



UTILIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR PLASMA COM A TÉCNICA “KEYHOLE” NO PASSE DE RAIZ DE UMA JUNTA EM V

André Richetti

Valtair A. Ferraresi

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. P. 593 – 38.400-902 – Uberlândia, MG, Brasil

***Resumo.** Apesar de ser considerado um processo de fabricação de alta produtividade, o processo de soldagem por plasma (PAW) é ainda usado em pequena escala na indústria brasileira. Os principais obstáculos à implantação deste processo são a falta de informações técnicas e as dificuldades operacionais inerentes à soldagem, os quais são ainda mais críticos na soldagem de juntas com preparação em V. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um envelope operacional para o passe de raiz em uma junta em V de aço carbono, utilizando a técnica “keyhole”. O levantamento do envelope operacional foi feito em termos de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma. Verificou-se uma faixa operacional estreita dos parâmetros de obtenção do envelope operacional. Apesar do objetivo do trabalho ter sido alcançado, a repetibilidade do cordão de solda não foi obtida de forma adequada para o envelope operacional. Foi verificado que o gás de proteção está diretamente relacionado com a estabilidade do “keyhole” e pode ter sido um dos fatores responsáveis pela não repetibilidade do cordão de solda nas condições do envelope operacional.*

***Palavras-chave:** PAW, “Keyhole”, Envelope operacional, Passe de raiz.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente busca pelo aumento da produtividade por parte das indústrias está suportada na constante melhoria dos equipamentos e processos de fabricação. O processo de soldagem por plasma é um processo que, embora criado a mais de 40 anos, foi recentemente aperfeiçoado para a sua utilização na área industrial, visando principalmente o desenvolvimento da qualidade e da produtividade em soldagem.

Devido às suas características, este processo de soldagem é considerado como sendo uma extensão do processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). No processo PAW, em contraste ao GTAW, o arco é forçado a passar por um orifício de diâmetro reduzido, sofrendo um efeito constritivo, ou seja, um estreitamento da coluna do arco. Este efeito é obtido através de um bocal de constrição, mostrado na Figura 1.

O bocal de constrição, colocado na saída da tocha, obstrui a passagem do arco na sua forma normal, resultando em intensas modificações nas características do jato de plasma. Os

gases que compõem o jato de plasma adquirem velocidades extremamente altas na saída da tocha, forçando o arco a assumir o perfil geométrico do orifício constritor. Estas duas características, o perfil do arco e a alta velocidade do jato de plasma, atuam conjuntamente para conferir rigidez, estabilidade direcional e grande concentração de energia ao arco plasma (AWS, 1991).

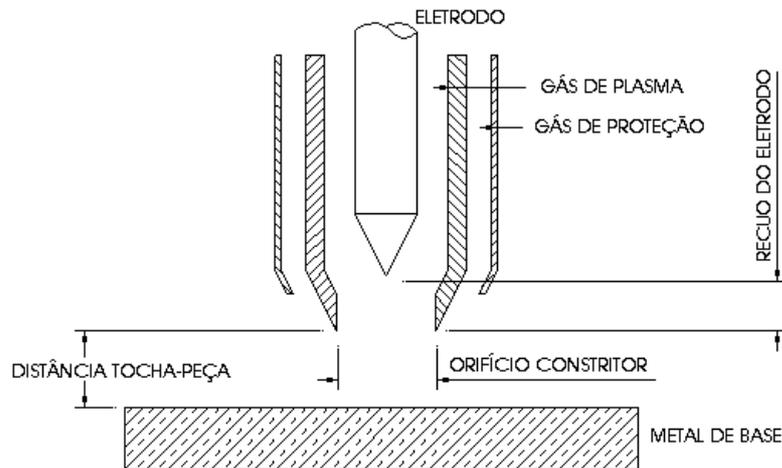


Figura 1- Bocal do processo PAW (AWS, 1991).

No processo PAW são utilizadas duas fontes de gás, o gás de plasma e o gás de proteção. O gás de plasma é um gás inerte que envolve o eletrodo de tungstênio dentro da tocha. Na soldagem, este gás é aquecido a ponto de ser ionizado, recebendo neste estado, a designação de plasma. A saída do plasma pelo bocal de constrição promove a formação do jato de plasma, ou seja, a coluna do arco de soldagem, responsável pelo transporte de cargas entre o eletrodo e a peça a soldar (AWS, 1991).

