

**CT -27 ESTUDO DA SOLDAGEM PLASMA PELA TÉCNICA KEYHOLE
COM CORRENTE CONTÍNUA PULSADA CONCERNENTE À
INFLUENCIA DAS VARIÁVEIS SOBRE A GEOMETRIA DA SOLDA**

⁽¹⁾ **Víctor Vergara Díaz**

⁽²⁾ **Jair Carlos Dutra**

⁽³⁾ **Raul Gohr Junior**

RESUMO

Este trabalho representa uma contribuição para uma melhor caracterização da soldagem plasma pela técnica keyhole, trabalhando-se com corrente contínua pulsada. Para atingir este objetivo, montou-se uma bancada de ensaios automatizada utilizando equipamentos e instrumentos de monitoramento projetados e construídos no LABSOLA/UFSC e, para permitir o controle da corrente, da vazão de gás de plasma e da velocidade de soldagem, desenvolveu-se um programa computacional específico. Todos os experimentos foram realizados em juntas de topo em I, com passe único e sem adição de material, utilizando-se como material de base o aço 300M (AMS 6417) com espessura de 3,5 mm. Neste estudo busca-se avaliar a influência da corrente, velocidade de soldagem e frequência de pulsação, tanto sobre o aspecto e geometria do cordão, quanto sobre a estabilidade do arco. Os resultados obtidos indicam que a corrente contínua pulsada é limitada principalmente pela dificuldade em se estabelecer uma faixa de trabalho das variáveis, para manter o keyhole e a estabilidade da poça de fusão.

Palavras-chave: Corrente pulsada, soldagem plasma, keyhole

ABSTRACT

This work is a contribution to the characterization of the plasma welding process using the keyhole technique, specifically with respect to the selection of parameters and variables. The experiments were carried out with equipments and measurement instruments designed at LABSOLA/UFSC, including a special software developed to allow the control of gas plasma flow rate, current and travel speed. The welds were made on 3,5 mm thickness 300M (AMS 6417) plates, "I" joint preparation, single pass and without filler metal. The results show that the pulsing the welding current overcomes the major limitation of poor tolerance to variation in welding parameter and weld pool stability.

Key-Words: Current pulsed, Plasma welding, keyhole

⁽¹⁾ Eng. Mecânico E – mail: vergara@labsolda.ufsc.br, Florianópolis SC

⁽²⁾ Dr. Eng., Prof. LABSOLA/UFSC Cx. P. 476 – 88040-900 – Fax: (048) 234-6516 – e-mail: labsolda@emc.ufsc.br, Florianópolis SC

⁽³⁾ Eng. LABSOLA/UFSC Cx. P. 476 – 88040-900 – Fax: (048) 234-6516 – e-mail: rgj@labsolda.ufsc.br, Florianópolis SC

1. INTRODUÇÃO

A corrente contínua pulsada pode ser usada na soldagem por plasma, abrangendo todas as técnicas (micro-plasma, melt-in, *keyhole*). A corrente pulsada se caracteriza por variar a amplitude entre um valor mínimo (corrente de base) e um valor máximo (corrente de pulso). O período correspondente a I_p representa aquele em que ocorre a fusão e, por conseguinte a penetração no metal base. Na fase de corrente de base o material fundido inicia o processo de solidificação, permanecendo o gás de plasma constante durante a soldagem ^(1, 2). Segundo a referência ⁽³⁾ esta condição ameniza problemas de excesso de penetração e de deformação da peça a ser soldada. Na pesquisa realizada por Lucas e Paula Jr ^(1, 4) foi observado que a corrente contínua pulsada proporciona melhor estabilidade do *keyhole*. A determinação das variáveis em corrente contínua pulsada são função da espessura e composição química do material base ^(1,5). Para materiais de espessura entre 3 e 6 mm, é requerido um tempo de pulso mínimo de 0,1 s para obter o *keyhole* e conseqüentemente uma penetração total. O tempo de base deve ser ajustado igual ao tempo de pulso, sendo esta relação suficiente para permitir uma adequada solidificação entre os pulsos. A referência ⁽⁴⁾ estudou duas variações, as quais não apresentaram bons resultados. A primeira foi utilizando tempos de pulsos maiores que os tempos de base, verificando-se um excessivo reforço na raiz, o que caracteriza um excesso de penetração da solda. Para tempos de base maiores que os de pulso ocorreu falta de penetração na raiz uma vez que o material tinha mais tempo para se solidificar e fechar o *keyhole* do que a quantidade de material fundido que se formava na fase de pulso. Apesar das grandes vantagens apresentadas, quando se utiliza a corrente contínua pulsada através da técnica *keyhole*, sua utilização em escala industrial é limitada, especialmente pela dificuldade em se estabelecer, numa faixa de trabalho, os parâmetros e variáveis para manter o *keyhole* e a estabilidade da poça de fusão ^(1,5).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma fonte de soldagem operando em conjunto com um módulo plasma. Para o controle e monitoração do gás de plasma foi utilizada uma válvula controladora de vazão mássica e medidores digitais de vazão de gás. Para a movimentação da pistola de soldagem foi utilizado um sistema de deslocamento, interligado a um microcomputador através de uma placa de aquisição e controle de dados. Desta forma, o controle da movimentação, assim como da vazão do gás de plasma e dos níveis de corrente, pode ser executado através de um programa especialmente desenvolvido para a soldagem PLASMA. Como observação, com exceção à válvula de controle de vazão, os demais equipamentos e programas foram desenvolvidos no LABSOLDA/UFSC. A figura 1 mostra a bancada para o processo Plasma.

