



Desafiando os Problemas da Soldagem MIG/MAG Robotizada na Posição Vertical Ascendente

Américo Scotti, Ph.D.

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica,
38.400-902 - Uberlândia - MG

Jair Carlos Dutra, Dr. Ing.

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, 88.040-900 - Florianópolis - SC

RESUMO

Uma comparação entre os processos MIG/MAG com corrente pulsada e com transferência por curto circuito foi feita através de soldagens robotizadas na posição vertical ascendente. Características e dificuldades inerentes à automação foram verificadas, especialmente em relação à instabilidade do cordão. Ambas versões do processo mostraram requerer um rigoroso controle do comprimento inicial do arco para evitar esta instabilidade. O MAG-CO₂ apresentou maior tolerância no ajuste dos parâmetros, além de necessitar de equipamentos menos sofisticados. Entretanto, o acabamento do cordão é mais convexo, com uma penetração mais arredondada. A versão pulsada, por outro lado, proporciona melhor acabamento de cordão e menos respingos, apesar de requerer um sistema automático para acendimento e controle do comprimento do arco.

INTRODUÇÃO

O uso de processos de soldagem a arco, na forma automatizada, apesar da grande e crescente aplicação nos países desenvolvidos, encontra-se no Brasil num estado ainda emergente. Esta timidez na procura de uma maior qualidade e produtividade pode ser explicada pela complexidade da técnica, agravada pela falta de capacitação de pessoal e pela pouca disponibilidade de equipamentos nacionais. Quanto aos equipamentos, as dificuldades de importação até a pouco tempo verificadas, poderiam ser usadas como justificativa para a pequena oferta. Quanto à complexidade da técnica, é sabido que a maioria dos processos de soldagem sob automação são empregados na posição plana ou horizontal. No caso particular do processo MIG/MAG, apesar da sua notável participação no mercado, a maior aplicação ainda se dá na forma semi-automática.

Os méritos do processo MIG/MAG baseiam-se na sua versatilidade operacional e na sua alta capacidade de produção. Esta versatilidade se deve à enorme gama de combinações possíveis, através da seleção do gás, diâmetro e C.Q. de eletrodos, comprimentos do eletrodo e arco (tensão) e tipo e intensidade de corrente. Estas combinações resultam em características que fazem a distinção das diversas classes do MIG/MAG, tais como por curto circuito, por spray ou pulsado.

Apesar do razoável balanço entre produtividade e qualidade alcançado pelo uso semi-automático MIG/MAG, a automação total do processo continua sendo um objetivo a ser perseguido em todos países. Entretanto, tentativas de se automatizar totalmente o processo têm às vezes esbarrado em dificuldades que desencorajam o uso do mesmo em situações particulares, tais como juntas fora de posição plana e de difícil acesso. No caso específico da robotização, a superação destas barreiras torna-se imperativo.

A experiência acumulada pela aplicação da classe MIG/MAG com curto circuito (MAG-CO₂) por longos anos, faz com que sua utilização seja bem difundida. Entretanto, sua automação tem sido referenciada como de risco pela formação de falta de fusão. O acabamento do cordão e o nível de respingos são outras preocupações. Por outro lado, é uma técnica aplicável sem grandes sofisticções, tais como a não necessidade de fontes especiais (usa-se fontes retificadoras convencionais do tipo tensão constante).

O uso de técnicas mais modernas, como o MIG com corrente pulsada, tem um apelo tecnológico baseado na

reconhecida capacidade de controle e uniformidade da poça de fusão (possibilitando soldagens fora de posição), poucos respingos e ótimo acabamento. Contrariamente ao MAG com curto circuito, esta técnica requer fontes do tipo corrente constante com um sistema de controle para manter o comprimento do arco constante, ou fontes trabalhando do modo misto, além de dispositivos para garantir uma abertura homogênea do arco (com fontes do tipo tensão constante estas sofisticções não são requeridas).

Tentativas de se usar o MIG pulsado em soldagens automatizadas na posição vertical têm, similarmente, demonstrado problemas por falta de fusão e penetração (Smith, 1988 e Herridge, 1988). Também a existência de instabilidade do cordão têm sido verificada e estudada (Scotti et al, 1991). Esta instabilidade se caracteriza por um autocrescimento do comprimento do arco ao longo da solda, por razões ainda obscuras, levando um cordão inicialmente regular à deteriorização de sua forma. Este fato impede a soldagem contínua de trechos longos de solda, condição facilmente superada se a soldagem for feita na forma semi-automática (o soldador corrige intuitivamente o crescimento do arco).

