

## INSTABILIDADE DO *KEYHOLE* NA SOLDAGEM A PLASMA

**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

A soldagem a plasma usando a técnica *keyhole* representa uma operação muitas vezes caracterizada por problemas de instabilidades, podendo causar variação na penetração e não repetibilidade das soldas. Esta instabilidade no *keyhole* tende a dificultar a operação de soldagem pela geração de defeitos na solda. Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar o fenômeno da instabilidade do *keyhole* considerando variáveis que podem afetar a dinâmica do processo tais como configuração da junta, condições de abertura do *keyhole* e metal de base. Os resultados indicaram que a geração da instabilidade no *keyhole* foi provavelmente devido à problemas de não uniformidade na composição química do metal de base. A configuração da junta, apesar de não ter apresentado relação com a geração desta instabilidade, apresentou influência sobre sua intensidade. A abertura do *keyhole* não apresentou influência tanto na geração como na intensidade da instabilidade.

**Palavras-chave:** PAW, Instabilidade do *keyhole*, Configuração da junta, Abertura do *keyhole*, Metal de base.

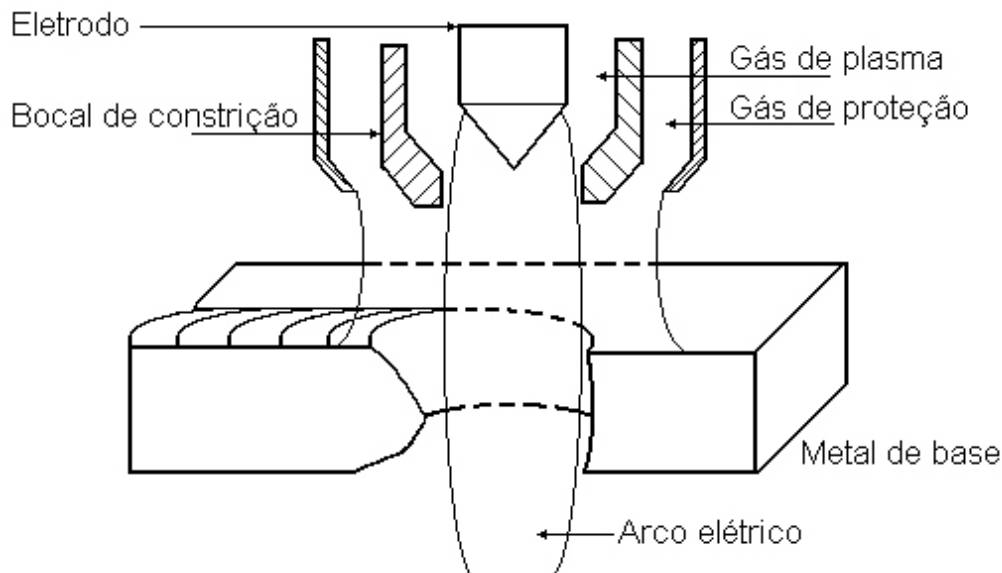
### 1. INTRODUÇÃO

A soldagem a plasma (PAW - *Plasma Arc Welding*) com a técnica *keyhole* é uma operação na qual o arco atravessa toda a espessura da peça sendo soldada, gerando um pequeno orifício conforme é ilustrado na Figura 1. Este orifício é denominado de *keyhole* ou “buraco de fechadura”. Para obter esta condição de soldagem, o arco precisa ser concentrado de tal forma a permitir que parte do volume de material da poça de fusão seja vaporizado. Desta forma, o efeito obtido com a pressão de incidência do arco, juntamente com a pressão de vaporização na poça de fusão, criam as condições necessárias para a formação do orifício do *keyhole* (Kim *et al.*, 1994). Este efeito é conseguido através de um bocal de constrição colocado na saída da tocha.

Pelas próprias características desta operação, condições adequadas de sustentação da poça de fusão são necessárias para manter a estabilidade do *keyhole* ao longo da solda. Qualquer perturbação que ocorrer no processo durante a soldagem pode resultar em instabilidade no *keyhole*, podendo induzir o seu colapso e a conseqüente geração de defeitos na solda. Esta instabilidade pode também repercutir no aumento da dificuldade operacional do processo, limitando ainda mais a sua faixa de operação para uma determinada aplicação (Richetti, 1998).