Como metal de base foram utilizadas chapas de aço 300M, com espessura de 3,5 mm, preparadas em juntas de topo com folga zero. A composição química do material de base é apresentada na tabela 1. Utilizou-se bocal constritor de 2,4 mm de diâmetro de orifício. O eletrodo foi o EWTh2 (tungstênio com 2% de tório), de 4,8 mm de diâmetro, ângulo da ponta de 30°, montado no bocal com recuo de 2,4 mm. Os gases utilizados nos experimentos foram argônio (grau de pureza: 99,99%), para o gás plasma e gás de proteção, e nitrogênio, este para a proteção da raiz do cordão de solda. Os ensaios foram realizados na posição plana (1G), em passe único, sem adição de arame e utilizada corrente contínua pulsada. Para verificar a ausência de

Associação Brasileira de Soldagem

poros, micrografias foram preparadas a partir de corpos de prova cortados no sentido longitudinal. No análises dos resultados foram utilizados métodos de análise estatísticos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados testes usando tiras de aço 300M (198x60x3,5 mm) que permitiram identificar níveis de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás plasma, que em conjunto promovessem a técnica do furo de fusão, de modo a produzir cordões contínuos, isentos de defeitos superficiais e com penetração uniforme ao longo de seu comprimento. Os resultados são apresentados na tabela 2 e figura 2.

Segundo Paula Jr. ⁽⁴⁾, a vazão de gás de plasma utilizada em corrente contínua pulsada para a obtenção de uma solda de qualidade foi um pouco superior a aquela adotada para soldagem com corrente contínua constante (de 1,4 para 2,0 l/min). Essas observações divergem dos resultados dos testes realizados neste estudo, para o aço 300M, de espessura 3,5 mm, cuja vazão de gás de plasma para corrente contínua constante e corrente contínua pulsada foi de 0,9 l/min. Observa-se que as soldas realizadas em corrente contínua pulsada, alcançaram uma menor velocidade de soldagem, 23,5 cm/min, comparadas com as soldas realizadas em corrente contínua constante 25 cm/min (material de base de mesmo tipo e espessura). Resultados semelhantes foram obtidos pela referência ⁽⁴⁾ envolvendo aços ABNT 1020.

Verificou-se aparecimento de mordeduras para velocidades de soldagem acima da velocidade de regime, 23,5 cm/min, o que leva a concluir, a estreita faixa de trabalho dos parâmetros para manter o *keyhole* e a estabilidade da poça de fusão. Verificou-se a influência da freqüência de pulsação, fazendo testes para 1 e 3 Hz, utilizando os mesmos parâmetros e variáveis da tabela 2 e considerando que

$$\frac{t_p}{t_b} = 1 \quad [1]$$

Para a freqüência de pulsação de 1Hz ($t_p=t_b=0,5$ s), figura 3, na superfície da solda verifica-se a presença de pequenas mordeduras e o reforço da raiz apresenta penetração irregular, ou seja, o comportamento é variável entre *keyhole* e penetração incompleta. A falta de penetração é produzida na fase do tempo de base. Devido ao excessivo tempo de base o material se solidifica e fecha o *keyhole* já formado na fase de pulso.