Estes fatos incentivaram os autores deste trabalho a desenvolverem um programa para viabilizar a soldagem MIG/MAG com o uso de robôs, em uma condição típica onde se requer a automatização, ou seja, na soldagem de chapas de grandes comprimentos posicionadas na posição vertical. O objetivo é comparar a utilização da corrente pulsada com o método convencional por curto circuito, subsidiando a opção pelo uso das duas técnicas.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para reduzir ao máximo o número de variáveis durante o estudo, optou-se em desenvolver a comparação na posição vertical ascendente, utilizando-se uma junta apropriada para soldagem automatizada de alta produção (Figura 1), feita de aço comum ao carbono. A automação do processo foi feita através da utilização de um robô com 6 graus de movimento, o qual permitia o movimento vertical longitudinal, concomitante ao movimento transversal de oscilação da tocha (freq. = 1 Hz; amplitude = 3 mm; tempo morto em cada lateral = 225 msec).

Para as soldagens foi usada uma fonte eletrônica do tipo transistorizada chaveada no secundário. Esta fonte sofreu adaptações para permitir a soldagem em corrente pulsada pelo

comando integral da corrente. No alimentador de arame foi instalado um sistema de controle de tal forma a permitir, quando acionado, a manutenção do comprimento do arco constante. Isto é conseguido através da variação da velocidade de alimentação em função do desvio da tensão de soldagem, a qual é comparada a uma tensão de referência previamente definida. Este sistema é conhecido como "controle externo".

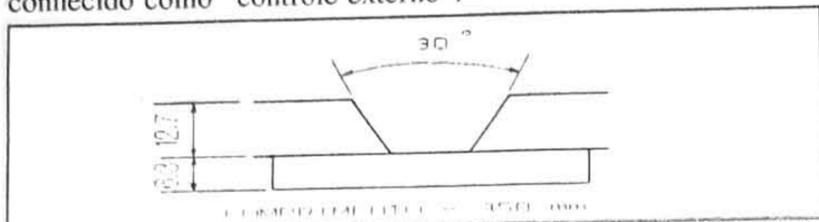


Figura 1 - Forma e dimensões da junta dos corpos de prova.

Os seguintes parâmetros e variáveis de soldagem foram fixados e mantidos constantes durante todo o trabalho (fonte no modo corrente constante): corrente de pulso = 350 A; corrente de base = 76 A; tempo de pulso = 3,5 msec; tempo de base = 9,8 msec; corrente média = 150 A; distância bico de contato-peça = 18 mm; arame classe AWS E70S6 diâmetro = 1,2 mm; velocidade de soldagem = 14 cm/min.

Como gás de proteção foram usadas várias misturas de Argônio com gás carbônico e oxigênio, obtidas através de misturadores especiais (vazão de 12 a 15 l/min). A referência destas misturas neste trabalho é resumidamente feita através da codificação "AX", onde, "A" indica o componente da mistura com argônio (C = gás carbônico; O = oxigênio) e "X" o seu teor. Por exemplo, o gás C7 que dizer 93% Ar + 7% CO₂.

Para monitorar o processo foi usado uma placa de aquisição de 8/12 bits, 25 KHz, acoplada a um microcomputador PC 286 e um "software" para leitura em 3 canais de corrente média, tensão média e velocidade de alimentação. O sinal de corrente é obtido por um sensor de "efeito Hall" e tratado eletronicamente, juntamente com a tensão. O sinal da velocidade de alimentação é obtido por um sensor foto-elétrico ("encoder"), que, depois de devidamente tratado, é também adquirido pela placa de aquisição. Tanto a placa de aquisição como os softwares, sensor foto-elétrico e circuitos eletrônicos foram desenvolvidos no Labsolda/UFSC.

ENSAIOS E RESULTADOS

Numa primeira etapa do trabalho, uma série de corpos de prova foi feita objetivando observar a repetibilidade do fenômeno de instabilidade do cordão em corrente pulsada (Scotti, 1991). Com a observância do mesmo, variação do tipo de gás de proteção foi empregada para avaliar o efeito. Todas as soldas foram feitas nas mesmas condições acima referidas, mas com o controle externo desativado. Os resultados são mostrados na tabela 1.