O gás de proteção é o gás que efetivamente vai atuar para a proteção da solda contra a contaminação pelo ar atmosférico, podendo ser inerte ou ativo. Este gás flui por um bocal externo e envolve a área da peça sobre a qual o arco incide, formando uma barreira que impede a contaminação da solda. A necessidade de uma fonte adicional de gás decorre do fato de que as altas velocidades imprimidas ao jato de plasma (gás de plasma) tornam o seu fluxo turbulento, não garantindo uma proteção eficiente da poça de fusão (AWS, 1991)

O processo PAW abrange três técnicas de soldagem: microplasma, “melt-in” e “keyhole”. A técnica microplasma é aplicada em operações de soldagem de chapas finas com níveis de corrente que não excedem 25 ampères e a técnica “melt-in” corresponde ao modo convencional por fusão, produzindo soldas semelhantes às do processo GTAW (Santos & Quintino, 1993).

Na técnica “keyhole”, a superfície do metal é exposta a um feixe de energia concentrada superior a 10^9 W/cm², promovendo a vaporização de parte do metal fundido da poça de fusão. O efeito conjunto da pressão do feixe ou arco e da pressão de vaporização criam condições para a formação de um pequeno orifício em forma de funil, como mostra a Figura 2, o qual é usualmente chamado de “keyhole” ou buraco de fechadura. Neste caso, a poça de fusão estende-se através da peça a unir e é mantida pelas forças de tensão superficial (Kim et al., 1994).

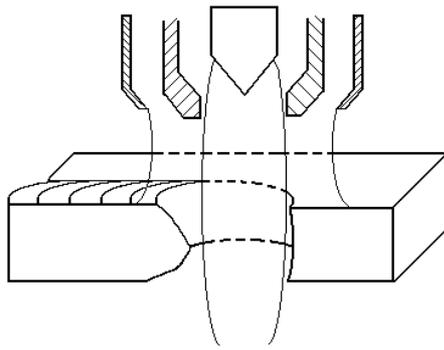


Figura 2- Técnica “keyhole” de soldagem (Walsh & Nunes Jr, 1989).

A formação e a manutenção do “keyhole” ao longo da solda são conseguidas através de certas combinações de vazão de gás de plasma, corrente e velocidade de soldagem, definidas para determinados tipo e espessura do metal de base. Esta relação determina o equilíbrio entre as forças (tensão superficial da poça de fusão e as forças decorrentes da corrente de soldagem e da velocidade do gás de plasma incidente) que atuam sobre a poça de fusão, criando as condições necessárias para a sustentação do “keyhole” (AWS, 1991).

Em operações com a técnica “keyhole”, a medida que o arco penetra através do metal de base, a força do jato de plasma desloca o metal fundido para as extremidades da poça de fusão, abrindo o orifício do “keyhole”. O movimento de translação da tocha força este metal fundido a se deslocar em torno do jato de plasma em direção à parte posterior da poça de fusão, preenchendo o orifício do “keyhole” e formando o cordão de solda (AWS, 1991).

Entretanto, as dificuldades operacionais desta técnica (“keyhole”) e a falta de informações sempre representaram um obstáculo à sua utilização. Aplicações em juntas chanfradas são muito pouco divulgadas, sendo, na maioria dos casos, apresentada apenas uma condição de soldagem específica para o caso analisado. Isto se torna um problema quando, por dificuldades do próprio processo, não se consegue reproduzir condições apresentadas em trabalhos científicos. Garcia & Norrish (1995) constataram esta dificuldade e citaram que este problema pode ocorrer até mesmo com a utilização de equipamentos de diferentes marcas. Com isso, a principal motivação para a elaboração deste trabalho advém da necessidade de maiores informações relacionadas com a soldagem deste processo em junta chanfrada (em V).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foram utilizadas na soldagem, uma fonte eletrônica multiprocesso (Inversal 300 da IMC) e uma tocha modelo PWM-300 da Thermal Dynamics Corporation. Os corpos de prova foram confeccionados a partir de chapas de aço ABNT 1020 com dimensões 150 x 50 x 12,7 mm, com preparação de chanfro em V, face de raiz de 5 mm e ângulo de chanfro de 90°, conforme é mostrado na Figura 3. Foram utilizados um eletrodo EWTh-2 de 4,8 mm de diâmetro com ângulo de ponta de 60° (ângulo do vértice) e um bocal de constrição com 2,8 mm de diâmetro. O recuo do eletrodo em relação à face do bocal de constrição foi mantido em 2,35 mm. O gás de plasma empregado em todos os testes foi o argônio puro (comercial). Para a proteção da solda, foram utilizados dois gases, inicialmente o argônio puro e posteriormente uma mistura de argônio com 25% de CO₂. A distância tocha-peça foi de 6,0 mm.