Para a freqüência de pulsação de 3 Hz ($t_p=t_b=0,17$ s), figura 4, e com uma velocidade de soldagem de 23,5 cm/min, a solda apresenta bom aspecto superficial e excesso de penetração, o que sugere fazer testes para velocidades de soldagem mais elevadas, 25 e 26 cm/min. Para a velocidade de soldagem de 26 cm/min, o cordão apresenta falta de penetração e os melhores resultados são para uma velocidade máxima de 25 cm/min. A tabela 3, resume os testes para verificar a influência da freqüência de pulsação na utilização da corrente contínua pulsada.

A figura 5, indica o efeito do fator freqüência de pulsação sobre a largura da solda (L) e a velocidade de soldagem (Vs).

Os resultados dos testes mostram que mudanças na freqüência de pulsação influenciam diretamente na velocidade de soldagem. Este ganho em velocidade de soldagem permite uma diminuição na largura do cordão (L). A análise da figura 5, reforçada com a análise de variância (tabela 4), permite perceber um efeito significativo na largura do cordão.

Associação Brasileira de Soldagem

Prosseguindo com este estudo são comparadas soldagens realizadas em uma mesma corrente média (equação 2), mas com diferentes estruturas da corrente pulsada.

$$I_m = \frac{I_{ptp} + I_{btb}}{tp + tb} = cte \quad [2]$$

Em todos os corpos de prova soldados a corrente média foi de 120,5 (A). Para que isto fosse conseguido, as soldas em corrente pulsada foram realizadas com uma relação

$\frac{I_p}{I_b}$ de

$$\frac{I_p}{I_b} = \frac{145}{96} = \frac{140}{101} = \frac{135}{106} = \frac{130}{111}$$

Em todos os casos a relação $\frac{tp}{tb}$ foi constante e igual a 1. Utilizou-se freqüências

de pulsação de 2 e 3 Hz. Na tabela 5 é apresentado o planejamento do experimento e o resultado dos testes. Nos oito testes realizados todos eles forneceram condições para a manutenção de *keyhole*, demonstrando com isto que para o aço 300M com espessura de 3,5 mm, não existe uma única condição de soldagem quando é empregada a técnica *keyhole* utilizando a corrente contínua pulsada. Por inspeção visual se pode verificar alguma diferença na largura da solda para os diferentes testes. A figura 6 apresenta o efeito da freqüência de pulso e o efeito da relação I_p/I_b sobre a largura da solda, os resultados são também comparados com a soldagem em corrente contínua constante. A figura 7 mostra a micrografia para soldas realizadas com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada. Como pode ser observado, a corrente contínua pulsada apresentou menor largura em relação à corrente contínua constante, para uma mesma corrente média.

É interessante se observar que os menores valores na largura da solda são obtidos para freqüências maiores. No que concerne à relação I_p/I_b , os menores valores da largura são para relações baixas de I_p/I_b .

Ao comparar os resultados em corrente contínua constante ($I_{ccc}=120,5$ A) a largura da solda é sempre menor para qualquer valor da relação I_p/I_b para uma freqüência de pulsação de 2 Hz, esta redução na largura está relacionada intimamente com a velocidade de soldagem (25 cm/min em corrente contínua constante e 23,5 cm/min em corrente contínua pulsada).

Para freqüências de pulsação de 3 Hz, as vantagens são claramente visualizadas, em comparação à corrente contínua constante, somente para $I_p/I_b=130/111$, em que a largura apresenta seu menor valor. Observa-se também que não existe uma diferença significativa na largura da solda, quando se utilizam relações de I_p/I_b igual a 135/106 e 145/96, em comparação com a corrente contínua constante.

4. CONCLUSÕES

A utilização da corrente contínua pulsada é limitada principalmente pela dificuldade em se estabelecer uma faixa de trabalho das variáveis, para manter o *keyhole* e a estabilidade da poça de fusão. Esta característica é uma das grandes diferenças entre a corrente contínua constante e a corrente contínua pulsada.