Tabela 1. Avaliação das soldas da primeira série.

CP	Gás	V. Alim. (m/min)	V _{médio} (V)	Características do cordão
2	C5	4,28	21,3	Início bom, com deteriorização após 25 mm de solda
3	C7	4,30	21,8	Início bom até 1/3 do CP, instabilizando-se, voltando a regular no final
4	O6	4,20	19,4	Arco muito curto, mas o cordão mostrou-se regular, principalmente no começo

Em todos os casos a estabilidade do arco mostrou-se adequada (visualmente), reduzindo-se um pouco no CP4 devido ao comprimento muito curto do arco, o que provocava curtos circuitos. Foi observado também que havia uma tendência para um crescimento da tensão do arco ao longo da solda.

Para tentar reter este crescimento da tensão, uma segunda série de soldagem foi programada, acionando-se agora o controle externo (etapa 2). A tabela 2 apresenta os resultados.

Tabela 2 - Avaliação das soldas da segunda série

CP	Gás	V _{médio} (V)	Características do cordão
5*	C5	21,1	Cordão regular nos primeiros 25 mm, desestabilizando-se à frente
7	C13	22,0	Cordão regular ao longo do CP, tornando-se gradualmente convexo
8	C5	20,5	Cordão regular ao longo da solda
9	C10	21,0	Cordão regular ao longo da solda
10#	C10	21,4	Inicialmente regular, com deteriorização da forma no final
11	O2	19,0	Cordão irregular ao longo da solda
12	O2	18,1	Cordão regular ao longo da solda, mas arco muito curto

* - não usou-se oscilação da tocha para verificar a influência desta variável.
- retirou-se novamente o controle externo, para confirmar os resultados do CP9, o qual foi feito em duplicata.

Pelos resultados foi verificado que com o controle externo o comprimento do arco manteve-se constante, e conseqüentemente a tensão, mas houve uma variação crescente da velocidade de

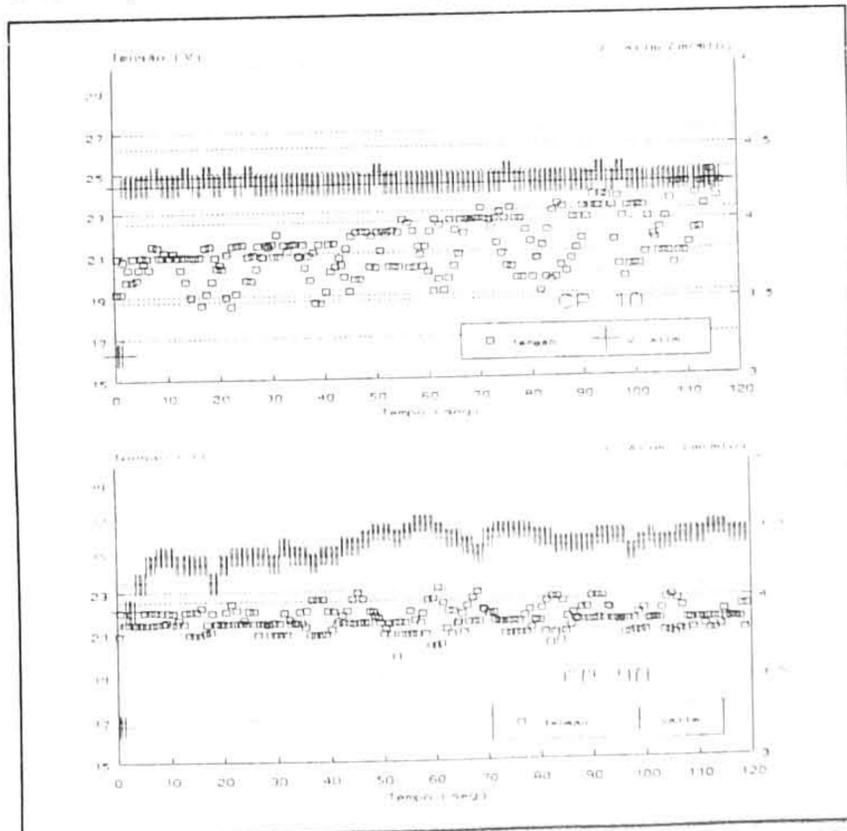


Figura 2 - Efeito da variação da tensão (CP10) e da velocidade de alimentação (CP9B) ao longo da soldagem.

alimentação do arame. Este fenômeno é ilustrado na Figura 2, comparativamente ao fenômeno de crescimento da tensão observado quando o controle externo estava desativado.