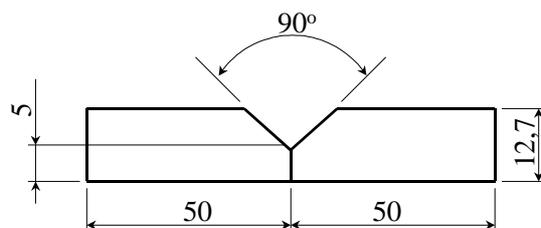


Figura 3- Configuração da junta.

A vazão do gás de plasma foi controlada através de um dispositivo do tipo rotâmetro com capacidade de medida de 0,3 a 3,7 l/min e uma válvula do tipo agulha. A vazão do gás de proteção foi controlada através de um medidor de vazão digital e do regulador de pressão do cilindro de gás, sendo esta mantida em 4,5 l/min.

A abertura inicial do “keyhole” foi feita através de um retardo no acionamento do movimento de translação da tocha em relação ao acendimento do arco. Desta forma, todas as soldas realizadas foram iniciadas com o “keyhole” formado em uma das extremidades do corpo de prova. Durante a soldagem, os sinais de tensão e corrente de soldagem foram adquiridos através de um sistema de aquisição de dados.

Foram utilizados dois critérios para avaliar os cordões de solda. O primeiro foi baseado nas medidas do reforço da raiz da solda, sendo o limite superior estabelecido em 2 mm para uma condição adequada de soldagem. Este critério foi obtido do trabalho de Hoffmeister et al. (1996). O segundo foi o aspecto visual do cordão de solda, que foi feito de forma subjetiva.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Levantamento do envelope operacional

Nesta fase foi feito um estudo sistemático para a determinação do envelope operacional. Este estudo foi baseado em um planejamento experimental, Fatorial Completo, onde os fatores de entrada foram a corrente, a velocidade de soldagem e a vazão do gás de plasma e o fator de controle foi a penetração (reforço da raiz da solda).

A partir de uma condição de soldagem obtida da literatura (Paula Jr, 1997) foram feitos testes preliminares visando determinar as faixas dos parâmetros de soldagem para a obtenção do “keyhole”, os quais foram conduzidos sob uma atmosfera protetora de argônio. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos nos testes com a condição da literatura e outras onde variou-se a velocidade de soldagem e a vazão de gás de plasma.

Tabela 1- Resultados obtidos em testes feitos a partir da condição da literatura.

Corrente (A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Vazão de gás de plasma (l/min)	Resultado
*245	14	1,6	Penetração excessiva
245	17	1,4	Penetração incompleta
245	17	1,5	Penetração incompleta
245	17	1,6	Penetração incompleta
245	17	1,7	Penetração excessiva
245	17	1,8	Penetração excessiva

* Condição da literatura.

Os testes apresentados na Tabela 1 mostram que não foi conseguida nenhuma condição de soldagem com “keyhole” através da alteração dos parâmetros de soldagem (velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma). Foi observada a passagem direta de penetração incompleta para penetração excessiva (defeito “humping”) com o aumento gradual da vazão de gás de plasma.

A Figura 4 mostra uma solda com o defeito “humping” (penetração excessiva). Nesta condição, a poça de fusão não consegue se sustentar, formando as protuberâncias características deste defeito. Segundo Garcia & Norrish (1995), este defeito pode ocorrer em condições com elevadas vazões de gás de plasma. Entretanto, não foi conseguida a condição do “keyhole” com a redução da vazão do gás de plasma (Tabela 1), de modo que poderia haver outro fator envolvido na instabilidade do “keyhole”.

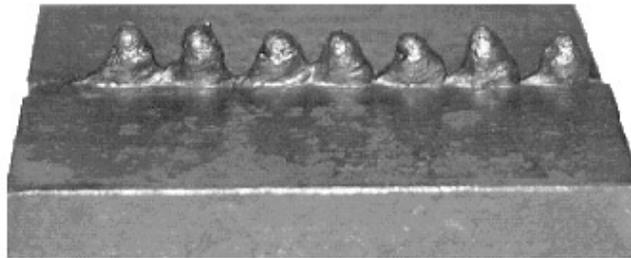


Figura 4- Defeito “humping”.