Este processo revelou ser bastante versátil na soldagem do aço 300M, devido a que inicialmente era utilizado o processo TIG. Quando comparados os processos TIG e PLASMA foi observado o seguinte:

Associação Brasileira de Soldagem

É possível soldar sem aporte de material, com junta a topo e um único passe. No processo TIG é necessário preparar a junta, três passes e com aporte de material. Esta situação resulta numa economia da ordem de 50%.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LUCAS, W. TIG and Plasma welding. England: Abington Publishing, 1990, p.112.
- (2) LUNDIN, C. D., RUPRECH, WJ. Pulsed current plasma arc welding. Welding Journal, p. 11-19, january 1974.
- (3) DUTRA, J. C., MARQUEZE, C. M. Estudo do processo micro-plasma concernente à influência das variáveis sobre a geometria da solda. In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, águas de São Pedro-SP, p. 469-478, 1993.
- (4) PAULA JR. O. S. DE. Desenvolvimento e aplicação da soldagem plasma pela técnica keyhole, Dissertação de mestrado, UFSC, Brasil, p. 111, 1997.
- (5) VERGARA DÍAZ, V. M. Influencia de parâmetros e variáveis de soldagem plasma sobre as características da solda com ênfase na análise da abertura e no fechamento do keyhole, Dissertação de mestrado, UFSC, Brasil, p. 114, 1999.



1. Fonte de soldagem 2. Módulo Plasma 3. Tocha de soldagem Plasma 4. Válvula de controle da vazão de gás de Plasma 5. Sistema de deslocamento da tocha 6. Medidores de Vazão de Gás 7. Cabeçote Alimentador de Arame 8. Gases 9. Computador

Figura 1 – Bancada Processo Plasma

Associação Brasileira de Soldagem

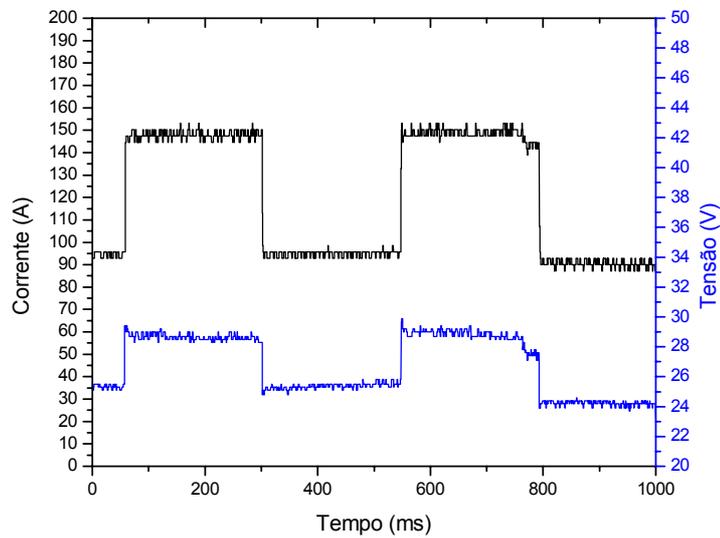
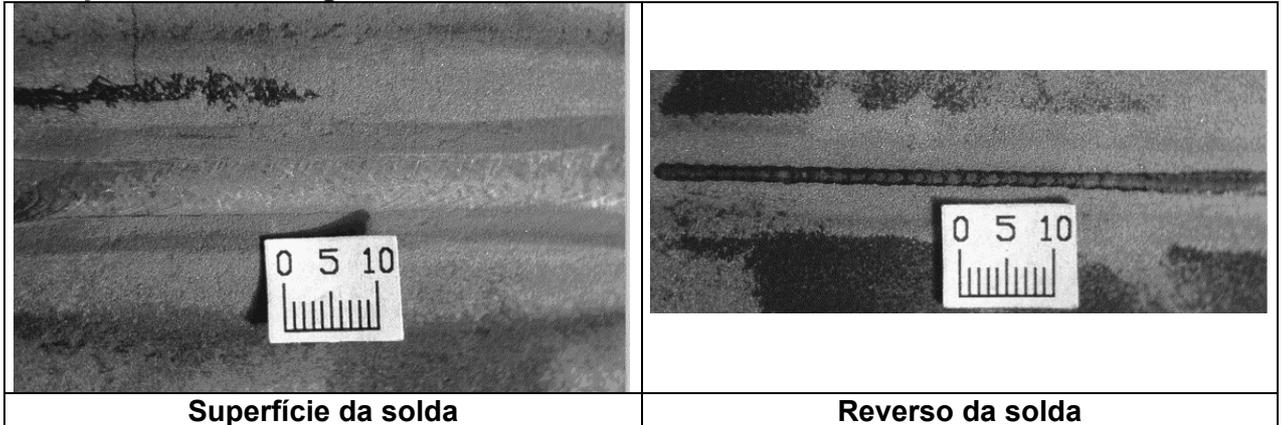