A instabilidade do *keyhole* é um fenômeno caracterizado pelo comportamento variável (instável) da poça de fusão, o qual tende a produzir uma variação acentuada na penetração e

deteriorar o acabamento do cordão de solda (Richetti, 1998). Segundo Martikainen & Moisis (1993), a instabilidade no *keyhole* pode gerar defeitos tais como penetração incompleta ou penetração excessiva (corte da junta). Apesar de ainda não se conhecer os fatores responsáveis pela geração desta instabilidade, pode-se supor que qualquer variável que afete o equilíbrio da poça de fusão durante soldagem pode induzir o aparecimento deste fenômeno.



**Figura 1-** Técnica *keyhole* (Walsh & Nunes Jr., 1989).

Aplicações em juntas chanfradas (preparação em V) são recomendadas pela literatura do processo para espessuras de chapa superiores a 6 mm (AWS, 1991). Entretanto, devido à dificuldade de se obter uma condição estável com repetibilidade das soldas, tais aplicações não são verificadas na prática. Por outro lado, juntas de topo (preparação em I) representam a maioria das aplicações da técnica *keyhole* na indústria de fabricação soldada, sugerindo que o tipo de preparação da junta pode influenciar no aparecimento de instabilidades no *keyhole*.

Outros autores (Díaz, Dutra & Gohr Jr., 1999) citam que existe uma tendência de geração de defeitos ao longo da solda quando o movimento da tocha não é iniciado no exato momento em que o orifício do *keyhole* é formado. Este problema pode ser solucionado com o uso de equipamentos de movimentação automatizados, que retardam o movimento da tocha por um certo intervalo de tempo até a abertura do *keyhole*. Este tempo de retardo é determinado experimentalmente em função da aplicação (material e espessura).

Equipamentos modernos permitem também o controle da abertura e fechamento do *keyhole* através de rampas de subida e descida de corrente e vazão do gás de plasma. O controle de abertura é utilizado para reduzir o aparecimento de defeitos na região da abertura do arco, enquanto este escava o metal de base para formar o *keyhole*. O controle sobre o fechamento do *keyhole* é utilizado durante a extinção do arco e possibilita um adequado preenchimento do orifício final (De Paula Jr., 1997). Apesar deste tipo de controle ter uma influência localizada (abertura e fechamento do *keyhole*), pode eventualmente melhorar a estabilidade da soldagem por permitir melhores condições de inicialização do *keyhole*.

O metal de base utilizado também pode contribuir para a geração de instabilidades no *keyhole*. Muitos materiais empregados na indústria apresentam qualidade inferior, provavelmente devido à problemas durante os processos de fabricação ou por falta de uma política de qualidade adequada por parte do fabricante. Estes tipos de materiais podem apresentar regiões com segregação de impurezas ou variações grosseiras na composição

química ao longo de seu comprimento. Durante a soldagem destes materiais, o equilíbrio da poça de fusão pode ser substancialmente afetado em função desta variação na composição do metal, podendo também levar a uma condição instável.

