

EFEITO DAS VARIÁVEIS PRIMÁRIAS E MODELAGEM DA GEOMETRIA DE CORDÃO NA SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL 304L USANDO O PROCESSO A PLASMA COM A TÉCNICA “KEYHOLE”

André Richetti

Valtair Antonio Ferraresi

Universidade Federal de Uberlândia UFU/FEMEC
Campus Santa Mônica, Caixa Postal 593
38.400-902 – Uberlândia, MG
e-mail: valtairf@mecanica.ufu.br

Resumo: *O processo de soldagem a plasma, a despeito dos custos e das dificuldades operacionais, vem sendo cada vez mais utilizado na indústria como processo primário de fabricação, principalmente em países desenvolvidos. A elevada concentração de energia produzida pela constrição física do arco permite a operação do processo também com a técnica “keyhole”, onde o arco atravessa toda a espessura da peça, produzindo um pequeno orifício no ponto de incidência. A alta produtividade e a garantia de penetração total na junta fazem do processo com “keyhole” uma alternativa viável em relação a outros processos convencionais de soldagem. Este processo tem sido aplicado com bastante sucesso na soldagem longitudinal e circunferencial de materiais nobres, particularmente nos aços inoxidáveis. Neste trabalho, o objetivo é analisar a influência das principais variáveis do processo sobre a geometria de cordão na soldagem do aço inoxidável 304L e obter expressões empíricas que permitam prever a geometria final da solda sob determinadas condições de soldagem. As variáveis de estudo foram a corrente, a velocidade de soldagem, a vazão do gás de plasma, o diâmetro do orifício constritor, a espessura da chapa e a velocidade de alimentação de arame (metal de adição). As expressões obtidas permitem um bom entendimento dos efeitos envolvidos e a previsão com relativa segurança da geometria final de cordão dentro das faixas de trabalho. A interpretação dos resultados permite também a detecção de condições extremas, tais como o corte da junta ou penetração incompleta.*

Palavras chave: soldagem a plasma com “keyhole”, variáveis primárias, modelagem matemática.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem a plasma com “keyhole”, apesar de apresentar custos operacionais relativamente altos, tem recebido uma aceitação significativa nos últimos anos para aplicações automatizadas, as quais envolvem qualidade, produtividade e garantia de penetração total na junta. Este efeito também foi influenciado pela necessidade da melhoria contínua da qualidade e da produtividade dos meios de fabricação em função da concorrência gerada a partir da globalização dos mercados.

Entretanto, existe ainda uma certa dificuldade em relação ao ajuste dos parâmetros de soldagem, os quais são normalmente baseados na experiência prática dos soldadores ou nas recomendações dos fabricantes de equipamentos. Estas condições, contudo, estão fora das condições ótimas de soldagem, causando prejuízos tanto para a qualidade das soldas como para a produtividade do processo. A otimização de processos tem sido conseguida através do desenvolvimento de modelos matemáticos, os quais permitem a previsão do comportamento do processo sob determinadas condições de soldagem.

Desta forma, o objetivo é analisar a influência das principais variáveis do processo sobre a geometria de cordão na soldagem do aço inoxidável AISI 304L e obter expressões empíricas que permitam prever a geometria final da solda sob determinadas condições de soldagem. As variáveis de estudo foram a corrente, a velocidade de soldagem, a vazão do gás de plasma, o diâmetro do orifício constritor, a espessura da chapa e a velocidade de alimentação de arame (metal de adição). As expressões obtidas permitem um bom entendimento dos efeitos envolvidos e a previsão com relativa segurança da geometria final de cordão dentro das faixas de trabalho.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizadas uma fonte digital em corrente constante (eletrodo negativo) e uma tocha de soldagem com capacidade de 300 A, sendo o seu movimento controlado através de uma mesa de coordenadas. As variáveis de estudo foram: corrente (I), vazão de gás de plasma (V_{gpl}), velocidade de soldagem (V_s), diâmetro do orifício constritor (ϕ_b), espessura da peça (Esp) e taxa de adição de arame na solda (Tx_{ad}). Os testes experimentais foram realizados variando-se uma variável de cada vez, mantendo todas as demais constantes, conforme indicado abaixo:

- Gás de plasma: Ar;
- Gás de proteção: Ar 5% O₂ (10 l/min);
- Gás de purga: Ar (5 l/min);
- Eletrodo: EWTh-2, diâmetro de 5 mm;
- Metal de base: aço AISI 304L;
- Ângulo de ponta do eletrodo: 65°;
- Distância tocha peça: 5 mm;
- Recuo do eletrodo na tocha: 2,4 mm;
- Junta de topo sem abertura.

