

O ARCO PULSADO EM SOLDAGEM FCAW DE AÇO INOXIDÁVEL

Alexandre de Oliveira Dias

Marcílio Alves

Edison Gonçalves

Universidade de São Paulo. Escola Politécnica

alexandredias@usp.br

maralves@usp.br

edison@usp.br

Sebastião Carlos da Costa

Universidade Federal de Itajubá

sccosta@unifei.edu.br

Resumo. Neste trabalho, foram analisadas 3 condições de soldagem para chapas de aço inoxidável AISI 304, com um arame tubular AWS E316LT1-4, utilizando o arco pulsado de uma fonte de tensão constante (CV), sendo variado a energia de soldagem através de 3 velocidades de soldagem, sem mudança na estabilidade visual do arco, no que tange a defeitos gerados, como respingos. Utilizou-se a técnica estatística de projetos e análise de experimentos (DOE); empregando numa primeira fase o planejamento fatorial fracionário e numa segunda fase otimizou-se esses parâmetros analisando-se suas influências na penetração, duzeza e características metalúrgicas. Análises dos perfis de micro-dureza Vickers não mostraram, de forma geral, grandes variações quando submetidos a diferentes níveis de energia de soldagem. No entanto, houve ganhos relacionados à facilidade de deposição através do controle da energia de soldagem, principalmente se esses parâmetros forem redimensionados para a soldagem fora de posição; assim como ao aumento da taxa de deposição, pois para a mesma energia de soldagem se trabalha com velocidades de arame bem maiores. O coeficiente de variação da velocidade de alimentação foi de suma importância na estabilidade do arco elétrico como na minimização de defeitos como trincas a quente, mesmo que o material tenha um índice de suscetibilidade à trinca de 13,93, sendo necessário chanfro de 60°, na garantia de penetração total, na união.

Palavras chave: Soldagem. Arame Tubular. FCAW. Aço Inoxidável. Arco Pulsado.

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual em que a busca por processos de soldagem eficientes e que produzam soldas eficazes com requisitos mais exigentes a cada dia, a utilização de técnicas e equipamentos de soldagem que proporcionem ganhos expressivos de qualidade e produtividade revela-se como um diferencial para garantir a competitividade das empresas no mercado. Através da utilização e do desenvolvimento de novas tecnologias é possível inovar os processos convencionais, com vistas à otimização do desempenho e o aumento da produtividade dos processos.

As indústrias se preocupam, de forma insistente, com a obtenção de procedimentos de soldagem que conjuguem a versatilidade, a produtividade e a qualidade, associado aos custos reduzidos nas suas operações, de forma a lhes garantir uma maior competitividade em um setor de concorrência acirrada. Entre as opções de execução de soldagens, o processo com arame tubular (FCAW) vem crescendo em utilização em função de algumas peculiaridades, como a facilidade de aplicação no campo (Oliveira, 2005 e Dias, 2009). Este processo possibilita a formação de cordão com alta qualidade e bom aspecto visual, podendo ser utilizado em todas as posições de soldagem através de ajustes adequados de seus parâmetros operacionais. Segundo Lima e Ferraresi (2006), o mesmo apresenta ainda uma alta produtividade, devido a sua elevada taxa de deposição e com um baixo índice de respingos, proporcionando alto rendimento de deposição.

Os processos mais utilizados na soldagem dos aços inoxidáveis são eletrodos revestidos, TIG, plasma, MIG e resistência elétrica. O processo de soldagem por arame tubular assemelha-se muito ao processo MIG, porém não existem trabalhos suficientes a respeito da soldagem de aços inoxidáveis utilizando-se este consumível o qual fornece vantagens significativas, tanto na qualidade do cordão de solda, como na diminuição dos custos de soldagem. Por esse motivo escolheu-se esse metal base e este tipo de classificação de consumível, pela extensa aplicação dos mesmos, poucos estudos a respeito e por ser possível a utilização deste na soldagem em todas as posições.