Como o valor inicial do comprimento do arco (tensão) parece ser de importância fundamental, a terceira etapa foi escalonar a tensão de referência do controle externo em 3 valores ao longo da solda, obtendo-se assim 3 comprimentos de arco.

Usando-se tensões de referência de 19V, 20,5V e 21,5, foi realizado a solda do CP 16 (gás C7, $I_{\text{médio}} = 150$ A), medindo-se uma tensão média e velocidade média de alimentação de (19,5V - 4,42 m/min), (10,9V - 4,21 m/min) e (21,9 V - 3,85 m/min) em cada trecho sob a respectiva tensão de referência. Verificou-se um cordão regular no 1o. trecho (menor tensão) e um cordão totalmente irregular no 3o. trecho. O segundo trecho mostrou ser o limite, pois tendia a iniciar a instabilidade. A Figura 3 ilustra o comportamento da tensão e velocidade de alimentação durante a soldagem do CP 16, mostrando como o trecho central apresenta melhor estabilidade.

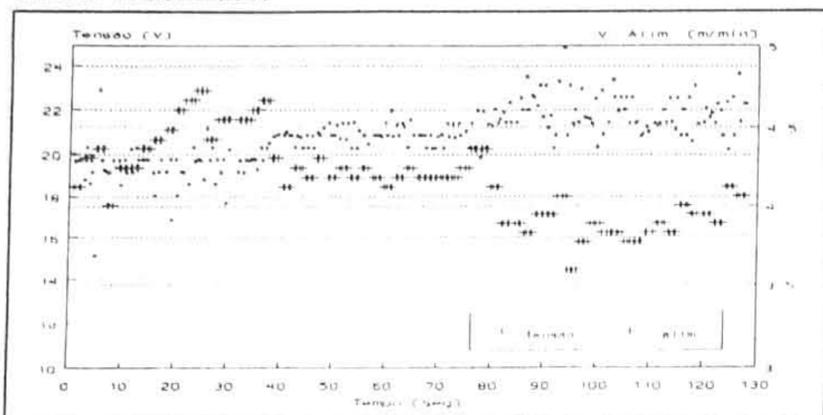


Figura 3 - Oscilograma da tensão e velocidade de alimentação com variação escalonada da V_{ref} no controle externo do CP16.

Uma nova série de corpos de prova (quarta etapa) foi soldada usando-se corrente pulsada e controle externo (alguma variação no gás de proteção) para confirmar a faixa útil de ajuste da tensão de referência, ou seja, a faixa de tensão que permita obter cordões estáveis. A tabela 3 mostra os detalhes de cada soldagem, ressaltando-se a variação da velocidade de alimentação.

Tabela 3 - Soldagem MIG/MAG pulsada com fonte corrente constante com manutenção do comprimento de arco pelo Controle Externo

CP	Gás de Proteção	Tensão de Referência (V)	Tensão média (V)	Δ Veloc. Alim. (m/min)
17	Ar+13%CO ₂	21,5	22,0	4,10 a 4,35
18	Ar+5%CO ₂	20,0	20,7	4,04 a 4,30
19	Ar+10%CO ₂	21,0	21,5	4,10 a 4,60
20	Ar+2%O ₂	18,0	18,1	3,91 a 4,46

Todos corpos de prova demonstraram bom aspecto de cordão, como exemplificado pela Figura 4. O CP20 foi ainda repetido (com a denominação CP21) com um valor de tensão de referência de 19 V. O comprimento de arco relativo à esta tensão mostrou-se longo para evitar a instabilização do cordão.

Numa quinta etapa, procedimento análogo ao CP16 foi então implementado para o processo MAG com curto circuito (usando-se CO₂ puro como gás de proteção), ao se soldar o corpo de prova CP22. A fonte de soldagem foi ajustada para trabalhar como fonte do tipo tensão constante, naturalmente desativando-se o controle externo. A velocidade de alimentação foi ajustada para 4,3 m/min (valor médio para se obter uma corrente em torno de 150 A) e a tensão em vazio da fonte ajustada escalonadamente nos valores de 22, 23,5 e 25 V para cada trecho do corpo de prova. A tensão, corrente e velocidade de alimentação médias também foram monitoradas, apresentando os valores de (18,5 V - 166,2 A - 4,26 m/min) para o 1º trecho, de (21,3 V - 159,6 A - 4,27 m/min) para o 2º trecho e de (25,1 V - 151,9 A - 4,25 m/min) para o 3º trecho do corpo de prova.

