela passagem do gás de proteção sobre a poça de fusão.

Elementos ativos podem mudar o coeficiente de tensão superficial da poça e alterar a penetração, quando o seu teor está acima de um valor crítico. Há diversas maneiras disponíveis de adicionar os elementos ativos à poça, tais como ajustando a composição da matéria-prima, molhando a superfície do substrato com fluxo ativo e ajustando a concentração de gás de cobertura (Lu, S.; Fujii, H.; Nogi, K. 2003).

3. Metodologia

3.1 Materiais e métodos

A chapa com dimensões de 12,7x1300x6096mm utilizada nos experimentos foi de aço inoxidável austenítico ABNT304 laminada a quente, e as dimensões dos corpos-de-prova foram de 12,7x200x300mm obtidos através do corte a plasma no sentido de laminação. Esses corpos-de-prova foram decapados através de ácido clorídrico e antes da execução da soldagem receberam uma limpeza superficial, utilizando-se acetona e pano limpo, para a remoção de impurezas e elementos contaminantes.

Para realização dos testes de soldagem foram utilizados os fluxos de TiO_2 , SiO_2 , escória de processo de soldagem a arco submerso (SAW) e mistura na proporção de 50% em peso de TiO_2+SiO_2 . Os fluxos foram preparados em laboratório pela ESAB com granulometria abaixo de 325mesh. Para aplicação sobre as chapas, os fluxos foram misturados em acetona. A aplicação desses fluxos se fez manualmente com pincel, deixando-se metade da chapa do corpo-de-prova sem o revestimento protegida por uma fita adesiva na faixa de transição. A chapa para caminho preparado foi protegida com auxílio de fita adesiva de 5mm de largura na região do caminho preparado antes da aplicação do fluxo. Após a aplicação do fluxo e de sua secagem, removeu-se a fita adesiva, deixando a superfície do corpo-de-prova exposta nessa largura de 5mm. Em seguida, foi executada a solda nas regiões do corpo-de-prova sem revestimento, com revestimento e caminho preparado. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos.

TABELA 1: Parâmetros do processo de soldagem utilizados nos experimentos.

Parâmetros de Soldagem	Valores
Corrente (A)	185
Tensão média (V)	27,8
Vazão do gás do plasma (l/min)	1,6
Vazão de gás de proteção (l/min)	8,0
Velocidade de soldagem (cm/min)	16,0
Diâmetro do bocal de constrição (mm)	3,5
Recuo do eletrodo (mm)	2,2
Gás de plasma	95% de Ar + 5% de H_2
Gás de proteção	100%Ar



Gás de purga	100% Ar
Capacidade de corrente da tocha (A)	250
Movimento da tocha	Automático

Foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica multiprocesso, marca Miller OM-221Y, número de fabricação KB055116, que fornece uma corrente nominal de 450A, em corrente constante e eletrodo negativo.

A corrente máxima que a tocha de soldagem suporta é de 300A. Foi utilizado o eletrodo EWTh-2 com 3,2mm de diâmetro. A ponta do eletrodo foi cônica, com ângulo de ponta de 30°. O gás de proteção e de purga foi o argônio puro a uma vazão de 8,0l/min. Para realização das soldas de forma automatizada, utilizou-se uma mesa de coordenadas computadorizada.

Os corpos-de-prova foram obtidos através do corte da junta nas dimensões médias do comprimento das regiões sem e com fluxo. O corte foi feito em seção transversal com auxílio de serra de fita, marca Franho, de aço rápido. Esses corpos-de-prova foram utilizados para observação metalográfica/microdureza e medição de largura e profundidade do cordão. As medições de largura e penetração foram feitas após ataque químico com auxílio de paquímetro, marca Mauser, faixa de indicação 0 – 200mm e valor de uma divisão 0,05 mm. A Figura 2 mostra a técnica adotada de medição realizada para obter a dimensão da largura do cordão representada pela reta (L) e a penetração pela reta (P).