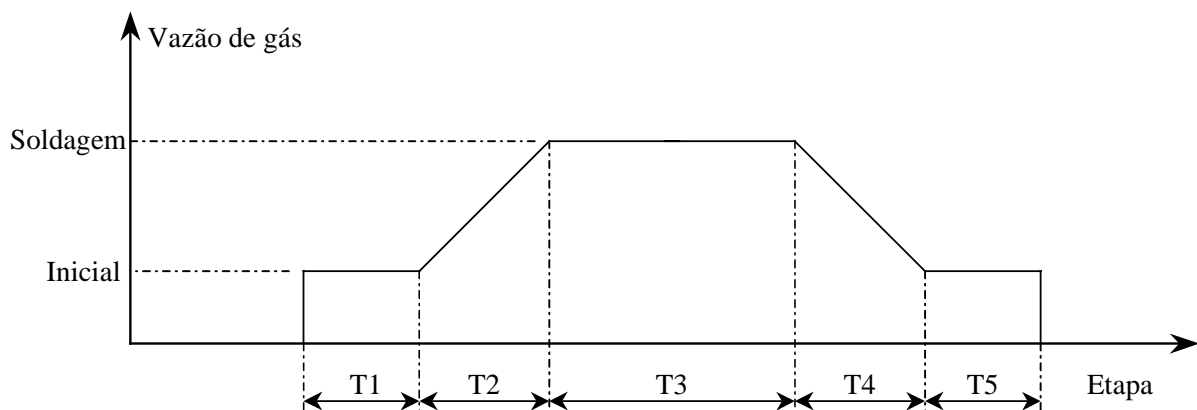
Desta forma, a principal motivação para a realização deste trabalho advém da necessidade de se entender o problema da instabilidade do *keyhole* na soldagem a plasma e levantar as suas causas e fatores que o influenciam.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica multiprocesso (chaveada no secundário), em corrente contínua 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. O movimento da tocha foi controlado por uma mesa de coordenadas XY controlada por computador e, em todos os testes, os sinais de tensão e corrente de soldagem foram adquiridos através de um sistema de aquisição de dados.

Foram utilizados o argônio comercial como gás de plasma e um eletrodo AWS EWTh-2 de 5 mm de diâmetro e ângulo de ponta de 60°, sendo o recuo do eletrodo em relação à face do bocal de constrição de 2,35 mm (recomendação do fabricante para máximo efeito de constrição do arco).

A vazão do gás de plasma foi controlada através de um equipamento de medição e controle de vazão de gás com capacidade de 0,3 a 3 l/min. Este equipamento foi desenvolvido no LAPROSOLDA/UFU e permite controlar a taxa de subida da vazão do valor inicial de abertura do arco piloto até o valor de regime e a taxa de descida do valor de regime até o valor inicial conforme mostra a Figura 2. A vazão inicial para a abertura do arco piloto foi fixada em 0,5 l/min. O tempo das rampas de subida e descida podem ser ajustados conforme a aplicação, sendo que a faixa de operação do equipamento é de 2 a 12 segundos. A vazão do gás de proteção foi controlada através de um medidor digital e do regulador de pressão do cilindro de gás e foi mantida em 6 l/min.



**Figura 2-** Curva característica do controle de vazão do gás de plasma, sendo: T1-vazão inicial para abertura do arco piloto, T2-rampa de subida, T3-vazão de soldagem, T4-rampa de descida e T5-retorno à vazão inicial após a solda.

O efeito do tipo de junta sobre a instabilidade do *keyhole* foi analisado a partir de testes em juntas de topo de aço ABNT 1020 com 4,8 mm de espessura e em juntas chanfradas (em

V) com ângulo de chanfro de 90° e face de raiz de 5 mm, feitas a partir chapas de aço ABNT 1020 com 12,7 mm de espessura.

O efeito da abertura do *keyhole* foi avaliado através de testes feitos sobre uma chapa de aço carbono ABNT 1020 com 4,4 mm de espessura (*bead on plate*). Nestes testes, foram utilizadas diferentes condições de inicialização do *keyhole*, variando-se a combinação das rampas de gás de plasma e corrente. A rampa de gás de plasma foi controlada através do equipamento de controle de vazão de gás. A rampa de corrente foi controlada diretamente na fonte através de um programa computacional que controla os tempos das rampas, o valor da corrente de soldagem e o retardo no acionamento da tocha na mesa de coordenadas até a formação do *keyhole*, que ocorre ao final da rampa de subida.

O efeito do metal de base foi avaliado através de uma análise visual de soldas (*bead on plate*) obtidas na soldagem dos aços ABNT 304L (3,8 mm de espessura) e ABNT 1020 (4,4 mm de espessura).

Em todos os testes, a análise dos resultados foi baseada em inspeções visuais no acabamento superficial e no reforço da raiz da solda.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Efeito do tipo de junta

A Tabela 1 mostra as condições de soldagem e os resultados obtidos nos testes feitos em juntas de topo e em juntas chanfradas, sendo que um reforço na raiz da solda igual a zero significa o fechamento do *keyhole* durante a soldagem. Nestes testes, foi possível detectar intensas instabilidades no *keyhole* tanto na junta chanfrada como na junta de topo. Este problema pôde ser facilmente detectado devido às variações grosseiras observadas no reforço da raiz das soldas realizadas em ambas as juntas.