Figura 2 - Aspecto visual da solda e oscilograma da corrente e tensão com frequência de pulsação 2,0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

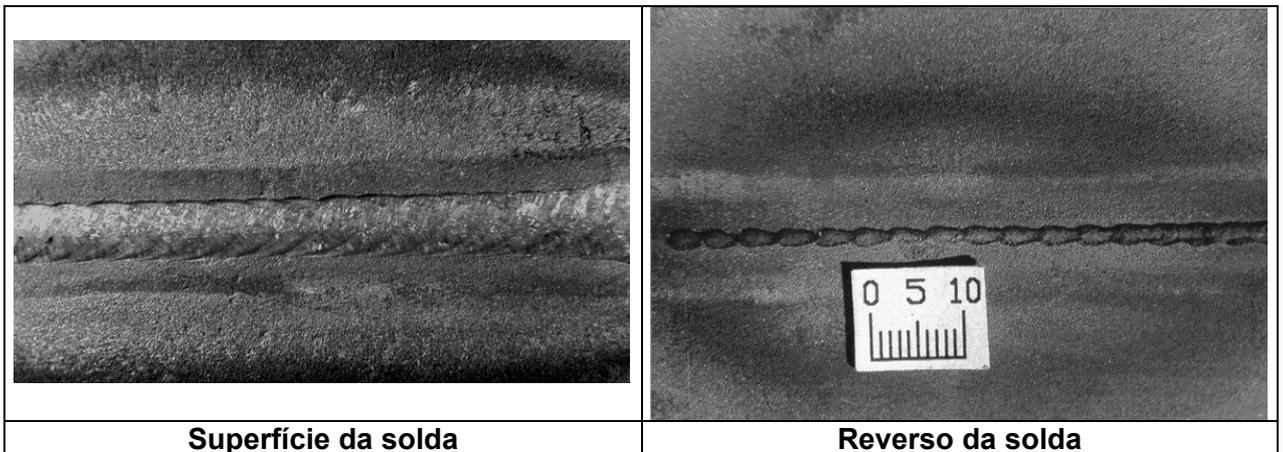
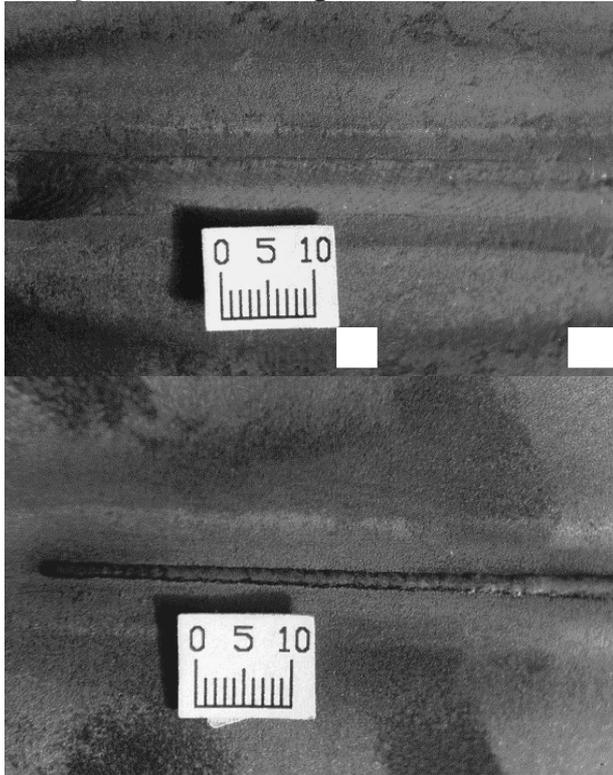


Figura 3 - Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 1,0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso.