A vazão do gás de plasma foi controlada no meio da linha por um equipamento de controle e medição de vazão entre 0,3 e 3 l/min, sendo que a calibração foi feita considerando a vazão na saída da tocha, medida por um dispositivo do tipo bolhímetro digital. O tempo de retardo no acionamento do movimento da tocha em relação à abertura do arco foi de 500 ms para permitir a formação inicial do “keyhole”. As respostas propostas para a geometria de cordão foram: reforço da raiz (RR), largura da raiz (LR), reforço da face (RF), largura da face (LF) e área fundida (AF), conforme mostrado esquematicamente na Figura 1.

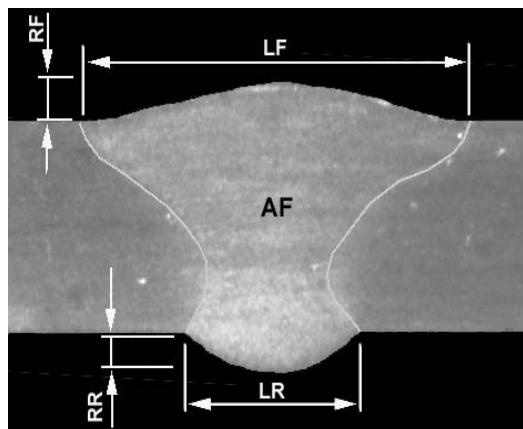


Figura 1. Perfil de cordão e respostas propostas para a geometria de cordão.

Inicialmente, foi feito um estudo considerando a corrente, velocidade de soldagem, vazão de gás de plasma e diâmetro do orifício de constrição, sendo os testes feitos sem metal de adição em chapas de 3,8 mm de espessura. A metodologia utilizada para a obtenção das equações das respostas foi baseada no trabalho de Murphy (1950) e de Richetti et al. (2002), através da combinação das equações componentes do efeito isolado de cada variável de estudo. Por exemplo, variando-se a corrente enquanto todas as outras variáveis são mantidas constantes, obtém-se a

equação componente da corrente ($resposta=f(I)$) e assim sucessivamente. A natureza das equações componentes define a forma de combinação: por soma ($F(f(I)+f(Vgpl)+f(Vs)+f(\phi b))$), por multiplicação ($F(f(I)*f(Vgpl)*f(Vs)*(b))$), ou ainda alternando os dois tipos de combinação. Foi utilizado um programa estatístico para gerar, para cada uma das variáveis de estudo, as equações componentes, as quais foram selecionadas considerando a facilidade de combinação e o seu coeficiente de correlação (R2). O valor mínimo aceito para o coeficiente de correlação foi de 0,90, garantindo sempre um bom ajuste da curva de tendência com os dados experimentais).

Na segunda parte deste trabalho, foi proposta uma metodologia para adicionar aos modelos já obtidos os efeitos da espessura de chapa (Esp) e da taxa de adição de arame na poça de fusão (Tx_ad) sobre a geometria de cordão. Este procedimento visa ampliar a gama de aplicações para as quais os modelos obtidos são válidos.

3. RESULTADOS

As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram os resultados experimentais obtidos para o efeito das variáveis de estudo (I , $Vgpl$, Vs e ϕb) sobre a geometria de cordão (RR, LR, LF e AF). Para obter o efeito isolado de cada uma das variáveis de estudo, os testes foram realizados variando-se uma variável de cada vez, sendo que a condição de referência foi: I : 190 A, $Vgpl$: 1,6 l/min, Vs : 40 cm/min, ϕb : 2,8 mm, Esp: 3,8 mm e sem metal de adição. As demais variáveis foram as mesmas apresentadas no item 2. Como não foi feito o uso do metal de adição, o reforço da face (RF) foi considerado como 0.