O primeiro trecho apresentou cordão aceitável em termos de estabilidade do cordão, mas muito convexo (Figura 5(a)), mas

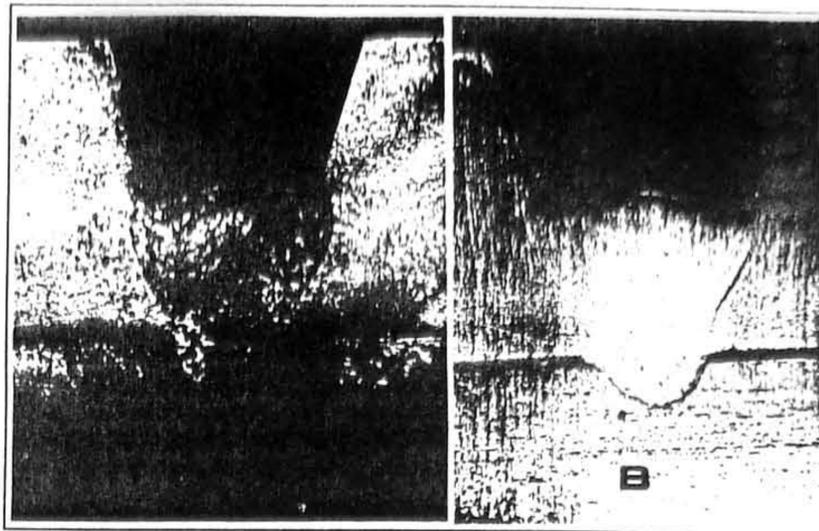


Figura 4 - Seções de corpos de prova soldados com MIG/MAG pulsado automatizado (robô); (a) CP16, (b) CP20.

o aspecto do cordão foi muito bom no segundo trecho. No terceiro trecho o cordão iniciou-se ruim, desestabilizando-se totalmente no final. Para confirmar que a instabilidade do cordão também acontece para o processo com corrente constante (sem pulsação) quando o comprimento do arco é elevado, o corpo de prova CP23 foi soldado com ajuste da tensão da fonte de 22,5 V e velocidade de alimentação do arame de 4,3 m/min. A tensão média monitorada foi de 19,1 (devido aos curtos circuitos) e a corrente média de 167 A. O cordão apresentou-se um pouco convexo, mas de bom aspecto. Diferentemente do processo com corrente pulsada, não houve nenhum auto crescimento de tensão ao longo da soldagem.

O experimento CP22 foi repetido, mas desta vez ativou-se o controle externo (corpo de prova CP24). Ao se fazer isto com

