

A Técnica Keyhole na Soldagem Plasma

Óder Silva de Paula Jr., Eng. Mecânico, M.sc., Fiat Allis, Depto de Engenharia de Manufatura, Minas Gerais, Brasil
Jair Carlos Dutra, Prof. LABSOLDA/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

Este trabalho representa uma contribuição para uma melhor caracterização da soldagem plasma pela técnica keyhole, no que concerne à determinação dos parâmetros e variáveis para soldagem do aço 1020, trabalhando-se com corrente contínua constante e pulsada, tanto na posição plana como vertical. Foram obtidos bons resultados na posição vertical, especialmente pela utilização da corrente pulsada. Para a análise da qualidade das soldas foram efectuadas metalografias de secções transversais retiradas dos corpos de prova soldados. Ensaios de dobramento de face e de raiz, bem como radiográfico também foram realizados. Os resultados mostraram que o processo apresenta uma boa repetibilidade, com soldas isentas de defeitos. Um rigoroso controlo dos parâmetros e variáveis de soldagem torna-se necessário para obter soldas de boa qualidade. Obteve-se uma produtividade satisfatória, especialmente para chapas de maior espessura, que foram soldadas em passe único.

Com a crescente utilização de novos materiais, bem como com o aumento das exigências de qualidade associadas à necessidade emergente de melhorar a produtividade e flexibilização dos processos de fabricação, assiste-se cada vez mais à busca de optimização e a desenvolvimentos de novas tecnologias e processos que venham a atender estas exigências. No âmbito desta busca encontra-se o processo de soldagem plasma, que embora tenha sido inventado há mais de 40 anos [1, 2], ainda é considerado um processo avançado de soldagem, devido não só aos desenvolvimentos relativamente recentes, bem como à sua utilização limitada a aplicações relativamente nobres [3].

Basicamente, o processo de soldagem ao arco eléctrico denominado de soldagem plasma - PAW, pode ser considerado uma evolução do processo TIG. Isto porque em ambos os casos se tem um electrodo não consumível de tungsténio e uma protecção do arco voltaico com gás inerte contra a con-

laminação atmosférica. A principal diferença é que na soldagem plasma, o electrodo fica confinado, concentrando mais o arco, que assume uma forma essencialmente cilíndrica. Consegue-se desta forma uma boa estabilidade direcional e um maior efeito de concentração de energia, produzindo assim uma menor ZAC [1, 4, 5, 6, 7]. A relativa tolerância à variação da distância da tocha em relação à peça-obra é outra vantagem do processo advinda da constrição do arco.

A técnica do “buraco da fechadura”

Dois modos bastante distintos são empregados para soldar peças dentro de uma ampla faixa de espessura: o modo “melt-in” (soldagem convencional por fusão) e o “keyhole”. Este último também é conhecido como técnica do “buraco da fechadura”.

A soldagem plasma pela técnica keyhole apresenta as vantagens de se poder obter maiores velocidades de soldagem, penetração total e uniforme, além de uma simplificação nos procedimentos de preparação da junta [1, 2, 4]. As suas aplicações vão desde a utilização em diversos componentes das mais variadas áreas da indústria, bem como em componentes de paredes finas utilizados em equipamentos médicos e de instrumentação, como por exemplo, junções de termopares [2].

A introdução do plasma pulsado nos últimos anos generalizou a utilização deste processo a várias outras aplicações, nomeadamente a soldagem de tubos em todas as posições [8, 9]. Halmoy et al. [9], apresentaram aplicações do processo para reparos e fabricação off-shore, destacando-se a soldagem de tubos de aço inoxidável dúplex com espessura de 6,35 a 10,6 mm. A redução no tempo de soldagem mostrou ser considerável e da ordem de 50% em comparação com o TIG.