**Tabela 1**-Condições de soldagem e resultados obtidos para o tipo de junta.

Condição de soldagem	Junta em V	Junta de topo (em I)
Corrente	200 A	140 A
Vazão de gás de plasma	1,2 l/min (argônio)	1,1 l/min (argônio)
Vazão de gás de proteção	6 l/min (argônio 5% O <sub>2</sub> )	6 l/min (argônio 5% O <sub>2</sub> )
Velocidade de soldagem	15 cm/min	19 cm/min
Bocal de constrição	φ 2,8 mm	φ 2,8 mm
Distância tocha-peça	6 mm	3 mm
Reforços obtidos na raiz das soldas		
Teste 1	de 0 a 0,8 mm	de 0 a 0,5 mm
Teste 2	de 0 a 2 mm	de 0 a 0,5 mm
Teste 3	de 1 a 2 mm	de 0 a 1,3 mm
Teste 4	-	de 0 a 1 mm
Teste 5	-	de 0,8 a 1,5 mm

De uma forma geral, os dois tipos de junta apresentaram elevados níveis de irregularidades na solda. Entretanto, a junta de topo apresentou uma melhor tendência de uniformidade na penetração, o que indica que a junta chanfrada é uma condição extrema, ampliando o efeito de qualquer perturbação que ocorre na poça de fusão.

Garcia & Norrish (1995) citam que quanto maior o volume da poça de fusão, mais difícil se torna o controle do processo, provavelmente devido ao aumento da intensidade da instabilidade do *keyhole*. Na junta chanfrada, a poça de fusão tende a apresentar um maior

volume de material fundido em relação à junta de topo, contribuindo para a geração de uma condição mais instável.

Entretanto, os resultados sugerem que a configuração da junta não apresentou relação com a geração de instabilidade no *keyhole*, uma vez que esta foi verificada em ambas as juntas. Por outro lado, a intensidade desta instabilidade pareceu ser afetada pelo tipo de junta utilizada na soldagem, sendo que a condição mais crítica foi a da junta chanfrada, a qual é recomendada para espessuras de chapa acima de 6 mm.

### 3.2. Efeito da abertura do *keyhole*

Segundo Díaz, Dutra & Gohr Jr. (1999), a forma como o *keyhole* é iniciado tem influência na estabilidade do cordão de uma forma geral, podendo repercutir na geração de defeitos ao longo da solda. Isto sugere que o fenômeno da instabilidade pode ser influenciado pelas condições iniciais de abertura do *keyhole*, justificando uma análise destas condições.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos com diferentes condições de abertura do *keyhole*. O tempo das rampas de vazão de gás de plasma e corrente foram levantados experimentalmente medindo-se o tempo em que o arco levou para furar a chapa teste (aço ABNT 1020 com 4,4 mm de espessura) usando os parâmetros nominais de soldagem. Para este material, as rampas de subida e descida foram definidas em 4 s.