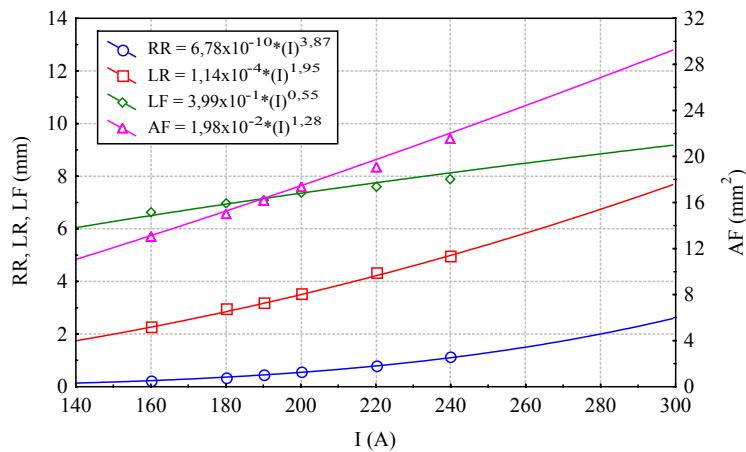


Figura 2 – Efeito da corrente sobre a geometria de cordão

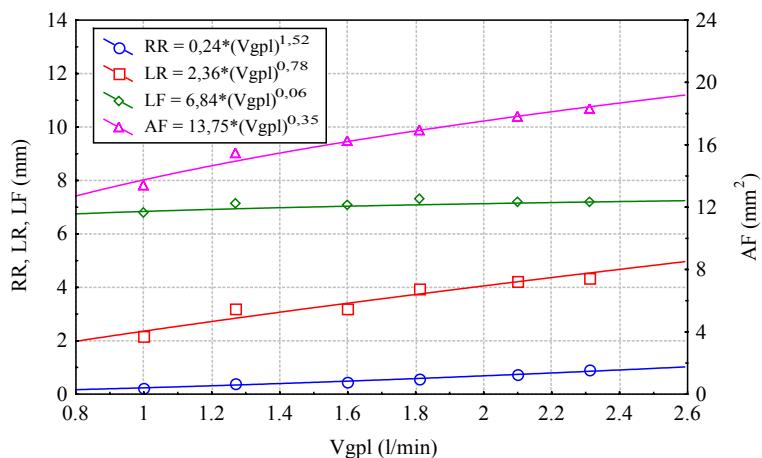


Figura 3 – Efeito da vazão do gás de plasma sobre a geometria do cordão

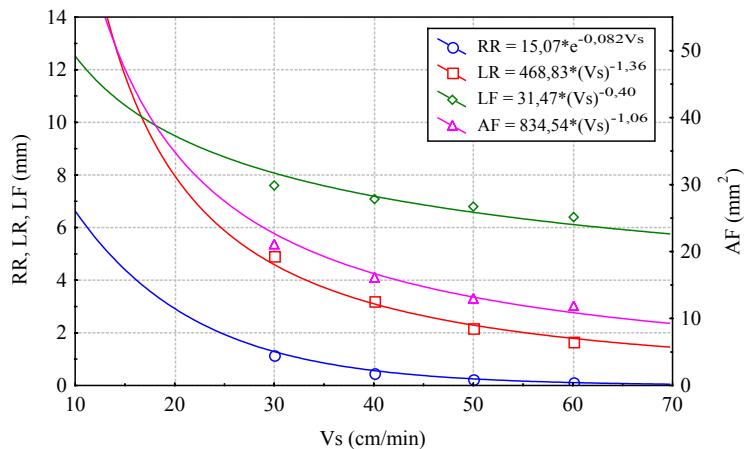


Figura 4 – Efeito da velocidade de soldagem sobre a geometria do cordão

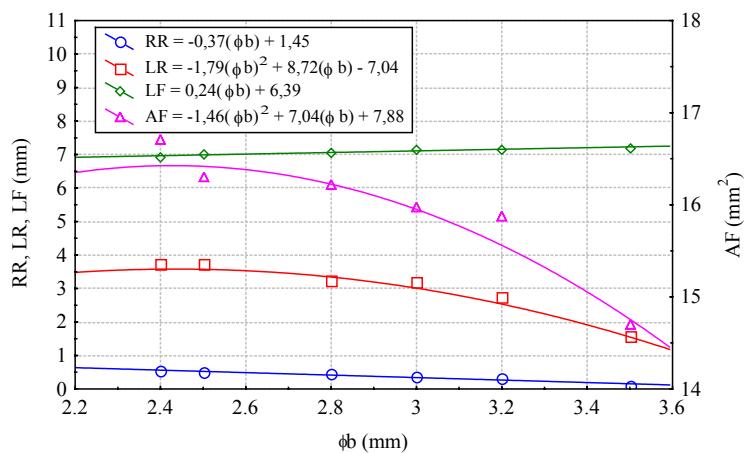


Figura 5 – Efeito do diâmetro do orifício constritor sobre a geometria do cordão

A corrente de soldagem tendeu a afetar proporcionalmente todas as respostas, principalmente pelo aumento resultante na temperatura e na pressão do arco (AWS, 1991). A vazão do gás também afetou proporcionalmente todas as respostas em função do aumento da pressão do arco, permitindo aumentar a penetração e fundir uma maior quantidade de metal (Martikainem e Moisio, 1993). Contudo, a largura da face permaneceu praticamente constante com a variação da vazão de gás de plasma. A velocidade de soldagem foi inversamente proporcional a todas as respostas propostas devido à redução na taxa de transferência de calor por unidade de comprimento de solda, causando uma redução no volume da poça de fusão (Martikainem e Moisio, 1993). O aumento do orifício constritor tendeu a reduzir as respostas RR, LR e AF e aumentar ligeiramente LF, a qual se manteve praticamente constante. Este efeito se deve à redução da constrição física do arco (AWS, 1991).

Utilizando a metodologia apresentada em Murphy (1950), a primeira etapa é a combinação por multiplicação das equações de I , V_{gpl} e V_s . Posteriormente, a equação resultante desta combinação foi combinada por soma com as equações do diâmetro do orifício de constrição. Desta forma, os resultados finais da combinação das equações componentes apresentadas nas Figuras 2, 3, 4 e 5 são as Equações 1 a 4, sendo as unidades definidas como: RR, LR, LF e ϕ_b (mm), AF (mm^2), I (A), V_{gpl} (l/min) e V_s (cm/min). Estas equações são válidas dentro das faixas de trabalho: I (160 – 280 A), V_{gpl} (1,0 a 2,3 l/min), V_s (15 a 60 cm/min) e ϕ_b (2,4 a 3,5 mm).