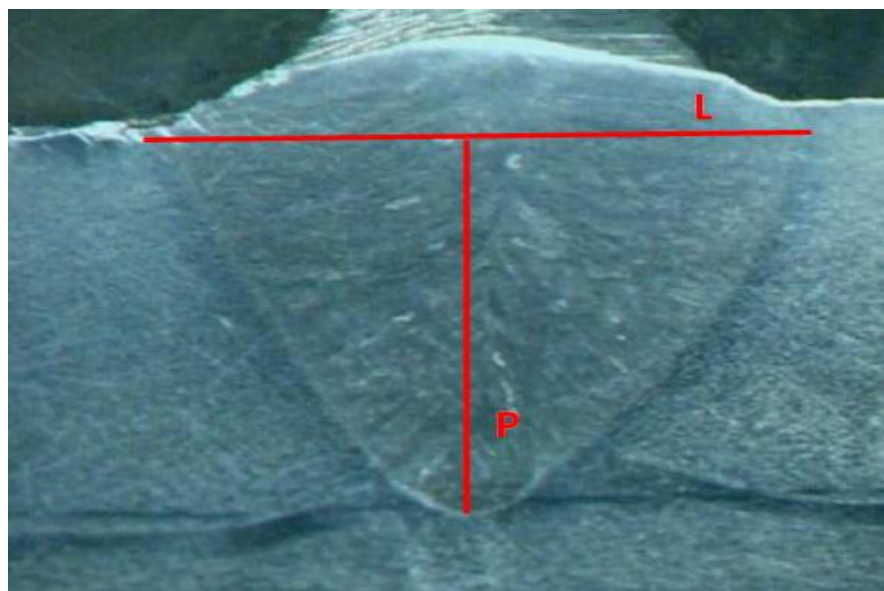


FIGURA 2: Esquema para medição da largura (L) e penetração (P) do cordão de solda.

4. Análise e discussão dos resultados

4.1 Material base e fluxos



A composição química da chapa e dos fluxos utilizados nos experimentos foram conforme mostrados na Tabela 2

TABELA 2: Composição química do aço inoxidável e dos fluxos utilizados em porcentagem em peso.

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%N ₂	%Nb/%Ti
0,044	1,10	0,39	0,0027	0,0010	18,04	8,02	0,008	0,0024	-	-

Tipo de Fluxo	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	P	C	S
TiO ₂	96,7	1,7	0,09	0,09	0,57	0,8	0,008	0,019	0,019
SiO ₂	----	99,5	----	----	-----	-----	0,003	0,023	0,011
SAW	0,255	20,20	13,68	14,01	1,24	0,074	-----	0,052	0,019
	F	MgO	K₂O	V₂O₅	Cr₂O₃	Na₂O	MnO	Nb₂O₅	Rb₂O
	7,92	29,85	0,486	0,056	0,875	3,26	1,825	0,111	0,004

A microestrutura do metal base é constituída de austenita com a presença de maclas de recozimento e tamanho de grão médio de 155+-10µm , conforme mostra na Figura 2.



Figura 2 : Microestrutura do metal base ABNT 304 , evidenciando a presença de austenita

Ataque: Acido oxálico Aumento : 100X

A Figura 3 mostra o aspecto do arco elétrico após fotografia sem e com a utilização de fluxo ativo e caminho preparado.



PERFIL DO ARCO ELÉTRICO					
AMOSTRAS	TESTE 1	TESTE 2	AMOSTRAS	TESTE 1	TESTE 2
SEM FLUXO SiO ₂			SEM FLUXO TiO ₂		
COM FLUXO SiO ₂			COM FLUXO TiO ₂		
SEM FLUXO CAMINHO PREPARADO SiO ₂			SEM FLUXO CAMINHO PREPARADO TiO ₂		
COM FLUXO CAMINHO PREPARADO SiO ₂			COM FLUXO CAMINHO PREPARADO TiO ₂		

PERFIL DO ARCO ELÉTRICO					
AMOSTRAS	TESTE 1	TESTE 2	AMOSTRAS	TESTE 1	TESTE 2
SEM FLUXO SiO ₂ +TiO ₂			SEM FLUXO ESCÓRIA-SAW		
COM FLUXO SiO ₂ +TiO ₂			COM FLUXO ESCÓRIA-SAW		
SEM FLUXO CAMINHO PREPARADO SiO ₂ +TiO ₂			SEM FLUXO CAMINHO PREPARADO ESCÓRIA-SAW		
COM FLUXO CAMINHO PREPARADO SiO ₂ +TiO ₂			COM FLUXO CAMINHO PREPARADO ESCÓRIA-SAW		

Figura 3: Imagens do arco elétrico durante o processo de soldagem.