A solução para o problema do defeito “humping” reside na melhoria das condições de sustentação da poça de fusão. Segundo Garcia & Norrish (1995), quanto maior as dimensões da poça de fusão, mais difícil é o controle do processo que é determinado pelo desequilíbrio causado nas forças que atuam sobre o “keyhole”. Desta forma, medidas para reduzir as dimensões da poça de fusão poderiam eliminar ou amenizar este problema. Isto pode ser conseguido, por exemplo, com a utilização de um gás de proteção com maior condutividade térmica. A retirada de calor do arco pelo gás de proteção produz um efeito constritivo semelhante ao efeito provocado pelo bocal de constrição (Martinez et al., 1994), permitindo obter um arco mais estreito. A redução da área de incidência do arco sobre a peça causaria uma redução na quantidade de material fundido na poça de fusão, reduzindo o seu peso e melhorando as condições para obtenção do equilíbrio das forças que atuam para a sustentação do “keyhole”.

Desta forma, para tentar resolver o problema, o argônio puro utilizado como gás de proteção foi substituído por uma mistura de argônio com 25% de CO₂. A realização de novos testes preliminares permitiu obter soldas boas com a formação do “keyhole”, definindo os níveis dos fatores de entrada para o planejamento experimental em:

- Corrente: 190, 200, 210 e 220 A;
- Velocidade de soldagem: 12, 14 e 16 cm/min;
- Vazão de gás de plasma (argônio puro): 0,8, 1,0 e 1,2 l/min.

A Tabela 2 mostra as combinações obtidas no planejamento experimental (fatores de entrada) e os resultados de soldagem (fator de resposta), sendo:

- Adequada: Designação dada às soldas com penetração completa e estável (com a formação do “keyhole” na soldagem e com o reforço na raiz da solda até 2 mm).
- Penetração excessiva: Designação dada às soldas em que ocorreu o corte da junta ou naquelas em que se observou um reforço excessivo na raiz da junta (acima de 2 mm ou com o defeito “humping”).

- Penetração incompleta: Designação dada às soldas que não apresentaram penetração total na junta (ausência de “keyhole”).

Tabela 2- Planejamento do experimento e resultados dos testes.

Teste	Vazão de gás de plasma (l/min)	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Resultado da soldagem (Penetração)
1	0,8	190	12	Adequada
2	0,8	190	14	Incompleta
3	0,8	190	16	Incompleta
4	0,8	200	12	Incompleta
5	0,8	200	14	Adequada
6	0,8	200	16	Incompleta
7	0,8	210	12	Excessiva
8	0,8	210	14	Incompleta
9	0,8	210	16	Incompleta
10	0,8	220	12	Excessiva
11	0,8	220	14	Incompleta
12	0,8	220	16	Incompleta
13	1,0	190	12	Adequada
14	1,0	190	14	Incompleta
15	1,0	190	16	Incompleta
16	1,0	200	12	Adequada
17	1,0	200	14	Adequada
18	1,0	200	16	Incompleta
19	1,0	210	12	Excessiva
20	1,0	210	14	Adequada
21	1,0	210	16	Incompleta
22	1,0	220	12	Excessiva
23	1,0	220	14	Excessiva
24	1,0	220	16	Excessiva
25	1,2	190	12	Adequada
26	1,2	190	14	Incompleta
27	1,2	190	16	Incompleta
28	1,2	200	12	Adequada
29	1,2	200	14	Adequada
30	1,2	200	16	Adequada
31	1,2	210	12	Excessiva
32	1,2	210	14	Excessiva
33	1,2	210	16	Adequada
34	1,2	220	12	Excessiva
35	1,2	220	14	Excessiva
36	1,2	220	16	Excessiva

Verifica-se na Tabela 2 que o aumento da vazão do gás de plasma de 0,8 até 1,2 l/min resultou na expansão da faixa de operação com penetração adequada, isto é, com um “keyhole” estável. Para uma vazão de gás de plasma de 0,8 l/min, apenas 2 testes (testes 1 e 5)

apresentaram uma penetração adequada. O aumento da vazão de gás de plasma ampliou a região operacional, de modo que para vazões de 1,0 e de 1,2 l/min a penetração foi adequada para 4 (testes 13, 16, 17 e 20) e 5 (testes 25, 28, 29, 30 e 33) condições de soldagem, respectivamente.