$$RR = 9,81 \times 10^{-9} * (I)^{3,87} * (Vgpl)^{1,52} * e^{-0,082Vs} - 0,37(\phi b) + 0,99 \quad (1);$$

$$LR = 1,21 \times 10^{-2} * (I)^{1,95} * (Vgpl)^{0,78} (Vs)^{-1,36} - 1,79 * (\phi b)^2 + 8,72 * (\phi b) - 10,37 \quad (2);$$

$$LF = 1,75 * (I)^{0,55} * (Vs)^{-0,4} \quad (3);$$

$$AF = 8,42 \times 10^{-1} * (I)^{1,28} * (Vgpl)^{0,35} (Vs)^{-1,06} - 1,46 * (\phi b)^2 + 7,04 * (\phi b) - 8,4 \quad (4).$$

Para acrescentar o efeito da espessura de chapa, uma série de testes foi feita utilizando chapas com espessuras variando de 3,4 a 6,7 mm. As condições utilizadas e as respectivas respostas medidas experimentalmente e preditas através das Equações 1 a 4 são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1- Condições de soldagem e respostas medidas e preditas para o efeito da espessura de chapa.

Condição de soldagem					Resposta medida				Resposta predita (Eqs 1 a 4)			
I	Vgpl	Vs	ϕb	Esp	RR	LR	LF	AF	RR	LR	LF	AF
220	1,6	15	2,8	6,1	2,17	5,21	10,85	50,28	6,76	16,24	11,51	55,89
220	1,6	20	2,8	6,1	1,41	2,95	10,15	36,25	4,47	10,99	10,26	41,17
240	2,1	30	2,8	6,1	1,17	3,04	8,95	30,52	4,17	9,27	9,15	32,90
240	1,81	35	2,8	6,1	0,74	2,37	8,57	26,25	2,18	6,70	8,60	26,50
225	1,6	30	2,8	6,1	0,64	2,25	8,34	25,13	2,12	6,62	8,83	27,52
250	1,6	40	3,2	4,3	0,65	3,33	8,56	23,36	1,24	4,69	8,34	22,51
270	1,6	40	3,2	4,3	1,21	4,7	8,75	25,8	1,74	5,58	8,70	24,92
280	1,6	40	3,2	4,3	1,3	4,9	8,97	26,39	2,03	6,05	8,87	26,15
190	1,6	40	2,8	4,3	0,28	1,96	7,03	15,68	0,45	3,22	7,17	16,29
210	1,81	35	2,8	4,3	0,83	3,9	8,01	22,16	1,28	5,17	7,99	22,32
225	1,6	30	2,8	4,3	1,57	5,67	8,42	27,39	2,12	6,62	8,83	27,52
240	1,81	30	2,8	6,7	0,7	2,43	8,91	30,08	3,31	8,26	9,15	31,23
190	1,6	40	2,8	3,4	0,55	3,64	7,11	16,21	0,45	3,22	7,17	16,29
200	1,6	40	2,8	4,3	0,42	2,5	7,56	18,35	0,56	3,56	7,38	17,40
230	2,31	30	2,8	6,7	0,86	2,72	8,83	30,26	4,08	9,19	8,94	32,21
240	2,31	35	2,8	6,1	0,83	2,76	8,75	28,3	3,19	8,10	8,60	28,87
235	1,81	30	2,8	6,1	1,16	2,7	9,02	28,47	3,05	7,93	9,04	30,39