Associação Brasileira de Soldagem



Superfície da solda
Reverso da solda

Figura 4 - Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 3,0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

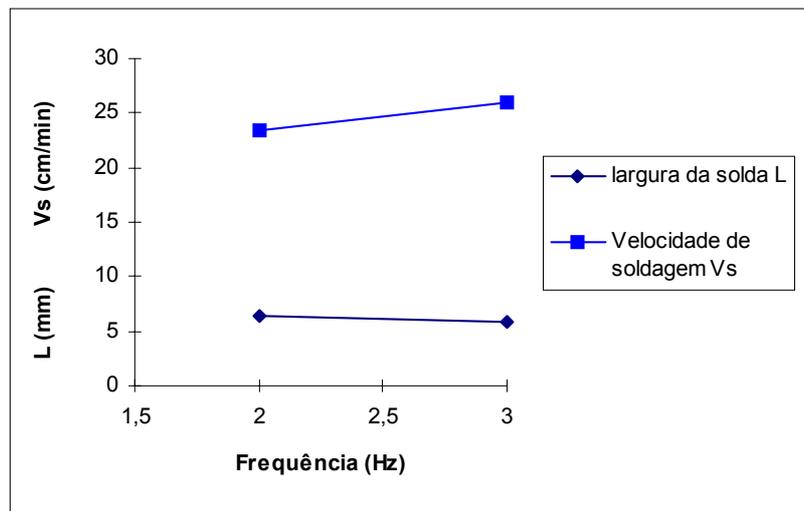


Figura 5 - Efeito da frequência de pulsação sobre a largura da solda e a velocidade de soldagem

Associação Brasileira de Soldagem

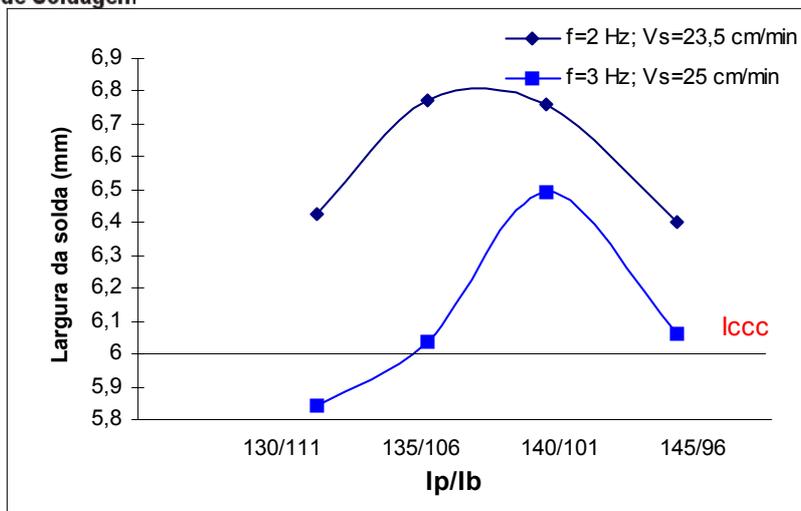


Figura 6 - Efeito da frequência de pulso e I_p/I_b na largura da solda

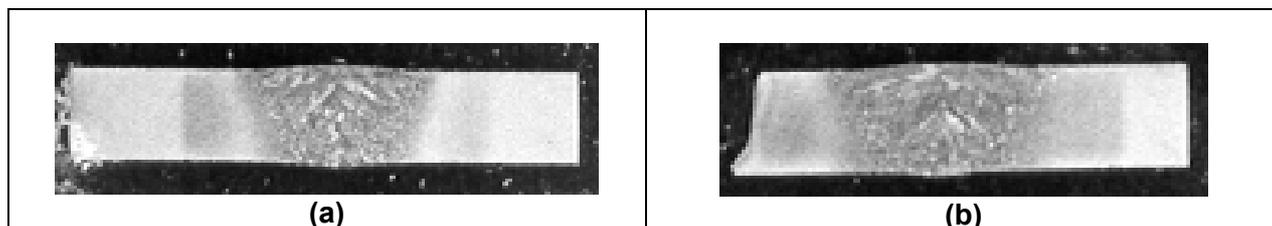


Figura 7 - Micrografia de soldas realizadas para a mesma corrente média (a) Corrente contínua constante (b) Corrente contínua pulsada, $I_p/I_b = 130/111$. Ataque com nital a 2%.

Tabela 1 - Composição química do material de base [% em peso]. Espectrometria de emissão ótica

| | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni |
| 0.30 | 1.84 | 0.8 | 0.007 | 0.001 | 0.8 | 0.4 | 1.66 |
| Al | Co | Cu | Nb | Ti | V | W | Sn |
| 0.03 | 0.06 | 0.13 | 0.001 | 0.005 | 0.07 | 0.01 | - |

