

# INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO NA SOLDAGEM A PLASMA COM *KEYHOLE*

**André Richetti**

**Valtair Antonio Ferraresi**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 38.400-902, Uberlândia, MG, Brasil. E-mail: [valtairf@mecanica.ufu.br](mailto:valtairf@mecanica.ufu.br) ou [arichett@mecanica.ufu.br](mailto:arichett@mecanica.ufu.br)

## Resumo

O processo de soldagem a plasma com a técnica *keyhole*, apesar de apresentar alta produtividade, é pouco utilizado na indústria de fabricação soldada. Isto se deve principalmente aos custos relativos do processo e pelas próprias dificuldades operacionais. Aplicações em juntas chanfradas na prática não são verificadas em função da instabilidade do *keyhole* e falta de repetibilidade. Este trabalho tem como objetivo verificar o efeito do gás de proteção na soldagem de uma junta em V de aço carbono sobre a estabilidade do *keyhole* e a qualidade da solda. Os resultados indicaram que o gás de proteção, embora não seja o principal responsável pela geração da instabilidade no *keyhole*, apresenta influência sobre a intensidade desta instabilidade e sobre a geração de defeitos na solda. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização de misturas de argônio com baixas porcentagens de elementos ativos (10% CO<sub>2</sub>, 5% O<sub>2</sub> e 6% CO<sub>2</sub> + 2% O<sub>2</sub>).

**Palavras-chave:** PAW, *Keyhole*, Instabilidade do *keyhole*, Gás de proteção.

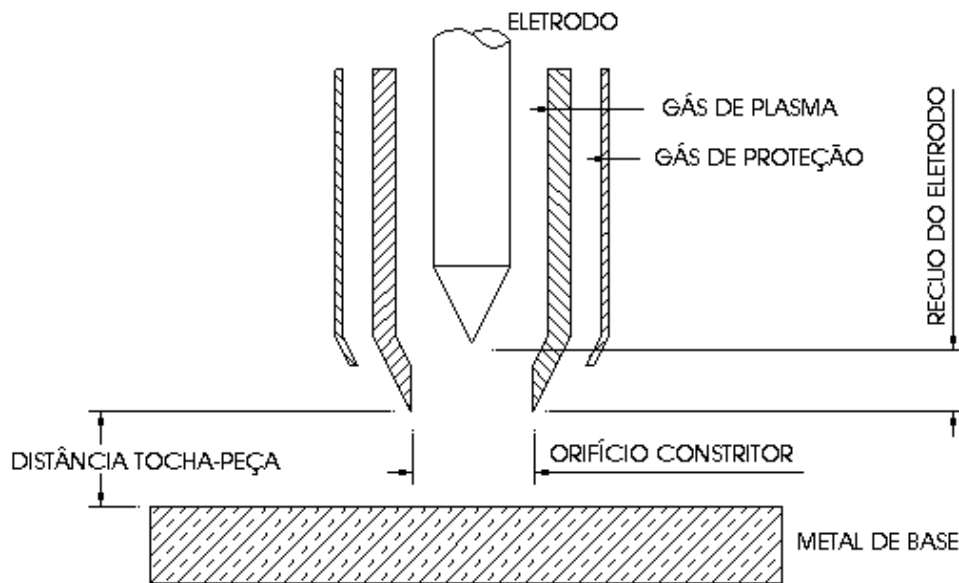
## 1. INTRODUÇÃO

A palavra *keyhole*, em soldagem, é um termo utilizado para designar uma técnica não convencional de soldagem, na qual o arco atravessa completamente a peça sendo soldada, formando um pequeno orifício em forma de funil. Nesta técnica, a superfície do metal fica exposta a um feixe de energia de tal forma concentrada, que parte do volume de material da poça de fusão é vaporizado. O efeito conjunto da pressão do arco e da pressão de vaporização criam condições para a formação deste orifício, que é mantido durante toda a operação de soldagem (Kim *et al.*, 1994).

Em operações com esta técnica, a medida que o arco penetra através do material de base, a força do jato de plasma tende a deslocar o metal fundido para as extremidades laterais da poça de fusão, abrindo o orifício do *keyhole*. O movimento de translação da tocha de soldagem força o 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).