Não se observou configuração e dimensões do arco definidas para os diferentes fluxos, isto é, ele oscilou nas diferentes direções estando concentrado e constrito em alguma situação e disperso em outras. Esta instabilidade do arco contrariou a teoria de constrição de Middel, W.; Den Ouden, G., (1998), e esses resultados parecem estar de acordo com Perry, N. et al., (1998). O fluxo de SiO₂ promove a deflexão do arco para trás principalmente para intensidade de corrente menor que 80A e reduz a tensão do arco, enquanto que o TiO₂ não



alterou essa deflexão do arco e elevou levemente a tensão do arco (Li Qing-ming et al., 2007). Não foi possível relacionar o tipo de fluxo com o comportamento e geometria do arco. Foi observado, por sua vez, variações na intensidade da luminosidade do arco elétrico como resultado da dissociação do fluxo e ionização do arco elétrico. Os cordões realizados com a técnica de caminho preparado apresentaram melhor acabamento superficial. Não se observou, também, variação macroscópica superficial do cordão nas regiões sem e com fluxo ativo/caminho preparado. A Figura 4 mostra a influência do modo de aplicação dos fluxos nos parâmetros geométricos largura e profundidade do cordão.

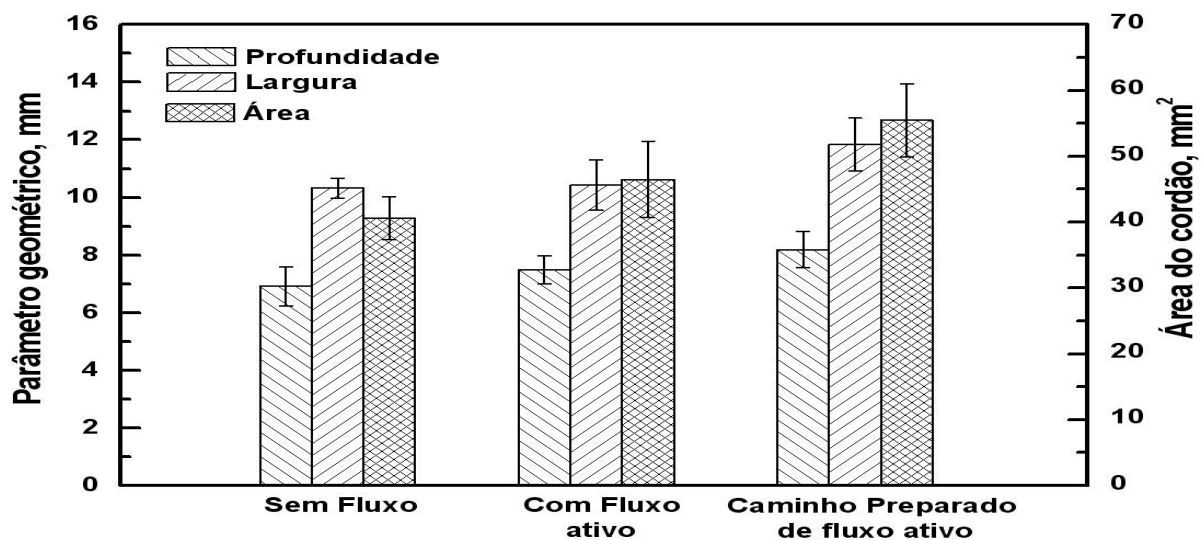


Figura 4: Evolução dos parâmetros geométricos para os processos sem fluxo, fluxo ativo e caminho preparativo.

Observa-se que não houve variação na profundidade do cordão, enquanto que a largura desse mesmo cordão foi maior, para o índice de confiança de 95%, nas condições de fluxo e caminho preparado. Esse resultado pode ser justificado pela maior ionização do fluxo.