Na literatura, os aspectos associados ao estudo do arame tubular publicados (Oliveira, 2002 e Starling e Modenesi, 2006), se referem ao comportamento e ajuste do processo frente aos diferentes tipos de curvas sinérgicas existentes nos equipamentos de soldagem e sua posterior adaptação às condições de soldagens de chapas finas e em todas as posições. Neste sentido, uma curva sinérgica indicada para o processo GMAW-P, utilizando-se um consumível de aço inoxidável

para o processo FCAW mostra-se como uma das mais adequadas em termos de aplicações, do ponto de vista do controle do aporte térmico, estabilidade de arco e até na facilidade da soldagem fora de posição.

Através do uso de uma curva para o processo GMAW-P, a corrente oscila entre dois níveis, um baixo (corrente de base) e um alto (corrente de pico); de modo que a corrente média resultante seja inferior a corrente de transição (corrente onde há mudança de transferência globular/spray). A dificuldade operacional utilizando-se desse tipo curva está no ajuste dos parâmetros de pulsação que conduza a uma soldagem com um nível de qualidade superior, sendo muitas vezes isto feito normalmente por tentativa e erro. Por isso, apesar das vantagens evidenciadas, ainda é um processo pouco conhecido e consequentemente aceito no Brasil, sendo seus limites operacionais ainda não muito bem definidos. Alguns estudos têm sido publicados na literatura a respeito do ajuste dos parâmetros com relação a uma maior estabilidade do processo.

No modo pulsado, Oliveira (2005) entre outros, apresentam estudos da soldagem com arame tubular com proteção gasosa, procurando condições adequadas para soldagem na posição plana, estudando a influência dos parâmetros de pulso sobre as características da solda e culminando com a otimização dos resultados e minimizar a variabilidade dos mesmos. Utilizando este recurso, é possível controlar o tamanho da gota destacada durante cada pulso e a frequência de destacamento, desde que o tempo de pulso, amplitude e frequência sejam independentemente variados. Assim a grande vantagem na utilização do modo pulsado é que, devido à pequena energia fornecida ao processo, é possível executar soldas de pequenas espessuras e fora da posição plana e consequentemente, pelo baixo aporte térmico, é possível minimizar problemas de deformação e distorção em chapas, principalmente de pequena espessura (Norrish e Richardson, 1988).

2. METODOLOGIA E RESULTADOS

2.1. Trinca a quente na soldagem de revestimento

O AISI 304 tem índice de susceptibilidade a trincas (UCS) de 13,93; ou seja, boa resistência a trincas. Quando um metal base possui $UCS > 30$, indica que o mesmo possui baixa resistência a trincas (Silva & Paranhos, 2003). Usou-se corpos de prova de 3,1 mm de espessura.

Dentre todos os testes realizados apenas um corpo de prova apresentou um defeito de soldagem. Através de um ensaio visual, verificou-se uma aparente trinca de solidificação no sentido longitudinal (Figura 1), no corpo de prova 8; condição esta não esperada em função do exposto no parágrafo anterior. Durante a realização deste cordão com energia de soldagem de 805 J/mm, verificou-se que o coeficiente de variação da alimentação do arame foi maior nesta condição ($cva=5,88$) comparativamente a todos os outros testes preliminares ($cva=4,40$), após a otimização dos parâmetros de pulso.



Figura 1. Trinca de solidificação longitudinal do AISI 304 soldado com o arame tubular AWS E316LT-4, com $H = 805 \text{ J/mm}$.

2.2. Soldagem de Deposição Variando-se a Energia de Soldagem

Realizou-se soldagem de simples deposição, variando-se a energia de soldagem através da variação da velocidade de soldagem, mantendo-se constantes os parâmetros otimizados, conforme Tab. 1. O objetivo foi avaliar a relação entre o empenamento e o comprimento exato do cordão de solda (em toda a extensão, no sentido longitudinal do corpo de prova), assim como analisar a propriedade mecânica de dureza e as propriedades metalúrgicas através de análises metalográficas.

Após a realização das soldas de deposição com variação de energia, realizaram-se 3 testes, com o objetivo de analisar a penetração na junta de topo (Fig. 2). Dois testes foram feitos com o chanfro reto em cdp com 75 mm de comprimento. Tanto com a maior energia ($H=650 \text{ J/mm}$) como com a menor ($H=450 \text{ J/mm}$), ocorreu falta de penetração (Fig. 3).