**Tabela 2-** Condições utilizadas para a abertura do *keyhole*.

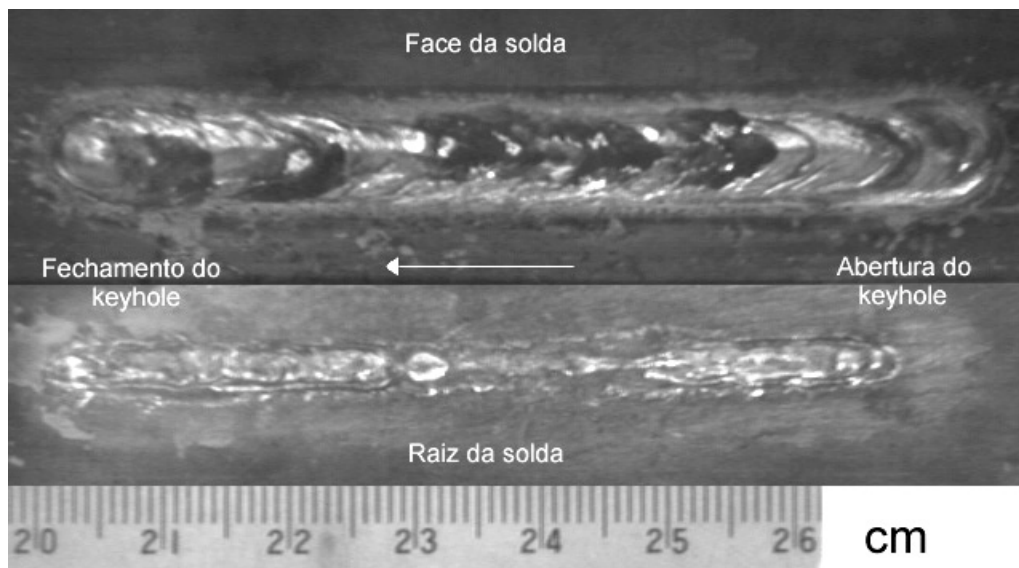
Variável	Condição de controle da abertura do <i>keyhole</i>			
	Rampas de Corrente e gás	Rampa de Corrente	Rampa de gás	Sem Rampa
Corrente	115 A	115 A	115 A	115 A
Gás de plasma	1,2 l/min - Ar	1,2 l/min - Ar	1,2 l/min - Ar	1,2 l/min - Ar
Vel. de soldagem	15 cm/min	15 cm/min	15 cm/min	15 cm/min
Gás de proteção	6 l/min Ar 5% O <sub>2</sub>	6 l/min Ar 5% O <sub>2</sub>	6 l/min Ar 5% O <sub>2</sub>	6 l/min Ar 5% O <sub>2</sub>
Gás de purga	5 l/min Ar 5% He	5 l/min Ar 5% He	5 l/min Ar 5% He	5 l/min Ar 5% He
Dist. tocha-peça	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm
Rampa (corrente)	4 s	4 s	-	-
Rampa (gás)	4 s	-	4 s	-
Bocal constritor	φ 2,4 mm	φ 2,4 mm	φ 2,4 mm	φ 2,4 mm

Para cada condição de abertura do *keyhole* foram feitos 3 testes. Os resultados obtidos indicaram que o uso do controle de vazão de gás de plasma e corrente não eliminou a instabilidade do *keyhole* durante a soldagem. A Figura 3 mostra a superfície e a raiz de uma solda realizada com a utilização do controle de subida e descida de gás de plasma e de corrente. Nesta figura pode ser notado que a ocorrência da instabilidade causou o colapso do *keyhole*, gerando irregularidades na penetração da solda. Pode ser verificado também que o acabamento superficial do cordão de solda apresentou um aspecto bastante grosseiro, provavelmente devido às perturbações ocorridas na poça de fusão.

Os resultados mostraram que em todos os testes realizados foi possível detectar instabilidades no *keyhole*, sugerindo que o controle sobre a abertura do *keyhole* não apresentou influência na geração desta instabilidade. As condições de abertura do *keyhole* utilizadas (Tabela 2) apresentaram resultados semelhantes entre si, podendo, para este caso, a solda ser

feita utilizando apenas o controle sobre o acionamento do movimento da tocha de soldagem. Com relação ao fechamento do *keyhole*, a utilização das rampas possibilitou um melhor preenchimento do orifício final, melhorando o aspecto da solda nesta região. Resultados semelhantes foram obtidos também por De Paula Jr. (1997).

Um adequado fechamento do *keyhole* foi igualmente obtido utilizando-se as rampas individualmente (corrente ou vazão de gás de plasma), ou com as duas rampas operando conjuntamente. Desta forma, o preenchimento do orifício final do *keyhole* pode ser feito com qualquer uma destas condições, dependendo dos equipamentos disponíveis para a soldagem. Nos testes realizados sem controle de fechamento do *keyhole*, o orifício final não foi preenchido de forma adequada.