Outra contribuição para o avanço no campo das aplicações foi a utilização

da corrente alternada, que foi desenvolvida basicamente para ser utilizada na soldagem do alumínio e suas ligas [10], sendo atualmente utilizado o arco plasma nestes tipos de aplicações especialmente na indústria aeroespacial [10, 11, 12]. Tomsic e Barhorst [11], destacaram a aplicabilidade satisfatória da corrente alternada de onda retangular para soldagem do alumínio. Eles estabeleceram uma relação entre os tempos e amplitudes de corrente para algumas ligas de alumínio de espessura igual a 6,35 mm, e demonstraram o efeito dos mesmos sobre a solda. Em típicos períodos de tempo da ordem de 19 ms na polaridade direta e 4 ms na polaridade inversa, foi verificado um bom efeito de limpeza da peça-obra, mínimo desgaste do electrodo e boa estabilidade do arco. Martikainen e Moisio [5], desenvolveram um estudo da soldagem plasma pela técnica keyhole em diversos tipos de aços estruturais e obtiveram soldas isentas de defeitos, com bom limite de resistência à tração e tenacidade.

Estudos posteriores aliados a estes novos conhecimentos permitiram que se observassem as vantagens oferecidas pela soldagem plasma em aspectos como a velocidade, comparativamente, por exemplo, à soldagem MIG principalmente no que se refere à profundidade de penetração. A penetração é limitada apenas pela impossibilidade da tensão superficial sustentar qualquer dimensão da coluna de metal líquido durante a soldagem. A qualidade da solda, bem como as suas velocidades elevadas comparativamente às do TIG também tornaram a soldagem plasma um processo altamente competitivo em relação a este último.

Estas considerações evidenciam as vantagens e qualidades da soldagem plasma em relação aos demais processos de soldagem em determinadas aplicações, o que estimula e conduz cada vez mais a novos estudos e investigações que visam fornecer uma melhor caracterização do processo.

Os materiais e os métodos

Como metal de base utilizou-se na maioria dos experimentos e no desenvolvimento deste estudo, o aço 1020 nas espessuras de 3,2 - 4,8 - 6,35 - 10 e 25,4 mm. O electrodo utilizado foi o EWTh2 (tungstênio com 2% de tório), de 4,8 mm de diâmetro. O ângulo de ponta foi mantido a 30°. Utilizou-se bocais constritores com os seguintes diâmetros de orifício: 2,8 e 3,2 mm, seleccionados em função da corrente máxima de soldagem para os quais eram indicados [13]. O gás utilizado nos experimentos foi o argônio standard tanto como gás de plasma como gás de proteção. O Grau de pureza foi de 99,99%. Usou-se um cilindro para cada linha. O arame-electrodo para enchimento das juntas onde se soldou com o plasma pela técnica *keyhole* para passe de raiz e preenchimento da junta pelo processo MAG com transferência por *spray*, foi o AWS ER70 S-6. Para este caso específico utilizou-se como gás de proteção durante a soldagem MAG uma mistura de argônio com CO₂ (C18).

• A Infra-estrutura utilizada

Para a realização dos experimentos, a infra-estrutura básica utilizada consistiu numa fonte de soldagem multi-processo, módulo plasma, medidores digitais de vazão de gás, sistema de deslocamento computadorizado da tocha de soldagem, “softwares” para comando e aquisição de dados desenvolvidos em turbo Pascal, um micro-computador com impressora e uma placa de aquisição de dados.

Também fez parte da infra-estrutura de experimentação, a tocha de soldagem plasma modelo PWM-300 e uma válvula controladora de vazão mássica que foi fornecida pelo Centro Tecnológico da Aeronáutica - CTA. Esta válvula foi utilizada para um controlo fino da vazão do gás de plasma.

• Procedimentos de soldagem

A maioria dos ensaios foram realizados na posição plana (1G), utilizando-

-se a corrente contínua constante (CC) e pulsada. Alguns ensaios foram realizados na posição vertical utilizando-se também as mesmas formas de corrente. O tipo de junta nos CP's para soldagem plasma pela técnica *keyhole* foi a junta de topo com folga zero, com as bordas das chapas usinadas na região da junta. Só houve adição de material quando foram soldados os CP's com a configuração da junta em V, aço 1020 de espessuras 10 e 25,4 mm soldados na posição plana. Nestes casos, o passe de raiz foi com o processo plasma autógeno e o passe de enchimento com o MAG. A folga na raiz também era zero e o nariz foi usinado na dimensão de 6,0 mm.