As condições para a obtenção do *keyhole* são conseguidas através de um bocal de constrição, mostrado na Figura 1. Este bocal obstrui a passagem do arco na sua forma normal, forçando um estreitamento da coluna do arco e o aumento da velocidade dos gases do jato de plasma. Estas duas características, o perfil do arco e a alta velocidade do jato de plasma,

atuam conjuntamente para conferir rigidez, estabilidade direcional e alta concentração de energia ao arco plasma (AWS, 1991).



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

Neste processo são utilizadas duas fontes de gás para a soldagem, conforme é indicado na Figura 1. O gás de plasma é um gás inerte que envolve o eletrodo de tungstênio dentro da tocha. Na soldagem este gás vai ser aquecido e ionizado para formar a coluna do arco, responsável pelo transporte de cargas entre o eletrodo e a peça a soldar. A proteção da solda cabe a uma outra fonte de gás, pois o fluxo de gás de plasma tende a ser turbulento e apresentar uma estreita área de incidência devido à constrição, não garantindo uma proteção adequada da poça de fusão (AWS, 1991).

O gás de proteção é o gás que vai proteger a solda contra a contaminação pelo ar atmosférico, podendo ser inerte ou ativo, desde que não comprometa as propriedades da solda. Este gás flui por um bocal externo e envolve a área da peça sobre a qual o arco incide, formando uma barreira que impede o contato entre a poça de fusão e o ambiente. A transferência de calor do arco para o gás de proteção produz um efeito constritivo semelhante ao efeito provocado pelo bocal de constrição, permitindo estreitar ainda mais a coluna do arco. Entretanto, gases com baixo potencial de ionização, como por exemplo o argônio, podem sofrer uma ionização parcial, gerando um efeito contrário, ou seja, um alargamento da coluna do arco (Martinez *et al.*, 1994).

Gases de proteção ativos apresentam um certo potencial de oxidação devido à presença do  $\text{CO}_2$  e/ou do  $\text{O}_2$ . Na forma molecular, estes gases são inertes, mas devido ao aquecimento provocado pelo arco, os elementos ativos se dissociam na forma atômica podendo reagir com o metal fundido da poça de fusão. Desta forma, a seleção do gás de proteção deve seguir padrões criteriosos, pois os efeitos gerados podem ter influência sobre a estabilidade do *keyhole*, podendo resultar em cordões irregulares (Martikainen & Moisiso, 1993)

A formação e a manutenção do *keyhole* ao longo da solda são obtidas mediante o uso de combinações adequadas de vazão de gás de plasma, corrente e velocidade de soldagem, definidas em função da aplicação. A relação destes parâmetros define o equilíbrio entre as forças (tensão superficial da poça de fusão e as forças devido a corrente de soldagem e a

velocidade do gás de plasma incidente) que atuam na poça de fusão, garantindo a sustentação do *keyhole* (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, recomendadas pela literatura do processo para chapas com espessuras superiores a 6 mm (AWS, 1991 e Santos & Quintino, 1993), na prática não são observadas devido às dificuldades em se obter uma condição estável. Com isso, a principal motivação deste trabalho advém da necessidade de verificar como a estabilidade do *keyhole* é influenciada pela composição do gás de proteção e analisar a aplicabilidade desta técnica em junta chanfrada.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica multiprocesso (chaveada no secundário), em corrente contínua e polaridade direta. Esta fonte trabalha com uma corrente nominal de 300 A para um fator de serviço de 100% e tensão em vazio de 56 V. Para a abertura do arco, é utilizado um arco piloto com ignição por alta frequência, sendo a corrente de partida de 7 A. Foi utilizada uma tocha de soldagem a plasma com capacidade de corrente de 300 A.

Em todos os testes foram utilizados um eletrodo AWS EWTh-2 de 5 mm de diâmetro com ângulo de ponta de 60°, um bocal de constrição de 2,8 mm de diâmetro, recuo do eletrodo em relação à face do bocal de constrição de 2,35 mm (recomendação do fabricante para máximo efeito de constrição) e distância tocha-peça de 6 mm. O gás de plasma utilizado foi o argônio comercial.