Pode-se verificar que a largura da face e a área fundida sofreram pouca influência da variação da espessura de chapa, sendo os valores preditos próximos dos valores medidos. Por outro lado, o reforço e a largura da raiz medidos foram substancialmente diferentes dos valores preditos em função do aumento da dificuldade de obtenção do “keyhole” com o aumento da espessura de chapa. Neste trabalho, foi proposto obter fatores de correção da espessura de chapa para RR e LR dada pelas Equações 1 e 2. Estes fatores de correção foram obtidos subtraindo dos valores medidos os respectivos valores preditos (Tabela 1). Desta forma, as Figuras 6 e 7 mostram os fatores obtidos para cada uma das espessuras testadas e as respectivas curvas de ajustes considerando a espessura de chapa e as próprias respostas preditas pelas Equações 1 e 2. Para facilitar a visualização dos resultados, os fatores de correção para os testes feitos em chapas de 3,8 mm (testes das Figuras 2, 3, 4 e 5) também são apresentados (em preto). Obviamente, como estes testes são os que deram origem aos modelos das Equações 1 a 4, os fatores de correção (diferença entre os valores medidos e preditos) são próximos de zero, sendo a curva de ajuste Fator = 0.

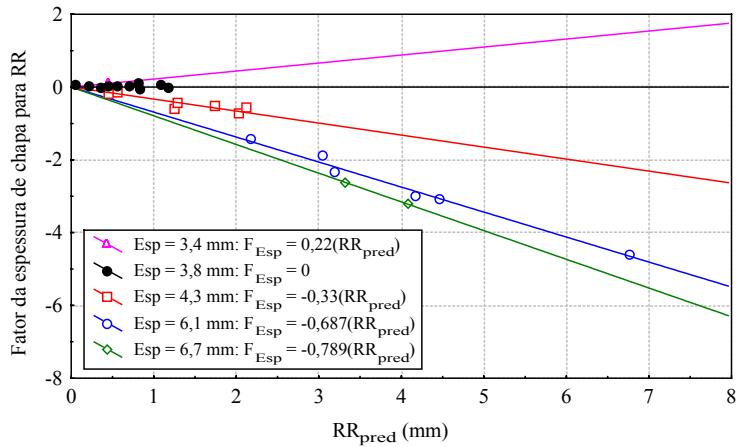


Figura 6 - Fatores de correção da espessura de chapa para o reforço da raiz da solda.

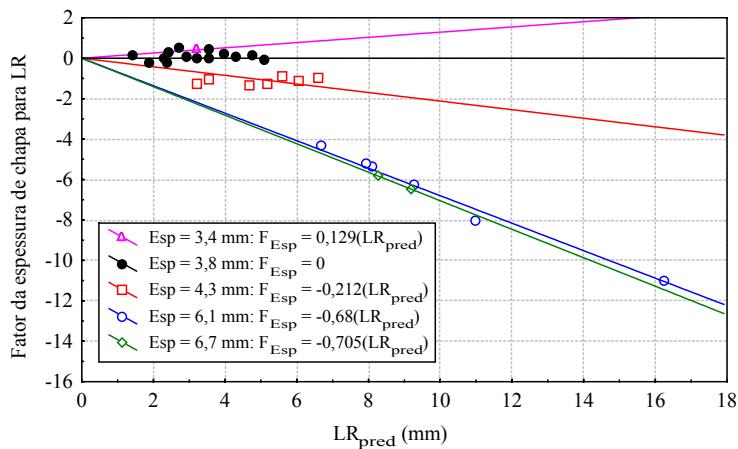


Figura 7 - Fatores de correção da espessura de chapa para a largura da raiz da solda.