Os CP's foram preparados nas dimensões de 160 x 120 mm, sendo que ambos os lados de sua superfície eram submetidas a um lixamento prévio para remoção da carepa de laminação formada sobre o material. Na análise metalográfica, os CP's foram lixados até lixa 600 mesh, polidos e atacados com nital a 5%. Para medir a largura dos CP's utilizou-se um projector de perfis com capacidade de aumento de 10X e o reforço foi medido com um paquímetro. O recuo do electrodo foi mantido sempre em 2,4 mm. Para garantir com exactidão esta medida utilizou-se um calibre padrão, acessório que acompanha a tocha de soldagem.

Resultados e discussão

Uma série de experimentos foram realizados para estabelecer os melhores parâmetros e variáveis para o material utilizado neste trabalho e que proporcionassem a obtenção da técnica *keyhole*, ou seja, a ocorrência de penetração total, levando a obter uma solda de qualidade. O padrão de aceitação adoptado foi que as soldas apresentassem ausência de discontinuidades, tais como: porosidades, trincas e mordeduras acentuadas. Adotou-se um nível de significância de 1% e níveis de aceitação propostos pelas normas BS [14] e DIN [15].

Tabela 1 - Procedimento de soldagem estabelecido para o aço ABNT 1020. Corrente constante. * Passe de raiz.

Parâmetros/variáveis de soldagem				
Espessura do material de base	4,8 mm	6,35 mm	10 mm *	25,4 mm*
Corrente de soldagem (I) A	200	230	245	245
Vazão do Gás de Plasma (VGP) l/min	1,2	1,4	1,6	1,6
Vazão do Gás de Proteção (VGPr) l/min	9,4	9,4	9,4	9,4
Velocidade de soldagem (Vs) cm/min	20,4	19	14,5	14,5
Distância tocha-peça (DTP) mm	4,0	4,0	5,0	5,0
Diâmetro do bocal constritor mm	3,2	3,2	3,2	3,2
Ângulo do eletrodo (α)	30°	30°	30°	30°

Tabela 2 - Procedimento de soldagem estabelecido para o aço ABNT 1020. Corrente pulsada.

Parâmetros/variáveis de soldagem		
Espessura do material de base	4,8 mm	6,35 mm
Corrente de pulso (I _p) A	220	240
Corrente de base (I _b) A	90	130
Tempo de pulso (t _p) ms	250	250
Tempo de base (t _b) ms	250	250
Corrente média (I _m) A	155	185
Vazão do gás de plasma (VGP) l/min	2,0	2,0
Vazão do gás de Proteção (VGPr) l/min	9,4	9,4
Velocidade de soldagem (Vs) cm/min	17,5	16,5
Distância tocha-peça (DTP) mm	4,0	4,0
Diâmetro do bocal constritor mm	3,2	3,2
Ângulo do eletrodo (α)	30°	30°

Foram muitas as dificuldades encontradas para estabelecer os melhores procedimentos de soldagem, especialmente pela falta de dados e informações operacionais disponíveis na literatura pesquisada. Mesmo assim, se conseguiu estabelecer bons procedimentos de soldagem, que estão apresentados nas tabelas 1 e 2.

• Levantamento da repetibilidade dos resultados

Antes de iniciar um estudo mais abrangente da soldagem plasma, verificou-se a repetibilidade dos resultados, ou seja, a capacidade que o processo tem de repeti-los. A análise baseou-se em fundamentos estatís-

Tabela 3 - Dados levantados e calculados em relação ao reforço na raiz para análise da repetibilidade dos resultados.

	Reforço na raiz				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
	0,70	0,80	0,70	0,70	0,70
	0,80	0,80	0,80	0,75	0,80
	0,60	0,90	0,70	0,70	0,80
	0,70	0,90	0,70	0,75	0,70
	0,80	0,70	0,80	0,80	0,80
	0,80	0,70	0,90	0,75	0,70
	0,80	0,80	0,80	0,75	0,90
Média (\bar{x})	0,74	0,80	0,77	0,74	0,77
Desvio padrão (σ)	0,07	0,08	0,07	0,03	0,07
Média total ($\bar{\bar{x}}$)	0,77				

ticos. O material de base foi o aço 1020 de espessura igual a 4,8 mm. Os parâmetros e variáveis adotados para esta análise estão apresentados na tabela 1. Este estudo foi realizado baseando-se em medições da largura da solda e reforço na raiz em vários pontos ao longo de cada corpo de prova soldado, sendo um total de cinco CP's. De cada CP foram extraídos dez valores de largura da solda e sete de reforço na raiz. Todos os CP's foram submetidos à mesma metodologia e condições de soldagem. Estes valores foram comparados e submetidos a uma análise estatística - teste F [16].