Tabela 1- Condições de soldagem com variação da H através da vs.

Cond	Ip [A]	Ib [A]	tp [ms]	F [Hz]	tb [ms]	vs [cm/min]	V[volts]	ma [g]	H [J/mm]
1	350	60	2	100	8	39,3	25	48	450,4
2	350	60	2	100	8	35,4	25	46,1	500,0
3	350	60	2	100	8	32,2	25	48,1	549,7
4	350	60	2	100	8	29,5	25	47,4	600,0
5	350	60	2	100	8	27,2	25	47,1	650,7
6	350	60	2	100	8	30	25	46,8	590,0

O terceiro teste foi feito com um chanfro de 60°, abertura de raiz de 1,2mm e nariz de 1,5mm; ocorrendo boa penetração em quase toda extensão do cdp. Com esses resultados concluiu-se que a energia mínima de soldagem estaria próxima de 450 J/mm, sendo obrigatório a preparação de chanfro em V, com ângulo de bisel de 30°.

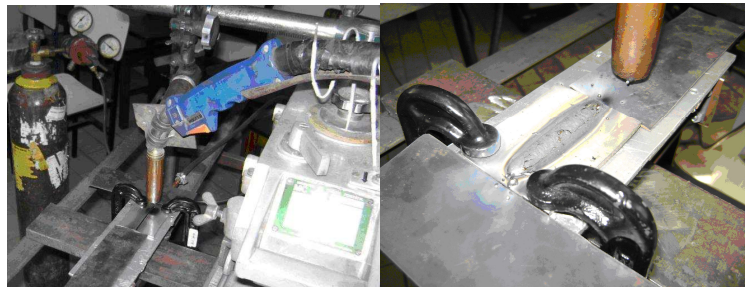


Figura 2. Testes para análise da penetração com H= 450 J/mm e H= 650J/mm.

Após a realização das soldas de deposição com variação de energia realizou-se 3 testes para analisar a penetração na junta de topo. Dois testes foram feitos com o chanfro reto em CDP com 80mm de comprimento. Tanto com a maior energia (650,7 J/mm) como com a menor (450,4 J/mm), ocorreu falta de penetração (Fig. 3a). O terceiro teste foi feito com um chanfro de 60°, abertura de raiz de 1,2mm e nariz de 1,5mm (Fig. 3b); ocorrendo boa penetração em quase toda extensão do CDP. Com esses resultados concluiu-se que a energia ideal de soldagem estaria no mínimo em 450 J/mm, com necessidade de um chanfro em V.

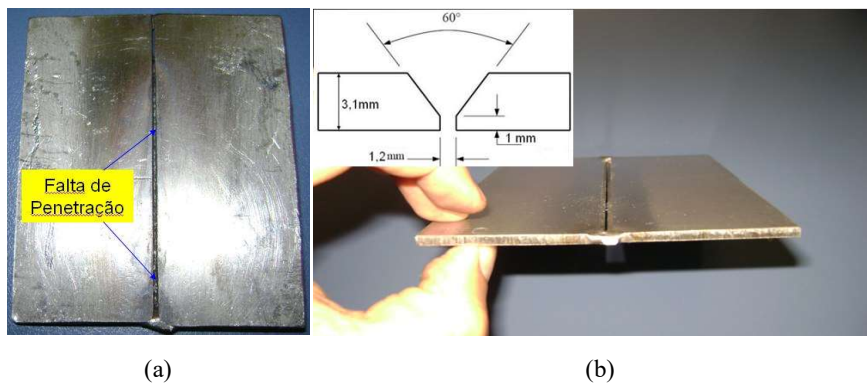


Figura 3. (a) Falta de penetração no teste de união com H=650J/mm, com chanfro reto. (b) Corpo de prova com um chanfro de 60°, abertura de raiz de 1,2mm e nariz de 1 mm.

Os corpos de provas soldados com energias de soldagem de 450,4 e 650,7 J/mm foram cortados, polidos e atacados quimicamente com Glicerégia (Petzow, 1978). Realizou-se nos mesmos testes de micro-dureza Vickers, com carga de 200 gF, e análise metalográfica.