**Figura 3-** Solda obtida com controle de vazão de gás e de corrente na abertura e fechamento do *keyhole*.

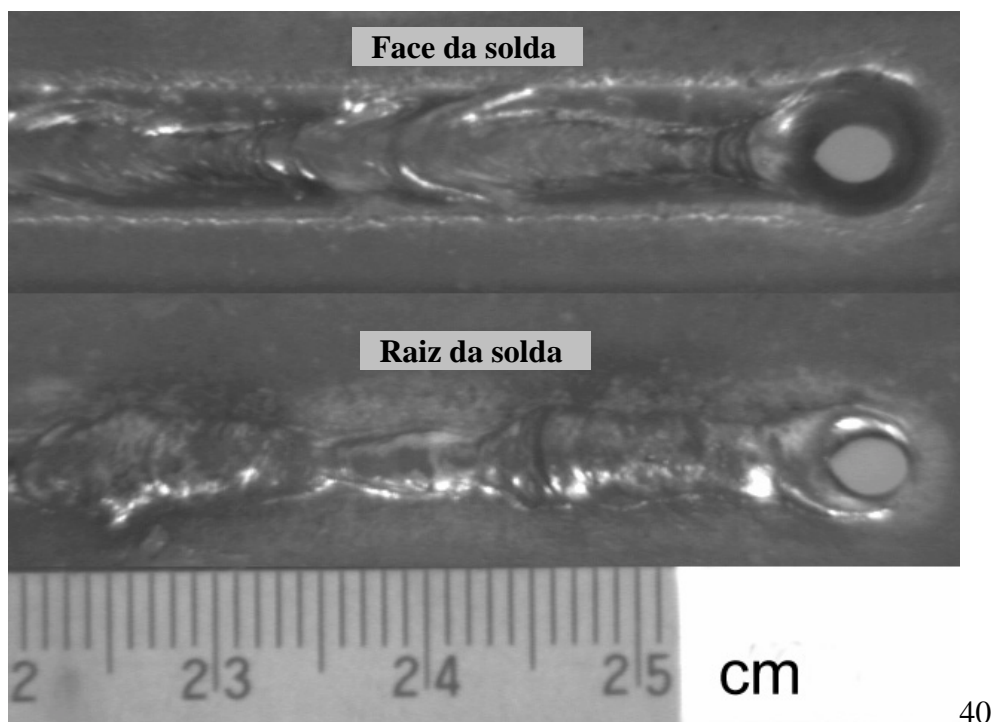
### 3.3. Efeito do metal de base

A Tabela 3 mostra os resultados dos testes realizados em chapas de aço ABNT 1020 com 4,4 mm de espessura e de aço ABNT 304L com 3,8 mm de espessura. O tempo da rampa de corrente utilizada no aço ABNT 304L foi determinada experimentalmente da mesma forma como apresentado no item 3.2 e foi definido em 2 s.

**Tabela 3-** Testes realizados para verificar o efeito do metal de base.

	ABNT 1020	ABNT 304L
Corrente	115 A	110 A
Gás de plasma	1,2 l/min (Ar)	1,2 l/min (Ar)
Gás de proteção	6 l/min (Ar 5% O <sub>2</sub> )	6 l/min (Ar 5% O <sub>2</sub> )
Gás de purga	5 l/min (Ar 5% He)	5 l/min (Ar 5% He)
Velocidade de soldagem	15 cm/min	15 cm/min
Bocal de constrição	φ 2,4 mm	φ 2,4 mm
Rampa de corrente	4 s	2 s
Instabilidade observada	sim	não
Reforço na raiz da solda	de 1 a 4 mm	1 mm (constante)