A verificação da capacidade que o processo tem de repetir os resultados pode ser observada nas tabelas 3 e 4, que retratam respectivamente os dados levantados e calculados para reforço na raiz e largura da solda. Na tabela 5 são mostradas as grandezas calculadas para o processamento desta análise, baseada no método da análise da variância [17]. Definiu-se repetibilidade como: "variação das medições obtidas quando o mesmo operador mede a mesma dimensão ou característica várias vezes utilizando o mesmo instrumento e método" [16]. Entenda-se aqui como repetibilidade, no caso específico da soldagem plasma, o objetivo de se conseguir resultados similares utilizando para soldar os CP's (amostras), os mesmos métodos, operador, preparação de amostras e procedimentos de soldagem idênticos. Com relação ao reforço na raiz, verificou-se que F_{cal} foi menor que F_{crit} ($0,1684 < 9,15$). Demonstra-se que não há diferenças significativas entre as amostras. Portanto há repetibilidade.

No caso da largura da solda, nota-se também uma boa repetibilidade, a exemplo do que foi observado com relação ao reforço na raiz. Para este caso verifica-se também que F_{cal} foi menor que F_{crit} ($4,49 < 6,42$). Deste modo, pode-se dizer que a repetibilidade dos resultados é boa e em 99% dos casos os valores de largura da solda e reforço na raiz estarão dentro da faixa de repetibilidade.

Tabela 4 - Dados levantados e calculados em relação à largura da solda para análise da repetibilidade dos resultados.

	Largura da solda				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
	7,65	8,05	7,40	7,40	8,10
	7,85	8,10	7,50	7,50	8,10
	7,90	8,00	7,70	7,50	8,10
	7,90	7,90	7,90	7,50	8,10
	7,90	7,85	8,00	7,45	8,00
	7,90	7,80	8,10	7,50	8,00
	7,90	7,80	8,05	7,50	8,00
	7,90	7,80	8,00	7,55	8,00
	7,95	7,90	7,95	7,60	8,10
	8,00	7,90	8,00	7,70	8,05
	7,89	7,91	7,86	7,52	8,06
Média (\bar{x})	7,89	7,91	7,86	7,52	8,06
Desvio padrão (σ)	0,09	0,10	0,23	0,08	0,05
Média total (\bar{x}_i)	7,85				

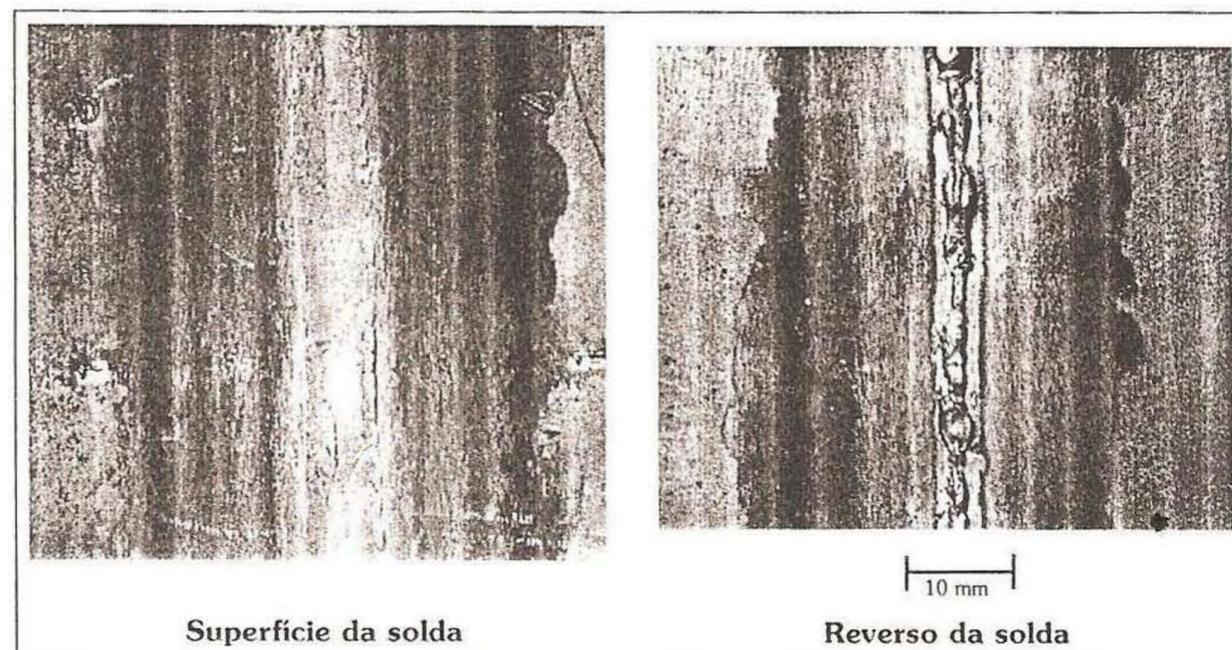
Tabela 5- Dados calculados para aplicação do teste F na análise da repetibilidade dos resultados.