Conforme pode ser visto nas Figuras 6 e 7, existe a tendência dos fatores de correção se disporem em retas que passam pela origem, diferindo apenas pela inclinação que é dependente da espessura de chapa. Obtendo-se uma expressão para a inclinação, tem-se então as Equações 5 e 6, que são os fatores de correção para RR e LR considerando a espessura de chapa e as respostas preditas nas Equações 1 e 2. Somando-se as respostas preditas nas Equações 1 e 2 com os fatores das Equações 5 e 6, tem-se a resposta corrigida de RR e LR quando a espessura de chapa for diferente de 3,8 mm.

$$F_{Esp_RR} = (-1,43 * \ln(Esp) + 1,9) * RR_{pred_equação1} \quad (5);$$

$$F_{Esp_LR} = (-1,29 * \ln(Esp) + 1,7) * LR_{pred_equação2} \quad (6).$$

Para adicionar o efeito da adição de metal na solda, os testes da Tabela 2 foram realizados. Os valores de Tx_{ad} (cm^3/min) foram obtidos através da expressão: $Tx_{ad} = 0,785 * Va * \phi a^2$, sendo Va (cm/min) a velocidade de alimentação e ϕa (cm) o diâmetro do arame. Este procedimento foi utilizado para tornar a análise independente do diâmetro de arame utilizado. Nos testes onde houve falta de penetração total (ausência de “keyhole”), só foi possível medir o reforço negativo da raiz. Desta forma, os valores de LR (em negrito) foram calculados através da relação experimental entre RR e LR obtida nos outros testes da Tabela 2, $LR=2,713(RR)+1,644$. Do mesmo modo, onde

ocorreu o corte da junta e só foi possível a medição de LR e LF, os valores de RR e AF (em itálico) foram obtidos de forma semelhante, sendo $AF=4,868(RR)+17,399$.

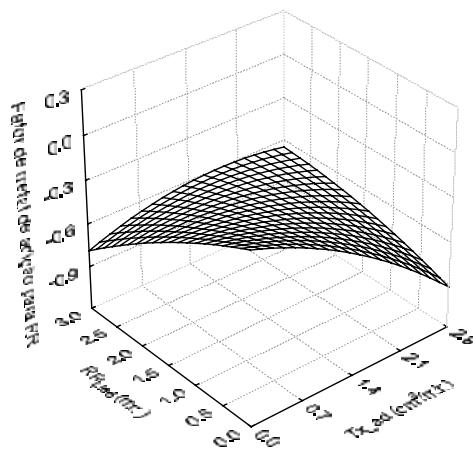
Tabela 2- condições e respostas medidas e preditas para o efeito da taxa de adição de arame (Tx_ad).

Condição de soldagem*				Resposta medida					Resposta predita (Eqs 1 a 4)			
I	Vgpl	Vs	Tx_ad	RR	LR	LF	AF	RF	RR	LR	LF	AF
190	1,27	30	0,9	0,35	2,92	8,45	21,18	0,71	0,75	3,98	8,04	20,41
190	1,81	45	1,81	0,18	1,97	7,26	15,99	0,9	0,35	3,03	6,84	15,00
190	2,31	60	2,71	-0,56	0,12	6,91	14,09	1,07	0,12	2,48	6,10	12,01
210	1,27	45	2,71	-0,84	-0,63	6,87	16,39	1,45	0,30	2,79	7,23	15,06
210	1,81	60	0,9	-0,24	0,99	7,36	13,77	0,61	0,13	2,49	6,44	12,55
210	2,31	30	1,81	2,28	7,84	8,9	28,50	0	2,86	7,70	8,50	28,66
230	1,27	60	1,81	-0,45	0,42	7,15	14,07	0,97	0,10	2,26	6,77	12,45
230	1,81	30	2,71	2,14	7,45	8,8	27,82	0	2,80	7,60	8,94	29,57
230	2,31	45	0,9	0,82	3,89	8,2	21,22	0,55	1,16	5,30	7,60	20,91
190	1,6	35	0,68	0,42	2,62	7,81	19,26	0,78	0,70	3,86	7,56	18,78
230	1,6	40	1,13	0,61	3,14	8,2	22,32	0,95	0,99	4,67	7,96	20,83
230	1,6	40	2,26	0,46	2,7	8,1	22,77	1,35	0,99	4,67	7,96	20,83
190	1,6	40	0	0,46	3,22	7,07	16,22	0	0,45	3,22	7,17	16,29

* Esp: 3,8 mm; ϕb : 2,8 mm; ϕa : 1,2 mm.