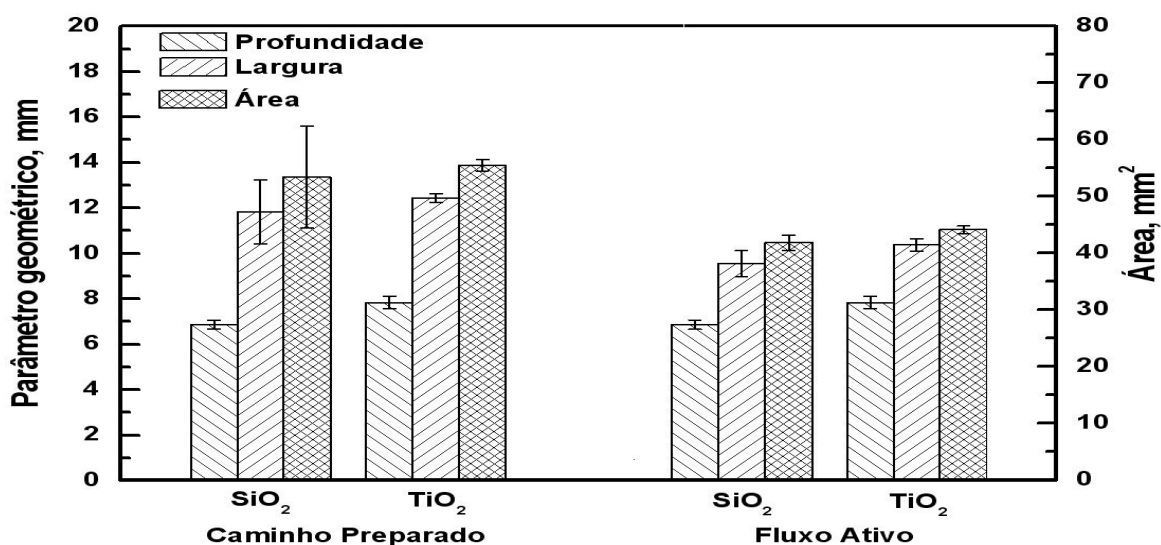


Figura 5: Evolução dos parâmetros geométricos para os processos de fluxo ativo e caminho preparado em função do tipo de fluxo utilizado.



Confirmou-se a maior eficiência na fusão do material através do processo de caminho preparado para os dois tipos de fluxo. Verifica-se, também, que a quantidade de fluxo associado ao posicionamento desse fluxo em relação ao arco afeta os parâmetros geométricos do cordão. Demonstra-se que a constrição direcionada da solda promovida pelo caminho preparado de fluxo tem um limite físico, o que nos sugere uma pouca influência no processo de soldagem a plasma, uma vez que o arco elétrico já é constringido pelo bocal constritor.

A figura 6 mostra a evolução da microdureza em função da distância em três regiões correspondentes ao metal de base, zona termicamente afetada e zona fundida.

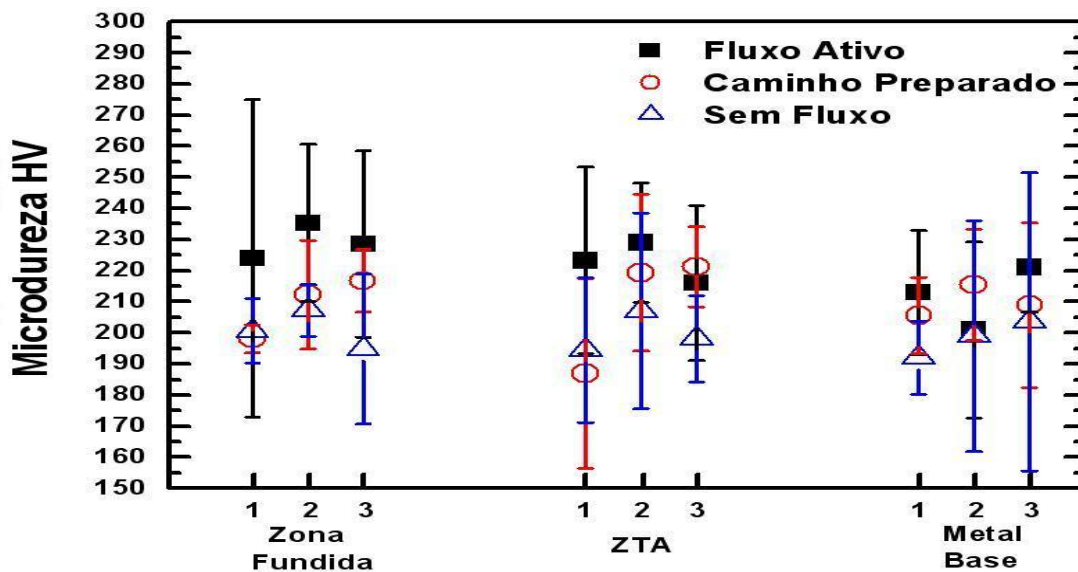
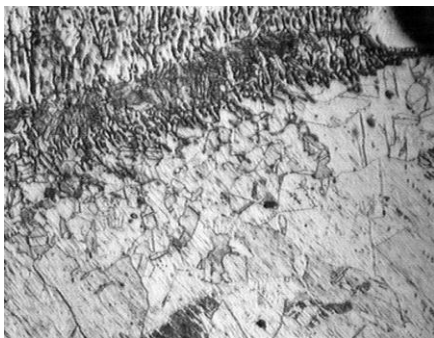


Figura 6: Evolução da microdureza para o metal de base, zona termicamente afetada e zona fundida.