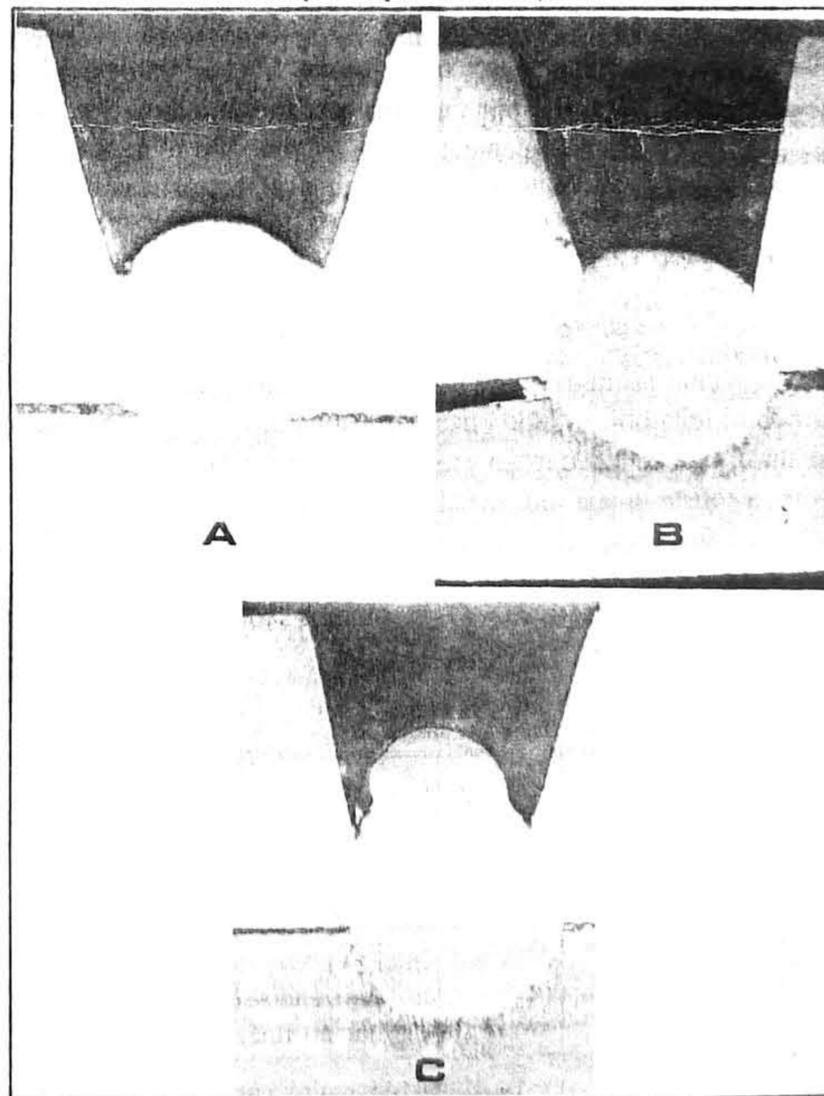


Figura 5 - Seções de corpos de prova soldados com MAG curto circuito (CO₂, automatizado (robô)); (a) CP22 - 1º trecho, (b) CP24 - 2º trecho, (c) CP24 - 3º trecho.

uma fonte de tensão constante, toda vez que se mudava escalonadamente a tensão na fonte, o controle externo fazia com que a tensão retornasse ao valor de referência (no caso 21,5 V), através da variação da velocidade de alimentação. A tensão, corrente e velocidade de alimentação médias monitoradas apresentaram os valores de (21,7 V - 124,6 A - 3,05 m/min) para o 1º trecho, de (21,6 V - 157,9 A - 4,05 m/min) para o 2º trecho e de (21,9 V - 198,1 A - 5,80 m/min) para o 3º trecho do corpo de prova.

O aspecto do cordão foi bom nos 1º e 2º trechos (Figura 5(b)), tornando muito convexo e tendendo ao escorrimento no 3º trecho (Figura 5(c)), devido ao valor excessivo de corrente e taxa de deposição. De qualquer forma, ficou demonstrado que a tensão de soldagem (correspondente ao comprimento do arco) é o parâmetro principal a ser controlado (21,5 V está dentro da faixa útil prevista pelos resultados do CP22).

DISCUSSÃO

Pela 1ª etapa experimental (tabela 1), fica evidenciado uma característica de auto-crescimento do arco, o que leva o cordão a se instabilizar quando o arco ultrapassa a um certo valor. Pela etapa número dois (tabela 2) pode-se verificar que o controle externo é capaz de manter o comprimento do arco, mas através de correção da V_{alim} . Ficou também confirmado, pelas 3ª e 4ª etapas, a existência de uma faixa útil de tensão de referência que deve ser seguida para se conseguir uma soldagem correta com MIG pulsado, na posição vertical ascendente.

Estes resultados concordam plenamente com os observados no trabalho anterior (Scotti et al., 1991) mesmo usando condições diferentes. Verificou-se agora que o tipo de gás aparentemente não influencia o fenômeno. Naturalmente a tensão relativa a um dado comprimento do arco é diferente para cada gás. Pelos resultados, concluiu-se que a faixa de ajuste de tensão de referência do controle externo (para a dada junta, eletrodo, gás de proteção Ar+CO, e I média) é de 19 a 20 V, o que representa pouca tolerância para erros de ajuste do equipamento. A mistura Ar+2%O₂ parece ter uma faixa ainda menor (18 e 18,5 V).

Entretanto, ainda continua obscura a razão do aparecimento do fenômeno de auto-crescimento do arco em soldagens com corrente pulsada na posição vertical ascendente. A hipótese de estabilidade térmica da chapa já foi recusada pelos experimentos iniciais (Scotti et al., 1991). Agora surge a hipótese de haver um período para estabilização térmica do próprio eletrodo e bico de contato. O fato da velocidade de alimentação (ou tensão) crescer inicialmente, mas tender a uma estabilização após algum tempo sugere esta segunda hipótese; com a estabilização da temperatura no bico de contato, o eletrodo estaria mais quente, aumentando sua taxa de fusão.