A vazão do gás de plasma foi controlada através de um rotâmetro com capacidade 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 próprio regulador de pressão do cilindro de gás, sendo esta mantida em 4,5 l/min.

Para verificar a influência do gás de proteção, foi utilizada uma junta com preparação em V (ângulo de chanfro de 90° e face de raiz de 5 mm), feita a partir chapas de aço ABNT 1020 com 12,7 mm de espessura e 50 mm de largura. Foram utilizados para a proteção da solda o argônio comercial e misturas a base de argônio (Ar 25% CO<sub>2</sub>, Ar 18% CO<sub>2</sub>, Ar 10% CO<sub>2</sub>, Ar 6% CO<sub>2</sub> + 2% O<sub>2</sub>, Ar 5% O<sub>2</sub>, Ar 5% He e Ar 25% He).

Os sinais de tensão e corrente de soldagem foram adquiridos através de um sistema de aquisição de dados.

O critério para avaliação das soldas foi a medida do reforço da raiz da solda (indicação da penetração), sendo o limite superior admissível estabelecido em 2 mm para uma condição adequada de soldagem (Hoffmeister *et al.*, 1996).

## 3. RESULTADOS

A utilização da técnica *keyhole* em junta chanfrada, apesar de ser recomendada para espessuras de chapas superiores a 6 mm (AWS, 1991), não é observada na prática, ficando estas aplicações limitadas para fins de pesquisa. O gás de proteção, por exercer influência sobre o processo e interagir com a poça de fusão, pode ser um dos fatores responsáveis pela instabilidade do *keyhole* e a conseqüente geração de irregularidades no cordão de solda neste tipo de aplicação (Richetti, 1998).

A Tabela 1 mostra os testes realizados para avaliar a influência do gás de proteção na soldagem com a técnica *keyhole*, onde penetração adequada indica solda com *keyhole* e reforço na raiz da solda até 2 mm, penetração excessiva indica o corte da junta ou reforço

excessivo (acima de 2 mm) na raiz da solda e penetração incompleta, que indica a não manutenção do *keyhole* durante a operação de soldagem.

**Tabela 1-** Influência do gás de proteção na penetração da solda.

Teste	Gás de proteção	Corrente (A)	Penetração
1 e 2	Ar	200	Incompleta e incompleta
3 e 4		230	Incompleta e incompleta
5 e 6	Ar 5% He	200	Incompleta e incompleta
7 e 8		230	Incompleta e incompleta
9 e 10	Ar 25% He	200	Incompleta e incompleta
11 e 12		230	Incompleta e incompleta
13, 14 e 15	Ar 10% CO <sub>2</sub>	200	Adequada, adequada e adequada
16, 17 e 18	Ar 18% CO <sub>2</sub>	200	Adequada, adequada e excessiva
19, 20 e 21	Ar 25% CO <sub>2</sub>	200	Adequada, adequada e excessiva
22, 23 e 24	Ar 6% CO <sub>2</sub> + 2% O <sub>2</sub>	200	Adequada, adequada e adequada
25, 26 e 27	Ar 5% O <sub>2</sub>	200	Adequada, adequada e adequada
28 e 29	CO <sub>2</sub>	150	Excessiva e excessiva
30 e 31		180	Excessiva e excessiva

A Tabela 2 mostra os resultados dos exames macrográficos realizados nas soldas. Nesta tabela são apresentados os aspectos geométricos do cordão de solda, bem como uma análise da quantidade de defeitos internos, que foi feita subjetivamente através de cortes longitudinais e transversais dos cordões de solda.