Na soldagem de deposição foi determinado o perfil de micro-dureza para as energias de soldagem de 450,4 J/mm (Fig. 4) e 650,7 J/mm (Fig. 5), com não surgimento de fases frágeis nestas temperaturas, comuns em aços austeníticos.

Na menor energia desta etapa, a dureza média encontrada foi HV=204,1 (HV_{mín}=174,1 e HV_{máx}=218). Além desses valores mediu-se 5 valores na ZF, com HV_{média}=196,9. Muito embora não haja grandes variações no nível de dureza, percebe-se uma leve tendência de um maior nível de dureza na ZTA comparativamente a ZF, situação esta típica em corpos de prova soldados, principalmente levando em conta as transformações metalográficas mais intensas na ZTA.

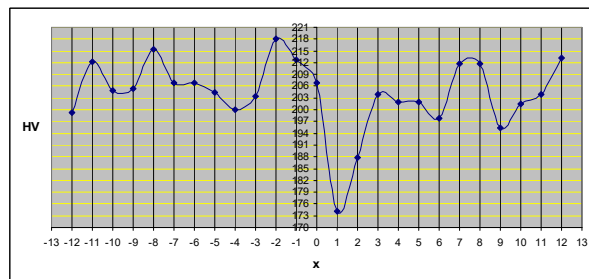


Figura 4. Perfil de micro-dureza Vickers no CDP soldado com H=450,4 J/mm.

Na maior energia desta etapa, a dureza média encontrada foi $HV_x=207,2$ ($HV_{\min}=192$ e $HV_{\max}=237,7$). Neste perfil de dureza percebe-se claramente a maior dureza na região fundida, próximo ao eixo y; assim como os menores valores de dureza na ZTA (Fig. 6). Esta tendência é oposta ao caso anterior. Provavelmente a maior energia de soldagem provocou uma maior ativação no depósito na ZF, o qual em função dos elementos metálicos adicionados no fluxo devem ter sofrido transformações metalúrgicas mais intensas, ocasionando o aumento de dureza nesta região. Segundo Heisterkamp et al (1993), uma maior quantidade de Mo e menor quantidade de Ni na ZF correspondente no arame, justificaria o aumento da dureza nessa região.

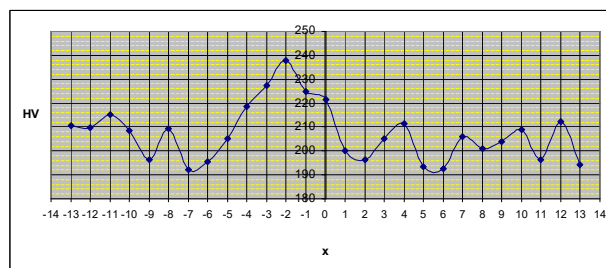


Figura 5. Perfil de micro-dureza Vickers no cdp soldado com H=650,7 J/mm.

3. CONCLUSÕES

Em função dos resultados e das análises realizadas através do uso de um arame de aço inoxidável para o processo FCAW (AWS A5.22 E316LT1) sob proteção gasosa com uma curva sinérgica desenvolvida para o processo GMAW-P na posição plana, soldando um aço inoxidável AISI 304, este trabalho permitiu concluir que:

- O coeficiente de variação da velocidade de alimentação é de suma importância na estabilidade do arco elétrico como na minimização de defeitos como trincas a quente, mesmo que o material tenha $UCS=13,93 < 30$.
- Na soldagem de simples deposição, a melhor condição de soldagem sugere uma corrente de pico em 350 A; tempo de pico em 2ms; corrente de base em 60 A; e f em 100 Hz. Sugerindo melhores resistências mecânicas em soldagens de união, através de junta de topo chanfrada em V, ângulo de bisel de 30°.
- A utilização da Metodologia de Projeto e Análise de Experimentos-DOE é muito útil na modelagem de processos de soldagem, com uma pequena quantidade de experimentos.
- Anomalias em algumas condições de soldagem provavelmente foram geradas em função na irregularidade da alimentação do arame (coeficiente de variação da velocidade de alimentação), que poder ter sua causa associado à contaminação da poça de fusão pelo ar, com possível redução do NF pelo N e formação de pequenos poros e uma trinca a quente.
- Análises dos perfis de dureza não mostraram grandes variações quando submetidos aos diferentes níveis de energia de soldagem. Algumas variações se devem provavelmente a heterogeneidade da microestrutura em função de diferentes condições de resfriamento.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas (GMSIE) da POLI-USP, EEL-USP, UNIFEI, UFTM, FAPEMIG (pelo apoio financeiro), às Empresas ESAB (aramé tubular), ArcellorMittal (metal base) e ITW Welding (ensaios complementares).

