

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM LIGA DE NÍQUEL APLICADO PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO UTILIZANDO PLANEJAMENTO FATORIAL¹

Valmir Rodrigues Batista²
Marcos Mesquita da Silva³
Theophilo Moura Maciel⁴
Raphael Henrique Falcão de Melo⁵

Resumo

Neste trabalho foi avaliada a influência das variáveis de soldagem em cordões de solda, aplicados pelo processo Arco Submerso visando futura aplicação em revestimentos metálicos contra corrosão. Segmentos de tubo de um aço API 5L Gr B foram utilizados como substrato e como consumíveis o arame de liga de níquel com classificação AWS ERNiCrMo-4 (Hastelloy C-276), diâmetro de 1,13 mm, e um fluxo do tipo neutro, básico e aglomerado (EN 760: SA AF 2 DC). Foram analisadas a influência das variáveis tensão, velocidade de alimentação de arame e distância do bico de contato à peça (DBCP) – com o restante dos parâmetros constantes – através de um planejamento fatorial completo em dois níveis e pontos centrais. Os resultados mostraram modelos matemáticos estatisticamente significativos e preditivos para as respostas diluição e corrente média, I_M . A DBCP, foi a variável que se constituiu como a de maior significância na redução da diluição.

Palavras-chave: Soldagem ao arco submerso; Soldagem de revestimento; Super liga de Ni; Planejamento Fatorial.

OPTIMIZATION OF THE OVERLAY WELDING PARAMETERS WITH NI-ALLOY APPLIED BY SUBMERGED ARC WELD PROCESS USING FACTORIAL DESIGN

Abstract

In this work was evaluated the influence of welding variables on weld beads applied by submerged arc welding process with conventional current, aiming future application in overlays against corrosion. Segments of steel API 5L Gr B pipe were used as substrate, and a nickel alloy, classification AWS ERNiCrMo-4 (Hastelloy C-276) 1.13 mm-diameter electrode wire, and a neutral basic flux (EN 760: SA AF 2 DC) as consumable. The influence of variables voltage, wire feed speed and contact tip to work distance (CTWD) were analyzed, with the remaining parameters constant by a Design of Experiments with full factorial design in two-level and central points. Statistically significant and predictors mathematical models for responses dilution and average current, was obtained. The CTWD was the most significant variable to reducing the dilution.

Key words: Submerged arc welding; Weld overlay; Nickel alloy; Factorial design.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. e Pós-graduando em Ciência e Eng. de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), PB, Brasil; valmir5@yahoo.com.br.

³ Eng. Mecânico, Prof. M.Sc., Petróleo e Gás, Instituto Federal da Paraíba; marcos.silva@ifpb.edu.br.

⁴ Eng. Mecânico, Prof. Dr., Depto. de Eng. Mecânica, UFCG, Brasil; theo@dem.ufcg.edu.br.

⁵ Eng. Pós-graduando em Eng. Mecânica. UFCG; raphael.engmec@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos principais processos de fabricação utilizado em diversos segmentos da indústria metal-mecânica tais como na construção de navios e serviços de caldeiraria em geral.⁽¹⁾ Esse processo vem sendo bastante usado na fabricação de plataformas *onshore* e *offshore*, navios petroleiros, tanques de armazenamento, vasos de pressão, reatores químicos, óleo/gasodutos etc.⁽²⁻⁴⁾ Uma aplicação bastante interessante da soldagem é a aplicação de revestimentos de ligas nobres em tubulações de aço, uma vez, que os aços – ligas que podem ter elevada resistência e baixo custo em relação às ligas nobres, podem ser usados na construção de dutos transportadores de petróleo, os quais se tornam resistentes a corrosão quando revestidos com ligas nobres como a liga de níquel Hastelloy C-276.⁽⁵⁻⁷⁾ Esses revestimentos geralmente são de aços inoxidáveis austeníticos ou superligas de níquel (Ni), com destaque para a liga Hastelloy C-276, uma liga Ni-Cr-Mo, pela sua elevada resistência à corrosão, podendo ser utilizada em temperaturas elevadas e também criogênicas.⁽⁸⁻¹⁰⁾

Os processos de soldagem empregados para a realização de revestimentos são diversos.^(11,12) Entre eles se destaca o processo ao Arco Submerso (SAW) por ser completamente automatizado e possuir uma elevada taxa de deposição.