Uma faixa útil de ajuste para o MAG com curto circuito mostrou-se também existir (5ª etapa). Interpolando os resultados, pode-se dizer que a faixa para ajuste inicial de tensão na fonte é de 22,5 a 24,0 V, para a dada V_{alim} e diâmetro do eletrodo, o que corresponde a uma faixa de trabalho de 19 a 24 V. Pode-se perceber que a tolerância é bem maior do que para pulsada.

Um outro aspecto interessante de se observar na comparação entre as duas classes do processo é a geometria do cordão. Enquanto a corrente pulsada proporciona uma penetração mais pontiaguda e maior no centro (Figura 4), a corrente constante com CO₂ apresentou cordões com menor penetração no centro, mas mais arredondada (Figura 5). Entretanto, não houveram evidências de que qualquer tipo de penetração fosse melhor do que a outra, uma vez que não se notou defeitos como falta de fusão ou penetração.

A menor sofisticação de equipamentos e menor custo de

gases aplicados na soldagem MAG-CO₂ são capazes de apresentar resultados semelhantes aos realizados com MIG pulsado, em soldagens automatizadas na posição vertical ascendente. Por outro lado, a maior convexidade do cordão observada na soldagem com curto circuito pode ser uma desvantagem deste método.

Outra desvantagem da versão com curto circuito é o nível de respingos, que acarreta problemas de obstrução do bocal da tocha, característica esta importante principalmente em soldagens robotizadas, devido à necessidade de constantes limpezas. Finalmente, a oscilação da corrente típica de processos com fonte do tipo tensão constante, e em particular com curto circuito, pode também se figurar como desvantagem em relação à constância da corrente obtida com fontes eletrônicas do tipo corrente constante.

CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho confirmam a existência da instabilidade da poça de fusão durante a soldagem automatizada com corrente pulsada, na posição vertical ascendente. Esta instabilidade é causada por um fenômeno de auto-crescimento do comprimento do arco. O controle externo mostrou-se capaz de evitar o auto-crescimento do arco.

Conclui-se ainda que as dificuldades oriundas da soldagem MIG/MAG automatizada, em especial a robotizada, na posição vertical ascendente, podem ser superadas caso sejam empregados equipamentos apropriados para automação e rigorosos controle na fixação dos parâmetros.

O processo na forma curto circuito apresenta a vantagem de ser mais barato e simples do ponto de vista de equipamento e gases de proteção, além de ter uma tolerância maior para ajuste dos parâmetros de soldagem (tensão e corrente). Porém, o nível de respingos e o acabamento do cordão podem dificultar a aplicação em alguns casos.

Já a soldagem MIG/MAG com corrente pulsada se caracteriza pelo bom aspecto do cordão e estabilidade do arco, mas requer um severo controle do ajuste dos parâmetros, uma vez que existe uma estreita faixa útil para ajuste da tensão (comprimento do arco). Além disto, a soldagem automatizada só é possível caso o equipamento permita a manutenção do comprimento do arco por auto-controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Herridge, B.J. "An Investigation of Weave Parameters in Multi-Pass Orbital MIG Welding, MSc. Thesis, Cranfield Institute of Technology, Aug. 1988, 109 p.
- Scotti A. et al. "Bead Instability of Mechanized P-MIG Welding in Vertical-Up Position", *The International Journal for the Joining of Materials*, vol. 3(1), 1991, IOM, Denmark, 1991.
- Smith D.S. "Automatic All Position MIG Welding of H.P. Pipework Butt welds", *Aiton/CEGBEPD Project Report R 1094/88/1* (restrict circulation), 1988.

Abstract

Robotic weldings were carried out in vertical-up position to compare MIG/MAG process with pulsed current against with dip transfer. The complexity for automation is checked, with special emphasis played on bead instability. Both version of the process demand a strict control of the initial arc length to avoid bead misshapen. MAG-CO₂ shows to present a wider tolerance range for parameters selection besides requiring less sophisticated equipment. On the other hand, bead finish is more convex and the penetration rounded. The pulsed version develops better bead finish and less spatter, yet demanding automatic arc length control.