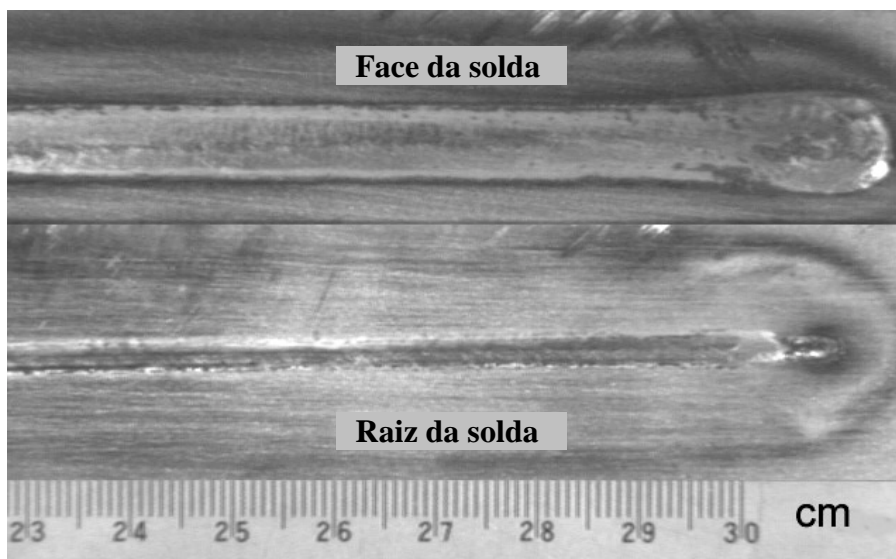
Os testes realizados no aço ABNT 1020 demonstraram uma instabilidade excessiva do *keyhole*, a qual pode ser claramente observada na Figura 4. Pode-se notar também nesta figura um excessivo reforço na raiz da solda. Alterações de  $\pm 5$  ampères na corrente de soldagem não melhoraram a soldagem, gerando o corte do material ou penetração incompleta, respectivamente. Analisando as Figuras 3 e 4, pode ser verificado que existe um comportamento diferente quando são utilizadas chapas de lotes diferentes, demonstrando a importância do metal de base nos resultados da soldagem. Estes resultados provavelmente se devem à baixa qualidade do metal de base utilizado (ABNT 1020), podendo ter sido ocasionada por diferenças na composição deste material ao longo de seu comprimento ou devido à presença de regiões com segregação de impurezas. Desta forma, a poça de fusão tenderia a apresentar um comportamento instável, variando de região para região dentro do metal de base e tornando difícil a aplicação da técnica *keyhole*.



**Figura 4-** Instabilidade no *keyhole* na soldagem do aço ABNT 1020.

Por outro lado, as soldas obtidas no aço inoxidável (ABNT 304L) apresentaram reforço da raiz constante ao longo de todo o comprimento soldado (*keyhole* estável) e bom acabamento superficial, conforme mostrado na Figura 5. Nestes testes, o fenômeno da instabilidade do *keyhole* não foi observado provavelmente pela melhor uniformidade na composição do metal de base utilizado. Estes resultados indicam que a composição do material parece influenciar a estabilidade do *keyhole* e a geração de defeitos na solda.

Desta forma, a utilização da soldagem a plasma com a técnica *keyhole* se torna viável a medida que os fatores que tendem a promover um comportamento instável da poça de fusão são eliminados. Como regra geral, o próprio metal de base utilizado deve apresentar uma composição química uniforme de tal forma a não interferir no equilíbrio do *keyhole* durante a soldagem.



**Figura 5-** Solda estável obtida com o aço ABNT 304L.

#### **4. CONCLUSÕES**

1. A provável não uniformidade da composição do metal de base foi o principal fator responsável pela geração de instabilidades no *keyhole*.
2. A configuração da junta apresentou influência apenas na intensidade da instabilidade, não estando diretamente relacionada com sua geração.
3. O controle de abertura do *keyhole* não apresentou influência sobre a instabilidade causada na poça de fusão.

#### **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. 329 - 350.
- De Paula Jr., O. S., 1997, “Desenvolvimento e Aplicação da Soldagem Plasma pela Técnica Keyhole”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 107 p.
- Díaz, V. V., Dutra, J. C. e Gohr Jr., R., 1999, “Análise dos Parâmetros e Variáveis da Soldagem Plasma pela Técnica Keyhole para a Determinação de Seus Graus de Relevância” Anais do XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, CD-ROM, Belo Horizonte, MG, Brasil, 8 – 10 Setembro.
- 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.



- 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.
- 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.
- Walsh, D. W. and Nunes Jr., A. C., 1989, "Keyhole Flow Phenomena in VPPA Weldments", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Trends in Welding Science and Technology*, ASM International, Gatlinburg, Tennessee, USA, pp. 501 - 505, 14 - 18 May.