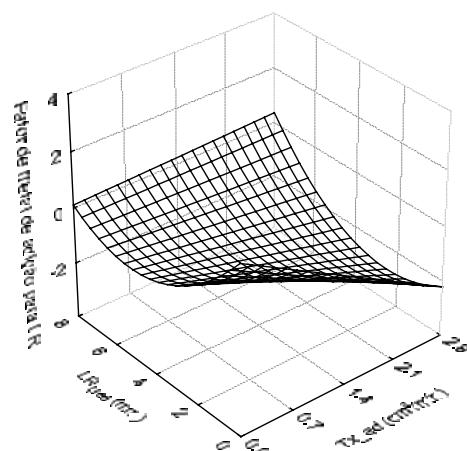
As Figuras 8, 9, 10 e 11 mostram os fatores de correção de Tx_ad para as respostas RR, LR, AF e o efeito de Tx_ad sobre a resposta RF. O fator de correção para LF não foi obtido porque Tx_ad não afetou consideravelmente esta resposta. Na análise para o reforço da face, foram também considerados os testes das Figuras 2, 3 , 4 e 5, sem metal de adição, para direcionar a tendência de $RF = 0$ quando não for utilizado o metal de adição. Toda a análise foi feita considerando a taxa de adição de arame e as respostas preditas. No caso de RF, cuja expressão está mostrada na Figura 4, foi proposto fazer a análise considerando a dimensão da raiz da solda, representada pelo produto $RR_{pred} * LR_{pred}$. Este parâmetro foi proposto porque quanto maior forem as dimensões da raiz da solda, menor tende a ser o reforço da face.

As expressões apresentadas nas Figuras 8, 9, 10 e 11 são válidas dentro da faixa de 0 a 2,8 cm^3/min ($0 \leq Va \leq 2,4 m/min$, considerando $\phi a = 1,2 mm$) e devem ser utilizadas quando houver o uso de metal de adição. Os valores das respostas preditas a serem utilizados nestas expressões são os valores calculados com as Equações 1 a 4, acrescidas do fator da espessura caso os testes sejam realizados em espessuras diferentes de 3,8 mm (Equações 5 e 6). Testes experimentais (não apresentados) indicam uma boa consistência dos modelos na predição da geometria de cordão na soldagem a plasma com “keyhole” do aço AISI 304L dentro das faixas de trabalho.



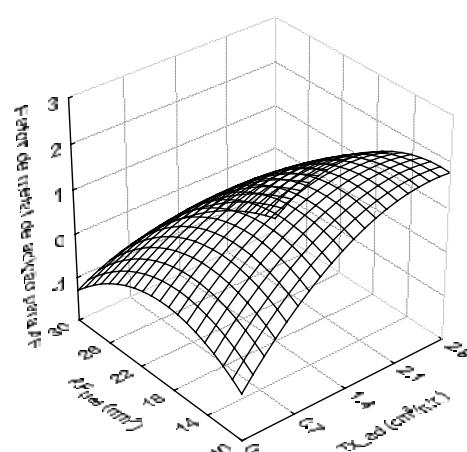
$$F_{Tx_ad} = -0,019 - 0,17(Tx_ad) - 0,185(RR_{pred}) - 0,054(Tx_ad)^2 + 0,123(Tx_ad)(RR_{pred}) - 0,024(RR_{pred})^2$$

Figura 8 - Fatores de correção de Tx_ad para RR



$$F_{Tx_ad} = 2,074 - 1,534(Tx_ad) - 1,089(LR_{pred}) + 0,003(Tx_ad)^2 + 0,203(Tx_ad)(LR_{pred}) + 0,105(LR_{pred})^2$$

Figura 9 - Fatores de correção de Tx_ad para LR



$$F_{Tx_ad} = -3,612 + 2,672(Tx_ad) + 0,363(AF_{pred}) - 0,411(Tx_ad)^2 - 0,055(Tx_ad)(AF_{pred}) - 0,01(AF_{pred})^2$$