Os resultados obtidos para vazões de gás de plasma de 1,0 e 1,2 l/min mostraram-se bastante coerentes dentro do aspecto de soldagem, evidenciando uma separação lógica entre os testes onde ocorreram penetração incompleta, adequada e excessiva. Por outro lado, os resultados obtidos com vazão de gás de plasma de 0,8 l/min não expressaram a mesma coerência, não evidenciando uma separação óbvia entre os testes de penetração incompleta e adequada e mostrando que esta vazão é insuficiente para obter uma condição estável de soldagem.

Quintino et al. (1992) comenta que o aumento da vazão de gás de plasma resulta no aumento da velocidade do jato de plasma e, conseqüentemente, no aumento da pressão de estagnação (pressão do arco sobre a poça de fusão), o que facilita a formação e manutenção do “keyhole”. Entretanto, o aumento da velocidade do jato de plasma vai gerar uma maior força de arraste sobre a poça de fusão, tendendo a aumentar cada vez mais a penetração. A manutenção de um “keyhole” estável (penetração adequada) vai depender muito do equilíbrio entre estes dois efeitos. Neste trabalho foi observado que o aumento da vazão de gás de plasma conferiu cada vez mais estabilidade ao “keyhole”, que se reproduziu com o aumento da região operacional.

O acabamento superficial das soldas com penetração adequada foi bom, ou seja, uniforme e sem descontinuidades. As soldas com penetração incompleta apresentaram um acabamento razoável, prejudicado provavelmente pelo refluxo de gás de plasma para a superfície da poça de fusão com a não manutenção do orifício do “keyhole” aberto durante a soldagem.

Em função do comportamento observado e para um correto fechamento do envelope operacional, foram realizados testes adicionais com vazão de gás de plasma de 1,3 l/min. Estes testes apresentaram reforço na raiz da solda próximo ao limite estabelecido (2 mm). Aumentos posteriores na vazão de gás de plasma tenderiam a gerar penetração excessiva. Desta forma, o envelope operacional é mostrado na Figura 5.

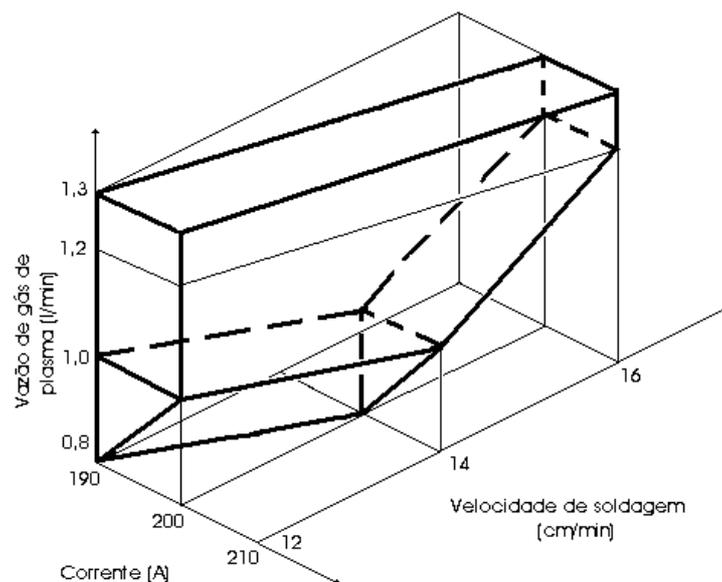


Figura 5- Envelope operacional.

Nota-se na Fig. 5, que o envelope operacional apresenta uma faixa de operação bastante estreita em termos de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma. Esta

característica também foi observada no trabalho da Paula Jr (1997), onde é citado que o equilíbrio das forças que atuam sobre a poça de fusão, requerido para a manutenção do “keyhole”, é conseguido apenas em uma região bastante estreita de parâmetros de soldagem. Este fato está diretamente relacionado com as dificuldades operacionais exibidas pelo processo em termos de aplicação e de não repetibilidade na solda. A Figura 6 mostra um exemplo do “keyhole” obtido em um dos testes realizados (parte final da solda), onde o ponto branco da solda indica a existência do “keyhole” durante a soldagem.