Observa-se que não houve variação da microdureza para as diferentes regiões o que mostra que a fração de ferrita delta na zona fundida e crescimento de grão da austenita na ZTA não alterou os valores de microdureza para um nível de confiança de 95% (Figura 7).



(a)



(b)

Figura 7: Microestrutura da ZTA e zona fundida evidenciando a presença de austenita (fase clara) e zona fundida (a) Aumento 50X. Zona fundida com ferrita delta e austenita Aumento: 100X. Ataque eletrolítico.

Conclusões:

- Não se observou aumento da profundidade de penetração do cordão na soldagem a plasma.



- b) Constatou-se aumento da largura do cordão e área fundida, ao se utilizar fluxo ativo e caminho preparado em comparação à soldagem sem fluxo
- c) Não se constatou variação de microdureza entre as regiões correspondentes ao metal de base, zona fundida e termicamente afetada

Referências

- BALMFORTH, M.C.; LIPPOLD, J.C. A new ferritic-martensitic stainless steel constitution diagram *Welding Journal* 79(12), p. 339-345, 2000.
- FAN, D.; ZHANG, R.; GU Y.; USHIO M. Effect of flux on ATIG welding of mild steels. *Transactions Journal Research Inspection* v. 30, p. 35-40, 2001.
- FISHER, L.W.; *Selection of Engineering Materials and Adhesives* - ISBN 0824740475- CRC Press- 2005.
- LAKSMINARAYANAN, A.K.; SHANMUGAM, K.; BALASUBRAMANIAN, V. Effect of autogenous arc welding processes on tensile and impact properties of ferritic stainless steel joints *Journal of Iron and Steel Research International* v.16,p. 62-68, 2009.
- LI, Q.; XIN-HONG, W.; ZENG-DA, Z.; JU, W. Effect of activation flux on arc shape and arc voltage in tungsten inert gas welding *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* v.17, p.486-490, 2007.
- LIPPOLD, C.; KOTECKI, D.J. *Welding Metallurgy and weldability of stainless steel* ISBN 0471473790, 2005.
- LIU, L.M; CAI, D.H.; ZHANG, Z.D. Gas tungsten arc welding of magnesium alloy using activated flux-coated wire *Scripta Materialia* v.57, p. 695-698, 2007.
- LU, S.; FUJII, H.; NOGI, K. Marangoni convection and welded shape variations in Ar-O₂ and Ar-CO₂ shielded GTA welding *Materials Science and Engineering A* v. 380, p. 290-297, 2004.
- MARYA, S. Theoretical and experimental assessment of chloride effects in the ATIG welding of magnesium *International Institute of Welding Document*, Copenhagen, Denmark, 2002.
- MIDDEL, W.; DEN OUDEN, G. The Effect of Additives on Arc Characteristics in GTA Welding. In: *Trends in Welding Research, Proceedings of the 5th International Conference Pine Mountain, Georgia, USA*, p.394-399, 1998.
- MODENESI, P. J. *Soldabilidade dos Aços Transformáveis*. Belo Horizonte/MG: UFMG, 2004.
- MODENESI, P. J.; APOLINÁRIO, E.R; PEREIRA, I.M. TIG welding with single-component fluxes. *Journal of Materials Processing Technology* v.99, p. 260-265, 2000.
- PASKELL, T.; LUNDIN, C.; CASTNER, H. GTAW flux increases weld joint penetration *Welding Journal*. v.76, p. 57-62, 1997
- 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, USA*, p.520-525, 1998.
- RICHETTI, A.; SILVA, H. R.; OLIVEIRA, O.M; GROETELAARS, P. J. Soldagem A-TIG: Efeito da composição do fluxo e desenvolvimento de uma nova metodologia para a aplicação da camada de fluxo ativo. *Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica* 2003.
- RICHETTI, A., FERRARESI, V. A. Aplicação de fluxo ativo na soldagem TIG e Plasma In.: *III COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Joinville, SC, Anais do II COBEF*, 2005.
- TOTTEN, G.E. *Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies* CRC Taylor & Francis Group Portland USA, 2007
- WANG, Y.; CHEN, Q. On-line quality monitoring in plasma-arc welding *Journals of Materials Processing Technology* v.120, p.270-274, 2002.
- WU, C.S.; HU, Q.X.; GAO, J.Q. An adaptive heat source model for finite-element analysis of keyhole plasma arc welding *Computational Materials Science* v.46, p.167-172, 2009.