**Tabela 2-** Efeito do gás de proteção no perfil da solda e na geração de defeitos internos.

Gás de proteção	Corrente (A)	Largura da solda (mm)	Largura da raiz (mm)	Nível de defeitos Internos
Ar 5% He	230	8,23	-	Alto (vazios)
	200	8,10	-	Alto (vazios)
Ar 25% He	230	8,28	-	Alto (vazios)
Ar 10% CO <sub>2</sub>	200	7,87	2,58	Baixo (porosidade)
Ar 18% CO <sub>2</sub>	200	7,55	2,02	Médio (porosidade)
Ar 25% CO <sub>2</sub>	200	7,51	2,55	Alto (porosidade)
Ar 6% CO <sub>2</sub> + 2% O <sub>2</sub>	200	7,78	2,13	Baixo (porosidade)
Ar 5% O <sub>2</sub>	200	7,43	2,43	Baixo (porosidade)
CO <sub>2</sub>	150	6,21	6,85	Alto (porosidade)
	180	7,00	10,03	Alto (porosidade)

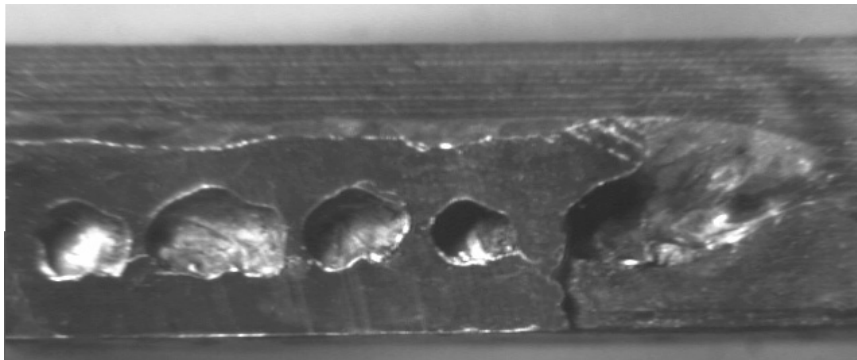
O argônio e misturas de argônio com 5% e 25% de hélio como gás de proteção (testes 1 a 12 da Tabela 1) apresentaram resultados semelhantes, sempre fornecendo penetração incompleta, mesmo com a utilização de níveis de corrente maiores em relação a outros gases utilizados. Nestes testes foi verificado o fechamento do *keyhole* quase que imediatamente após o início do movimento da tocha de soldagem.

A principal causa para o fechamento do *keyhole* foi provavelmente a baixa concentração de energia gerada no arco com a utilização do argônio como gás de proteção. O argônio apresenta um baixo potencial de ionização, característica esta que permite a ocorrência de uma ionização parcial do gás de proteção em função do seu aquecimento pelo calor gerado no

arco, resultando em uma coluna de arco mais larga. Isto reduz em grande parte a concentração de energia, a tal ponto a não se conseguir a manutenção do *keyhole*. Outro fator que pode ter contribuído para estes resultados foi o menor aquecimento gerado na poça de fusão devido à baixa condutividade térmica do argônio, dificultando a manutenção do *keyhole* (Martinez *et al.*, 1994).

A adição de hélio ao argônio nas proporções de 5% e 25% não foi suficiente para obter a condição do *keyhole* em relação ao argônio puro. Segundo Martinez *et al.* (1994), até uma porcentagem de 40% de hélio na mistura, a quantidade de argônio presente no meio protetor ainda é suficiente para que ocorra uma ionização parcial deste gás e, com isso, uma redução na concentração de energia do arco. Tal fenômeno ocorre porque, como o potencial de ionização do hélio é alto, a primeira reação que ocorre com o aquecimento destes gases é a ionização do argônio presente na mistura. Este efeito pode ser verificado na Tabela 2, onde a largura do cordão de solda obtido com estes gases foi relativamente maior do que as obtidas por gases ativos.

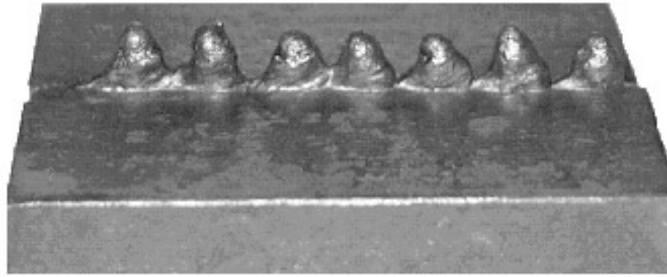
Quando o arco não possui energia suficiente para manter o orifício do *keyhole*, ocorre uma excessiva geração de defeitos internos, proveniente do aprisionamento dos gases do arco pela frente de solidificação. Este efeito ocorre porque os gases são forçados a penetrar por baixo da poça de fusão devido à própria força de incidência do arco, gerando vazios internos que se repetem ao longo de todo o cordão de solda. Este tipo de problema é apresentado na Figura 2.