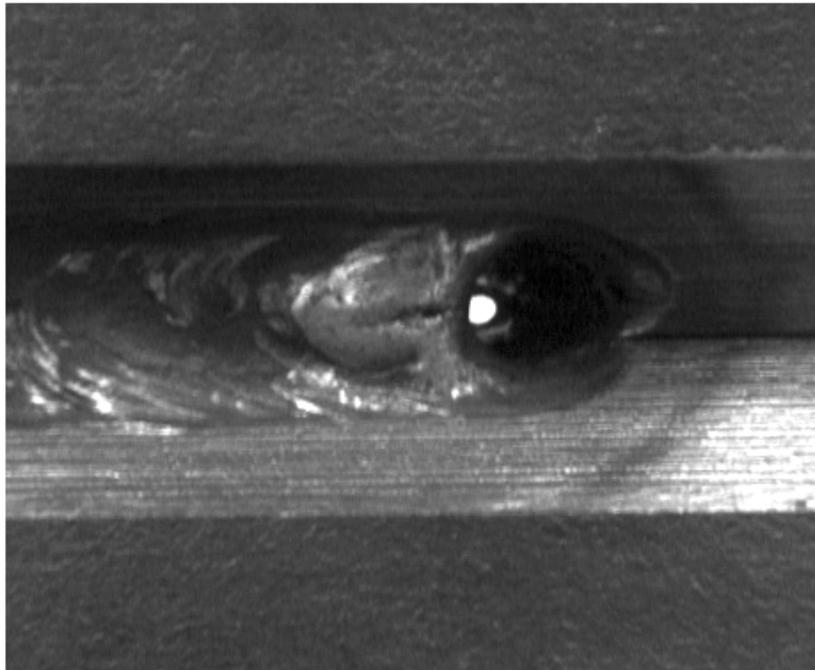


Figura 6: Aspecto do “keyhole” na parte final do cordão de solda.

3.2. Verificação da repetibilidade dentro do envelope operacional

Com o envelope operacional definido, foram realizados testes com uma condição obtida do centro deste envelope (corrente = 200 A; velocidade de soldagem = 15 cm/min e vazão de gás de plasma = 1,2 l/min), com o objetivo de comprovar a repetibilidade do processo PAW (“keyhole”) na soldagem desse tipo de junta. Através dos testes, pôde-se verificar que a condição utilizada apresentava a tendência de gerar soldas com penetração adequada (“keyhole” estável). Entretanto, alguns testes apresentaram variações na penetração da solda, onde, apesar de uma formação inicial correta do “keyhole”, houve a evolução para uma situação de falta de penetração (fechamento do “keyhole”) ou para uma situação de excesso de penetração caracterizada por um reforço excessivo na raiz da solda (acima de 2 mm).

Desta forma, não foi conseguida uma repetibilidade satisfatória do processo dentro do envelope operacional para a junta em estudo. Esta não repetibilidade dos resultados aparentemente está associada a uma instabilidade na manutenção do “keyhole” durante a soldagem, a qual gerava o seu colapso. Uma série de fatores podem contribuir individualmente ou conjuntamente para a geração desta instabilidade na manutenção do “keyhole”, tais como: equipamentos e acessórios de soldagem (por exemplo, variação no fluxo de gás de plasma), preparação da junta (limpeza inadequada ou variações nas dimensões da junta) e tipo de gás de proteção (alta porcentagem de CO₂ no gás de proteção).

Para se determinar exatamente qual fator ou conjunto de fatores que podem ter gerado o colapso do “keyhole” é necessário um estudo mais detalhado. Entretanto, pode-se observar com este trabalho que o gás de proteção é um fator importante na estabilidade do “keyhole”. Esta observação está apoiada no ganho de estabilidade do “keyhole” obtido quando se alterou o gás de proteção do argônio puro para a mistura de argônio com 25% de CO₂ e justificaria uma investigação a respeito da influência do gás de proteção sobre as condições de manutenção do “keyhole”. A utilização de uma proteção gasosa com menor quantidade de CO₂ poderia melhorar ainda mais as condições de soldagem, uma vez que Martikainen & Moio (1993) citam que a utilização de misturas de argônio com alta porcentagem de CO₂ como gás de proteção pode resultar em superaquecimento e distúrbios na poça de fusão, podendo, desta forma, ocasionar a instabilidade ou o colapso do “keyhole”.