Figura 10 - Fatores de correção de Tx_ad para AF

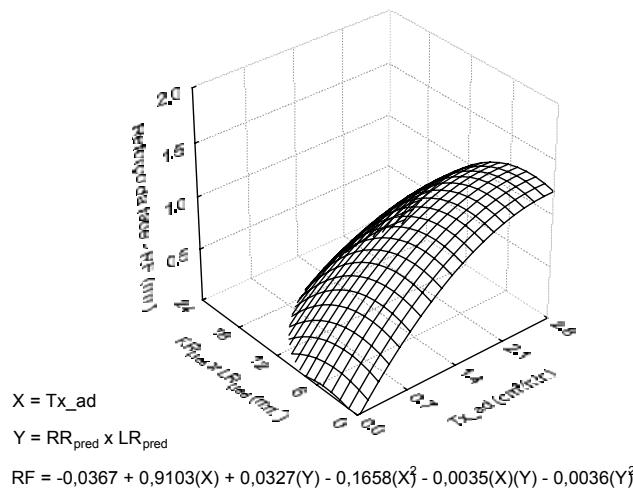


Figura 11 - Efeito de Tx_{ad} sobre RF

Para chapas de 3,4 a 4,3 mm de espessura, soldas com “keyhole” são obtidas quando RR for entre 0,1 e 1,5 mm e LR entre 2 e 5 mm. Contudo, a medida que se aumenta a espessura de chapa, esta faixa é deslocada para valores maiores, 0,5 a 2 mm para RR e 2 a 5,5 mm para LR. Valores abaixo destas faixas causam penetração incompleta e valores acima causam o corte da junta.

4. CONCLUSÕES

- 1- A metodologia utilizada apresentou resultados satisfatórios para a obtenção de modelos matemáticos para a geometria de cordão considerando as variáveis I, Vgpl, Vs, ϕ_b , Esp e Tx_{ad} .
- 2- A corrente e a vazão de gás de plasma foram proporcionais a todas as respostas propostas, porém LF não foi influenciada de forma significativa pela vazão de gás de plasma. A velocidade de soldagem foi inversamente proporcional a todas as respostas. O diâmetro do orifício constrictor foi inversamente proporcional a RR, LR e AF. A resposta LF não foi afetada de forma considerável pela vazão de gás de plasma e pelo diâmetro do orifício constrictor.
- 3- O reforço da face foi suposto existir somente com o uso de metal de adição e, dentro deste aspecto, foi obtida também uma expressão para RF considerando a taxa de adição de arame e as dimensões da raiz da solda ($RR_{pred} * LR_{pred}$).

5. AGRADECIMENTO

Os autores deste trabalho agradecem o LAPROSOLDA/UFU pelo apoio laboratorial, a CAPES pela bolsa de pesquisa e a ACESITA pela doação de material.

6. REFERÊNCIAS

AWS, 1991, “Plasma arc Welding”, Welding Handbook, 8th ed., Vol. 2, pp. 329 - 350.

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, Vol. 72, Nr. 7, July 1993, pp. 239s - 339s.

Murphy G., 1950, “Similitude in Engineering”, The Ronald Press Company, 199 p.

Richetti A., Oliveira, S. A. G., Ferraresi V. A., 2002, “Modeling the Weld Bead Geometry for Keyhole Plasma Welding of AISI 304L Stainless Steel”, CONEM 2002, II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 12 - 16 de Agosto.

EFFECT OF THE VARIABLES PRIMARY AND WELDING BEAD GEOMETRY MODELING OF STAINLESS STEEL AISI 304 L USING PLASMA PROCESS WITH KEYHOLE TECHNIQUE

André Richetti

Valtair Antonio Ferraresi

Universidade Federal de Uberlândia UFU/FEMEC

Campus Santa Mônica, Caixa Postal 593

38.400-902 – Uberlândia, MG

e-mail: valtairf@mecanica.ufu.br

Abstract: The keyhole plasma process has been considered as an alternative to other conventional welding processes for automated applications. It has simulated scientific researches, which intend a better understanding of the physical phenomena involved in the process. Nowadays, there is a huge number of technical and scientific work available in the current literature, but there are some effects, which have still not been studied fully or present divergent information. For a better understanding of this process, a verification of the effect of the primary variables and an empirical modeling for the weld geometry in the welding of AISI 304L steel were developed. The models were obtained using current, welding speed, plasma gas flow rate, constriction nozzle, workpiece thickness and wire feed rate as process variables. The results indicate a good model consistence inside the operational ranges.

Key words: Plasma welding, keyhole, variables primary, empirical modeling.