		Largura da solda	Reforço na raiz
Varição entre amostras	Se^2	0,395	0,00475
Varição Residual	Sr^2	0,0879	0,0282
	F_{cal}	4,49	0,1684
	F_{crit}	6,42	9,15

Cabe aqui ressaltar que os valores de reforço na raiz medidos nos CP's estão enquadrados dentro dos níveis de aceitação propostos pelas normas BS [14] e DIN [15]. Não foi encontrado em norma um critério de aceitação aplicável à largura da solda.

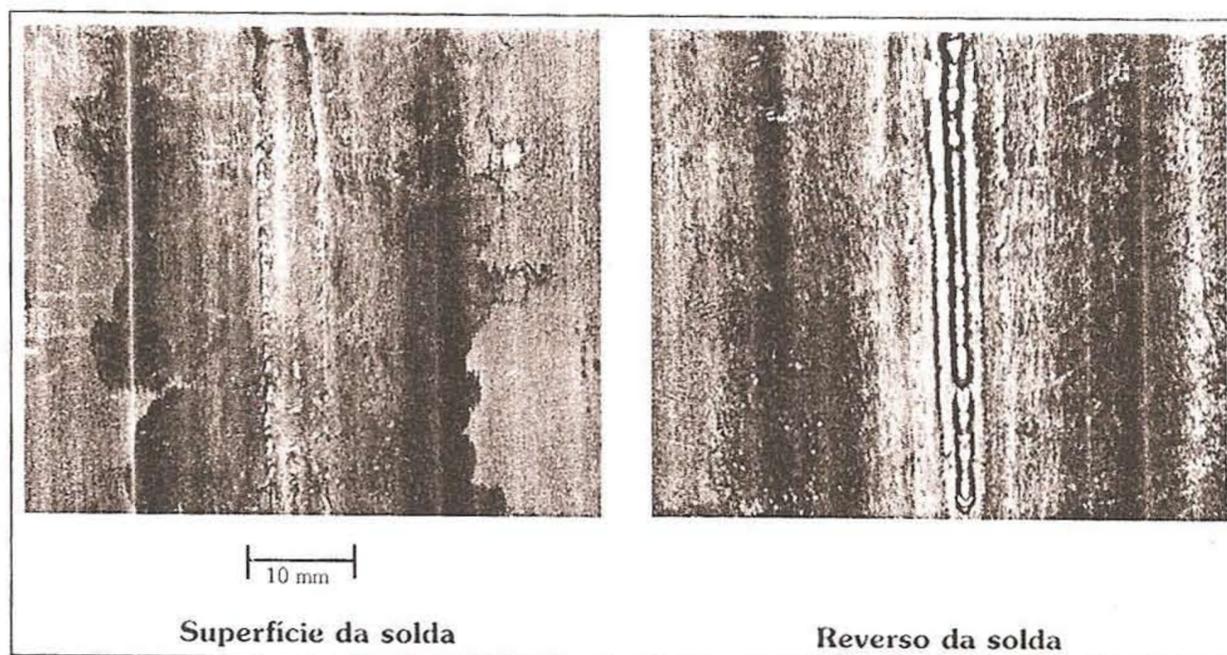
• *Influência da vazão do gás de plasma*