**Figura 2-** Corte longitudinal de solda com penetração incompleta.

Por outro lado, se a corrente de soldagem for aumentada para obter uma maior penetração do arco e restaurar a condição do *keyhole*, a poça de fusão tende a ficar com um tamanho de tal forma desproporcional que não consegue se sustentar, sendo o material fundido expulso pelo outro lado da junta sob ação da força da gravidade e do arco. Isto pode ocasionar o corte da junta ou penetração excessiva com a formação do defeito *humping* (Richetti, 1998). Desta forma, verifica-se uma grande dificuldade de se obter soldas com *keyhole* nestas condições.

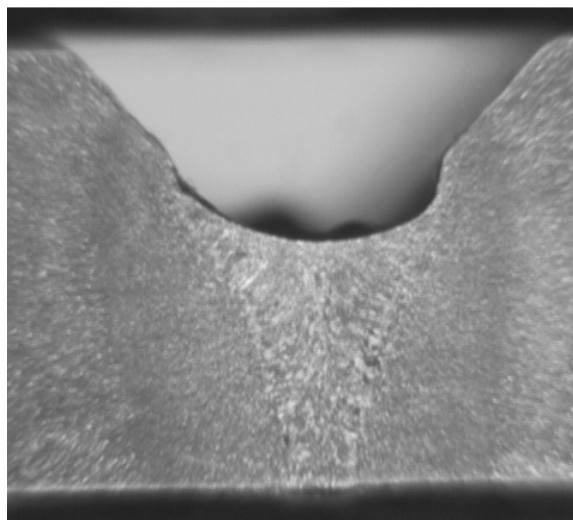
A Figura 3 ilustra o defeito *humping*, que ocorre devido à falta de sustentação do *keyhole* durante a soldagem. A poça de fusão é expulsa da junta, formando as protuberâncias características deste defeito. Segundo Garcia & Norrish (1995), o *humping* tem como causas o uso de elevadas vazões de gás de plasma (excessiva força de araste atuando na poça de fusão) ou devido à formação de uma poça de fusão com grande volume de metal fundido, causando o desequilíbrio nas forças de sustentação do *keyhole*.



**Figura 3-** Defeito *humping*.

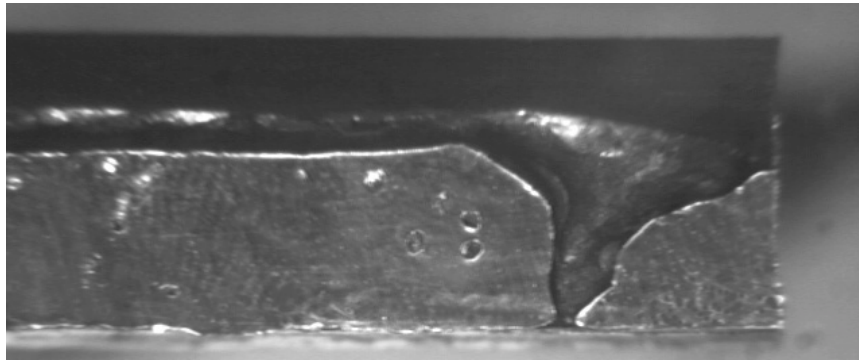
A utilização da mistura de argônio 10% CO<sub>2</sub> (testes 13 a 15 da Tabela 1) permitiu obter soldas com *keyhole* e com repetibilidade satisfatória. A obtenção da condição do *keyhole* em relação aos gases anteriores provavelmente ocorreu em função do aumento da concentração de energia devido ao maior efeito de constrição sobre o arco e por reações entre o gás de proteção e o metal fundido, conforme é indicado na Tabela 2. O fato de se obter um arco mais constricto favorece a sustentação do *keyhole* por produzir uma poça de fusão menor. Segundo Garcia & Norrish (1995), quanto maior a dimensão da poça de fusão, mais difícil é o controle do processo em função da dificuldade em se conseguir um equilíbrio adequado ao excessivo volume de material fundido. O acabamento superficial das soldas foi bom, apresentando apenas um aspecto enegrecido provavelmente devido à ação do oxigênio presente no gás de proteção.