Tabela 2 - Variáveis e parâmetros de soldagem

| Variáveis de soldagem no regime | | | Variáveis de soldagem na abertura | | |
|-------------------------------------|-------------|-------|-----------------------------------|-------------|------|
| Corrente de pulso | Ip(A) | 145 | Corrente | | |
| Tempo de pulso | tp(s) | 0.25 | Corrente inicial | li(A) | 10 |
| Corrente de base | lb(A) | 96 | Tempo de atuação | til(s) | 0 |
| Tempo de base | tb(s) | 0.25 | Tempo de subida da rampa | tsl(s) | 3 |
| Corrente média | Im(A) | 120.5 | | | |
| Tensão | U(V) | 27.7 | | | |
| Vazão de gás de plasma | VGP(l/min) | 0.9 | Gás plasma | | |
| Vazão de gás de proteção | VGPr(l/min) | 9.0 | Vazão de gás inicial | ViGP(l/min) | 0,25 |
| Velocidade de soldagem | Vs(cm/min) | 23.5 | Tempo de atuação | tiGP(s) | 0 |
| | | | Tempo de subida da rampa | tsGP(s) | 3 |
| | | | Deslocamento da tocha | | |
| | | | Tempo início do deslocamento | tiVs(s) | 0 |
| | | | Tempo de subida da velocidade | tsVs(s) | 3 |
| Variáveis de soldagem no fechamento | | | | | |
| Corrente | | | Gás manutenção, arco piloto | Vgm(l/min) | 0,25 |
| Tempo de descida da rampa | Tdl(s) | 8 | Tempo de pre-gás | tpreG(s) | 2 |
| Corrente final | If(A) | 40 | Tempo de pós-gás | tposG(s) | 2 |
| Defasagem da corrente | tdefl(s) | 3 | Vazão de gás de purga | VGpg(l/min) | 5 |
| | | | Diâmetro do bocal constritor | d(mm) | 2,4 |
| Gás plasma | | | Distância tocha-peça | DTP(mm) | 4 |
| Tempo de descida da rampa | TdGP(s) | 11 | | | |
| Vazão final de gás | VfGP(l/min) | 0,25 | | | |
| Defasagem vazão gás plasma | tdefGP(s) | 0 | | | |
| Velocidade de soldagem | | | | | |
| Tempo de descida da rampa | tdVs(s) | 8 | | | |
| Defasagem veloc. de soldagem | tdefVs(s) | 1 | | | |

Tabela 3 - Condições e resultados de testes utilizados para avaliar a influência da frequência de pulsação (FP)

| FP (Hz) | tb=tp (ms) | Vs (cm/min) | Largura média da solda (mm) | Acabamento | Penetração |
|---------|------------|-------------|-----------------------------|------------|------------|
| 1 | 500 | 23.5 | - | Bom | Irregular |
| 2 | 250 | 23.5 | 6,45 | Bom | Correta |
| 3 | 170 | 23.5 | - | Bom | Excessiva |
| 3 | 170 | 25 | 5,93 | Bom | Correta |
| 3 | 170 | 26 | - | Razoável | Incompleta |

Tabela 4 - Resultados de Análise de Variância para a largura da solda

| Fonte de Variação | Soma dos quadrados | Graus de liberdade | Média dos quadrados | F _{observado} | F _{critico} |
|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| FP | 0.55125 | 1 | 0.55125 | Fo=24.96 | > 5,987 |
| Residual | 0.1325 | 6 | 0.022083 | | |
| Total | 0.68375 | 7 | | | |

FP: Frequência de pulsação

Tabela 5 - Planejamento do experimento e resultados dos testes

| Ensaio | Ip/lb | tp = tb (ms) | FP Hz | Vs (cm/min) | L (mm) | Acabamento | Penetração |
|--------|---------|--------------|-------|-------------|--------|------------|------------|
| 1 | 145/96 | 250 | 2 | 23,5 | 6,4 | Bom | Correta |
| 2 | 145/96 | 170 | 3 | 25 | 6,06 | Bom | Correta |
| 3 | 140/101 | 250 | 2 | 23,5 | 6,76 | Bom | Correta |
| 4 | 140/101 | 170 | 3 | 25 | 6,49 | Bom | Correta |
| 5 | 135/106 | 250 | 2 | 23,5 | 6,775 | Bom | Correta |
| 6 | 135/106 | 170 | 3 | 25 | 6,03 | Bom | Correta |
| 7 | 130/111 | 250 | 2 | 23,5 | 6,425 | Bom | Correta |
| 8 | 130/111 | 170 | 3 | 25 | 5,8 | Bom | Correta |

L: Largura média da solda