Para esta análise adoptou-se como material de base o aço 1020 de 4,8 mm de espessura e a condição de soldagem descrita na tabela 1 (ver acima). As vazões empregadas foram



↑ Figura 1 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: Argônio a 0,8 l/min.

de 0,8; 1,2; 1,7 e 2,2 l/min. Constatou-se neste estudo que a vazão do gás de plasma tem uma forte influência no comportamento da poça de fusão, na aparência da solda e principalmente sobre o reforço na raiz. Isto pode ser facilmente verificado comparando-se as características das soldas apresentadas nas figuras 1 e 2. Para uma vazão de 0,8 l/min observa-se que embora tenha ocorrido o *keyhole*, o reforço na raiz não se apresentou efetivamente uniforme e regular. Percebe-se que em alguns pontos houve uma tendência à não ocorrência de penetração total, o que proporcionou uma raiz de aspecto irregular. Já a solda mostrada na figura 2, onde se utilizou uma vazão de 1,2 l/min, apresenta um reforço na raiz bem mais homogêneo [18]. Para as vazões superiores utilizadas nesta análise, obteve-se um excessivo reforço na raiz, ocasionado provavelmente pela maior força do jacto de plasma, que se mostrou directamente proporcional ao aumento da vazão do gás. Nestes casos, as soldas realizadas não atenderam aos critérios de aceitação adoptados, pois em alguns pontos ao longo da raiz o reforço apresentou-se com dimensões acima das permitidas pelas normas. Importante observar que os experimentos confirmam a afirmação de Bennett [19], que afirma que pequenas variações na vazão do gás de plasma causam significantes alterações na solda. Para se conseguir uma solda de bom aspecto e qualidade basta adequar a vazão a uma velocidade de soldagem e corrente compatíveis com a mesma.



↑ Figura 2 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: Argônio a 1,2 l/min.



Óder Silva de Paula Júnior
Mestre em Engenharia Mecânica, área: fabricação, especialidade: Soldagem (Univ. Federal de Santa Catarina)
Engenheiro Industrial Mecânico (Instituto Católico de Minas Gerais)

Publicações:

"Uma contribuição para a comparação entre o processo MIG/MAG convencional e pulsado" – X Congresso Latino Americano de soldagem e XXII Congresso Nacional de Tecnologia da Soldagem – ABS – 29 Julho a 2 de Agosto de 1996, Blumenau SC, Brasil;

"Modelo para revisão da geometria do cordão em soldagem TIG com corrente pulsada" – X Congresso Latino Americano de soldagem e XXII Congresso Nacional de Tecnologia da Soldagem –

ABS – 29 Julho a 2 de Agosto de 1996, Blumenau SC, Brasil;

"Contribuição para o desenvolvimento e aplicação da soldagem plasma pela técnica *keyhole*" – Revista IPESI – Eletro Eletrônica.

Fiat Allis, Depto de Engenharia de Manufatura

Tel: 55 31 329-3111

Fax: 55 31 329-3186

Email: opaula@newholland.com



Jair Carlos Dutra

Doutorado em Automatização de Processos de Soldagem (UFSC e Univ. Técnica de aachen - 1989)

Mestre em Engenharia Mecânica, Processos de Soldagem (UFSC – 1976)

Engenheiro Mecânico (UFSC – 1972)

Publicações:

"Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico" – 1979

Protótipos desenvolvidos:

Central de Soldagem multiprocesso

Máquina de soldagem microplasma

Instrumentação de aquisição de dados

Instrumentação de comando e controle

Fonte de soldagem microprocessada e sinérgica

Sistema de seguimento de junta (automatização da soldagem pelo uso de sensores)

Projectos de Vulto:

Pesquisa de soldagem subaquática para a PETROBRÁS

Desenvolvimento e aplicação de procedimentos de soldagem de revestimento de pás de turbina para a ELECTROSUL

Desenvolvimento de fontes de soldagem microprocessadas

Desenvolvimento de sistemas automáticos de soldagem

Universidade Federal de Santa Catarina

LABSOLDA/UFSC

Fax: 55 48 234-6516

Email: labsolda@emc.ufsc.br

(Continua no próximo número)