Outro fato interessante observado neste trabalho foi que o acionamento do movimento de translação da tocha deve ser bem controlado, pois se este ocorrer antes da formação do orifício inicial do “keyhole”, a operação de soldagem pode ser comprometida e gerar soldas com falta de penetração. Por outro lado, se o movimento de translação da tocha for atrasado em relação à formação do “keyhole”, a solda é iniciada já com uma condição de penetração excessiva, que tende a se manter ao longo de todo o cordão de solda. Por isto, a identificação deste tempo de atraso do acionamento do movimento da tocha em relação à abertura inicial do “keyhole” é um fator importante e vai depender muito do tipo do material, espessura e configuração da junta e dos parâmetros de soldagem.

4. CONCLUSÕES

- 1- O envelope operacional do passe de raiz de uma junta em V de aço carbono apresenta uma faixa operacional estreita em termos de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma, para a obtenção do “keyhole”.
- 2- A repetibilidade dos testes realizados dentro do envelope operacional não foi adequada em função de uma instabilidade na manutenção do “keyhole”.
- 3- A composição do gás de proteção apresentou uma influência significativa sobre as condições de manutenção do “keyhole”.
- 4- A relação de atraso entre a abertura do arco e o acionamento do movimento de translação da tocha deve ser adequada para a formação do “keyhole” inicial, pois este apresenta também uma influência na qualidade da solda.

5. REFERÊNCIAS

- AWS - American Welding Society, 1991, Gas Tungsten Arc Welding e Plasma Arc Welding, in Welding Handbook, 8th ed., vol. 2, Miami.
- Garcia, J. A. O. & Norrish, J., 1995, Soldagem de Liga de Alumínio-Lítio por Arco Plasma com Variador de Polaridade, Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Caxias do Sul, RS, pp. 401 - 416.
- Hoffmeister, H. et al., 1996, Operational Parameter Fields in Hyperbaric Plasma Keyhole Welding of Mild Steel Line Pipe, Materials Engineering, vol. 3, pp. 125 - 131.
- Martinez, L. F. et al., 1994, Effect of Weld Gases on Melt Zone Size in VPPA Welding of Al 2219, Welding Journal, october, pp.51 - 55.
- Kim, C. J. et al., 1994, Parametric Study of the Two-Dimensional Keyhole Model for High Power Density Welding Processes, Journal of Heat Transfer, vol. 166, February, pp. 209 - 214.

- Martikainen, J. K. & Moisio, T. J. I., 1993, Investigation of the Effect of Welding Parameters on Weld Quality of Plasma Arc Keyhole Welding of Structural Steels, *Welding Journal*, July, pp. 330s – 340s.
- Paula Jr, O. S., 1997, Desenvolvimento e Aplicação da Soldagem Plasma pela Técnica Keyhole, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Quintino, L. et al., 1992, Automatização de Soldadura de Tubos pelo Processo Plasma - “Key-Hole”, *Anais do XVIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*, Rio de Janeiro, RJ, pp. 473 - 492.
- Santos, J. F. O. & Quintino, L., 1993, Soldadura por Plasma, in *Processos de Soldadura*, v. 1, pp. 273 – 292.
- Walsh, D. W. & Nunes Jr, A. C., 1989, Keyhole Flow Phenomena in VPPA Weldments, *Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Welding Science and Technology*, ASM International, Gatlinburg, Tennessee, USA, May 14 - 18, pp. 501 - 505.

USING A PLASMA ARC WELDING KEYHOLE TECHNIQUE FOR THE ROOT PASS OF A SINGLE-V-GROOVE PREPARATION

Abstract: *Though being considered as a high productivity fabrication process, plasma arc welding (PAW) is still used in a small scale in the industry. The main obstacles for the process implantation are shortage of technical information and welding operational difficulties, which are even more critical when welding joint roots with a single-v-groove preparation. The aim of this work is the development of a parameter tolerance box for this process regarding carbon steel, using a keyhole technique. The parameter tolerance box includes welding current, travel speed, and plasma gas flow. It was verified a narrow operational range for the parameter tolerance box. The weld bead geometry repeatability has not been reached for a found parameter tolerance box. It was verified that the shielding gas is related to the keyhole stability and maybe has been one of the factors responsible for the weld bead geometry non repeatability into the parameter tolerance box.*

Key-words: *PAW, Keyhole, Parameter tolerance box, Root bead*