Resultados semelhantes aos obtidos com Ar 10% CO<sub>2</sub> foram obtidos usando as misturas Ar 5% O<sub>2</sub> (testes 25 a 27 da Tabela 1) e Ar 6% CO<sub>2</sub> + 2% O<sub>2</sub> (testes 22 a 24 da Tabela 1), tanto em termos de estabilidade do *keyhole* como na qualidade final do cordão de solda. Nestes casos, a ionização parcial do gás de proteção não ocorre ou acontece em menor escala, pois com o aquecimento destes gases ocorre a dissociação do CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub> (processo isotérmico), mantendo a temperatura abaixo dos níveis em que ocorre a ionização do argônio presente na mistura. Apesar da boa repetibilidade das soldas, foi possível ainda observar certas instabilidades no *keyhole* durante a soldagem, que podem ter sido provocadas por reações na poça de fusão devido à presença de elementos ativos no meio protetor das soldas. Estas instabilidades produziram irregularidades no reforço da raiz da solda (variação na penetração). A Figura 4 mostra o perfil geral das soldas obtidas com a utilização destes gases.



**Figura 4-** Perfil de solda obtido com argônio 6% CO<sub>2</sub> + 2% O<sub>2</sub>.

O aumento da porcentagem de CO<sub>2</sub> para 18% e posteriormente para 25% na mistura (testes 16 a 18 e 19 a 21 da Tabela 1, respectivamente) produziu um aumento na intensidade da instabilidade do *keyhole*. Este efeito foi provocado provavelmente em função da maior intensidade das reações que ocorrem na poça de fusão. Estas reações ficam evidentes pela elevada geração de porosidade interna, conforme é indicado na Tabela 2. A Figura 5 mostra um corte longitudinal de uma das soldas realizadas, dando ênfase ao orifício do *keyhole* e às porosidades geradas internamente ao cordão de solda.



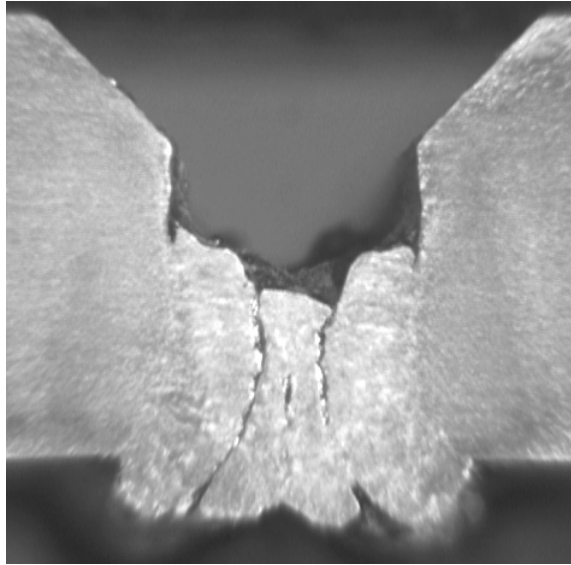
**Figura 5-** Corte longitudinal de uma solda protegida com argônio 25% CO<sub>2</sub>.

Em ambos os casos, com 18% e 25% de CO<sub>2</sub> na mistura, o acabamento superficial das soldas foi relativamente bom, mas apresentando escórias e um aspecto ligeiramente enegrecido. Estas características demonstram o caráter ativo destas misturas no meio protetor da poça de fusão.