5. REFERÊNCIAS

- DIAS, A.O., 2009. *Análise da Influência dos Parâmetros de Pulsção na Soldagem do Aço Inoxidável AISI 304 Através do Arame Tubular AWS E316LT1-4*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- LIMA, A.C. e FERRARESI, V.A., 2006. “Estudo dos Modos de Transferência Metálica de um Arame Tubular Autoprotégido com Variação na Distância Bico de Contato-Peça”. In: *31º Congresso Nacional de Soldagem - CONSOLDA*. São Paulo, Brasil.
- MARQUES, P.V. et al., 2005. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2ª Edição.
- MONTGOMERY, D.C. e RUNGER, G.C., 2003. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*, LTC Editora, Rio de Janeiro, 2ª Edição.
- NORRISH, J. e RICHARDSON, L.F., 1988. “Metal Transfer Mechanisms”, *Weld & Metal Fabrication*, p.17-22.
- OLIVEIRA, L.M., 2005. *Uma Investigação da Influência dos Parâmetros de Pulso em Soldagem com Eletrodo Tubular com Proteção Gasosa*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- OLIVEIRA, M.E.J., 2002. *Estudo dos Parâmetros para Soldagem Fora de Posição com Arame Tubular*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- PETZOW, G., 1978. *Metallographic Etching-Metallographic and Ceramographic Methods for Revealing Microstructure*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- SAITO, S.M., 2001. *Análise da Influência dos Parâmetros de Pulso sobre a Geometria do Cordão de Solda e Rendimento de Deposição Obtidos pelo Processo de Soldagem com Arame Tubular Utilizando Arco Pulsado*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru.
- SILVA, C. FERRARESI, V.A.; SCOTTI, A., 2000. “A Quality and Cost Approach for Welding Process Selection”. *Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences*, Vol. 23, p. 389-398.
- SILVA, E.M., 2007. *Comparação de Características Operacionais no Processo com Eletrodo Tubular utilizando as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado na Posição Vertical Descendente*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- SCOTTI, A., 2008. “A Portrait of the Welding Research in Brazil”, *Soldagem & Inspeção*, Vol.13, p. 160-164.
- STARLING, D.M.C. e MODENESI, P. J., 2000. Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares, *Soldagem & Inspeção*, Vol.11, n.3, p.147-155.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

The Pulsed Arc in FCAW Stainless Steel Welding

Alexandre de Oliveira Dias

Marcílio Alves

Edison Gonçalves

Universidade de São Paulo. Escola Politécnica

alexandredias@usp.br

maralves@usp.br

edison@usp.br

Sebastião Carlos da Costa

Universidade Federal de Itajubá

sccosta@unifei.edu.br

Abstract. In this work, 3 welding conditions were analyzed in AISI 304 stainless steel plates with an AWS E316LT1-4 tubular wire, using the pulsed arc in a constant voltage (CV) source. The welding energy was varied by 3 speeds welding, with no change in arc stability, concerning defects as spattering. Statistical technique and analysis of experiments (DOE) were used. Firstly, using a fractional factorial design was applied, and in a second phase, these parameters were optimized analyzing their influence on the penetration, hardness, and metallurgical features. Analyzes of the Vickers microhardness profiles did not show, in general, great variations when submitted to different levels of welding energy. However, there were gains related in deposition by welding energy control, mainly if these parameters are resized in welding of position; as well as to the increase of deposition rate, since for the same welding energy works with much larger wire speeds. The coefficient of variation of feed velocity is important in electric arc stability as well as minimization of defects like hot cracks, even if the material has a crackability index 13.93. Nevertheless, it is necessary bevel angle 30°, ensuring full penetration for joining.

Keywords: Welding, tubular wire, FCAW, stainless steel, pulsed arc.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.