O CO<sub>2</sub>, por apresentar uma condutividade térmica elevada, produziu penetração excessiva (testes 28 a 31 da Tabela 1), mesmo com a utilização de níveis de corrente muito abaixo dos que foram utilizados com outros gases. A Tabela 2 mostra que a largura do cordão de solda obtida com o CO<sub>2</sub> foi a menor dentre todos os testes, demonstrando o alto efeito de constrição (maior concentração de energia), o que explica em parte os resultados de penetração excessiva. Intensas reações com a poça de fusão devido ao elevado potencial de oxidação do CO<sub>2</sub> também podem ter influenciado os resultados. Estas reações ficam evidentes pela excessiva quantidade de porosidade gerada na solda.

Um fato a se chamar atenção é que a largura da raiz da solda obtida com o CO<sub>2</sub> como gás de proteção é maior do que a própria largura da face do cordão, comportamento este que foi contrário ao obtido para todos os outros gases utilizados. Isto pode ser observado através da Figura 6. Este efeito provavelmente tem origem nas reações geradas com a poça de fusão. Evidentemente, esta condição torna impossível a sustentação da poça de fusão, o que inviabiliza o uso da técnica *keyhole* neste caso.

Os resultados indicam que, apesar do aumento da porcentagem de elementos ativos na mistura tenderem a aumentar a intensidade da instabilidade e o nível de defeitos internos, a presença destes elementos em baixas porcentagens é necessária para obter as melhores condições de soldagem, do ponto de vista da obtenção do *keyhole*. Entretanto, mesmo nestas condições de soldagem, ainda ficou evidente que as instabilidades no *keyhole* não foram eliminadas por completo. Isto sugere a existência de um outro fator atuando como gerador destas instabilidades, sendo necessário estudos complementares para se identificar as verdadeiras causas deste fenômeno.



**Figura 6-** Perfil de solda obtido usando CO<sub>2</sub> como gás de proteção e corrente de 180 A.

Desta forma, a soldagem a plasma com a técnica *keyhole* em junta chanfrada somente será viável a partir da eliminação dos fatores responsáveis pela geração da instabilidade. Entretanto, este problema de instabilidade no *keyhole* pode ser amenizado através de uma adequada seleção do gás de proteção.

#### **4. CONCLUSÕES**

1. O gás de proteção não apresentou relação direta com a geração da instabilidade no *keyhole*, mas apresentou influência sobre a intensidade desta instabilidade e na geração de defeitos na solda.
2. Aplicações neste tipo de junta (preparação em V) representam condições extremas e o sucesso da soldagem depende da eliminação do fator causador da instabilidade do *keyhole*.
3. Os melhores resultados em termos de estabilidade do *keyhole* foram obtidos para misturas de argônio contendo baixas porcentagens de elementos ativos (O<sub>2</sub> e/ou CO<sub>2</sub>).

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro ao trabalho e ao Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia (LAPROSOLDA/UFU) pelos equipamentos cedidos.

#### **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AWS - American Welding Society, 1991, “Welding Handbook”, 8<sup>th</sup> ed., Vol. 2, pp. 330 - 350.
- Garcia, J. A. O. e 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, 20 – 24 Junho.
- Hoffmeister, H., Huismann, G., Sommer, U. and Knagenhjelm, H. O., 1996, “Operational Parameter Fields in Hyperbaric Plasma Keyhole Welding of Mild Steel Line Pipe”, Materials Engineering, Vol. 3, pp. 125 - 131.



- Kim, C. J., Kauh, S., Ro, S. T. and Lee, J. S., 1994, "Parametric Study of the Two-Dimensional Keyhole Model for High Power Density Welding Processes", Journal of Heat Transfer, Vol. 166, pp. 209 - 214, February.
- Martikainen, J. K. and 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, pp. 330s - 340s, July.
- Martinez, L. F., Matlock, C., Marques, R. E., McClure, J. C. and Nunes Jr, A. C., 1994, "Effect of Weld Gases on Melt Zone Size in VPPA Welding of Al 2219", Welding Journal, pp.51 - 55, October.
- Richetti, A., 1998, "Aplicação da Soldagem por Plasma com a Técnica keyhole na Soldagem do Passe de Raiz de Uma Junta Chanfrada", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 103 p.
- Santos, J. F. O. e Quintino, L., 1993, "Processos de Soldadura", Vol. 1, 273 p.