Em revestimentos contra corrosão é fundamental que o mesmo tenha uma reduzida diluição, tanto para reduzir o teor de Fe na sua superfície como para evitar a formação de microestruturas frágeis susceptíveis à corrosão.⁽¹³⁾ Para isso podem ser empregadas técnicas ou procedimentos que reduzam a energia de soldagem proporcionando também menores distorções e penetração. Tais procedimentos incluem a alteração do tipo de corrente, a inversão da polaridade da corrente, ou a alteração do *stickout*, além das técnicas dos múltiplos arcos, adição de arame quente e a aplicação de revestimentos através de fitas.⁽¹⁴⁾

A Estatística que vem sendo cada vez mais utilizada em trabalhos científicos, substituindo a prática do empirismo, por possuir diversas técnicas que podem auxiliar na obtenção e análise de resultados satisfatórios. A metodologia do planejamento experimental, associada à análise de superfícies de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo.⁽¹⁵⁾ Essa técnica busca, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo.⁽¹⁶⁾ Várias vantagens podem ser citadas a respeito da utilização do Planejamento Experimental tais como a redução do número de experimentos, a análise simultânea dos fatores, a possibilidade de obter mais de uma resposta ao mesmo tempo e a possibilidade de se calcular e avaliar o erro experimental.⁽¹⁷⁾ Alguns autores já vêm utilizando essa técnica na área metalúrgica para otimizar parâmetros de soldagem.^(6,11,18)

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre a diluição e geometria de cordões de solda de ligas de níquel, aplicados pelo processo Arco Submerso em aço C-Mn, utilizando a técnica de Planejamento Experimental com Planejamento Fatorial completo em dois níveis, visando a futura aplicação de revestimentos metálicos contra corrosão em tubulações de aço do setor de petróleo e gás.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os metais de base utilizados foram segmentos de dutos do aço API 5L Gr B com

18 mm de espessura cuja composição química está apresentada na Tabela 1, enquanto que o metal de adição foi o arame AWS ERNiCrMo-4 com 1,13 mm de diâmetro, conhecido comercialmente como Hastelloy C-276 cuja composição química está apresentada na Tabela 2. O processo de soldagem utilizado foi ao Arco Submerso (SAW), com corrente convencional. Durante as soldagens foi utilizado um fluxo aglomerado, neutro e básico, apropriado para soldagens de aços inoxidáveis austeníticos e ligas de níquel.

Tabela 1. Composição química do duto API 5L Gr B⁽¹⁹⁾

	C	Mn	Si	P	S	Cr
API 5L GR B	0,19	0,70	0,24	0,018	0,018	0,064
	Mo	Ni				Fe
	0,008	0,07				Bal.

Tabela 2. Composição química do metal de adição AWS ER NiCrMo-4⁽²⁰⁾

	C	Mn	Si	P	S	Cr
AWS	0,009	0,540	0,050	0,005	0,001	15,3
ER NiCrMo - 4	Mo	Ni	Fe	Co	V	W
	15,30	58,20	6,120	0,030	0,270	3,820

O equipamento de soldagem utilizado foi uma fonte multiprocessada modelo DIGI Plus A7 800, marca IMC Soldagem. Antes da deposição do cordão de solda essas peças foram lixadas com escova de aço inoxidável e sua superfície limpa com acetona. A Figura 1 apresenta a imagem do cordão depositado. Os depósitos foram realizados na posição plana, com a técnica empurrando, com inclinação de 15° com a vertical, como mostra a Figura 1b que também ilustra a distância bico de contato (DBCP).

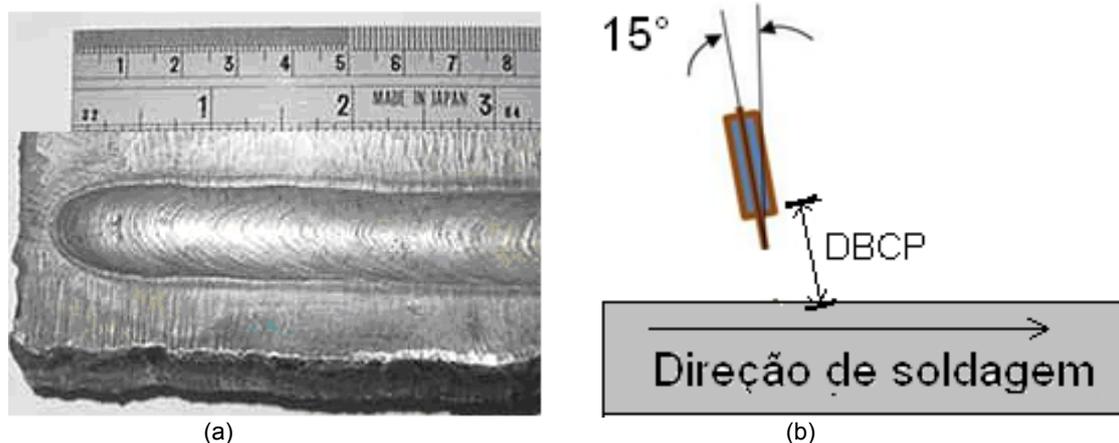


Figura 1. (a) Imagem do cordão de solda e (b) Técnica e procedimentos de soldagem.

Todas as soldagens foram realizadas no Laboratório de Soldagem (LABSOL) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Foram analisadas as características geométricas dos revestimentos a partir das seções transversais (Figura 2). Os níveis de diluição dos revestimentos foram calculados através das medições das áreas A1 e A2 (Figura 2) utilizando um *software* CAD. Assim, os níveis de diluição foram definidos conforme a Equação 1.

$$D(\%) = \frac{A1}{A1 + A2} \quad (1)$$

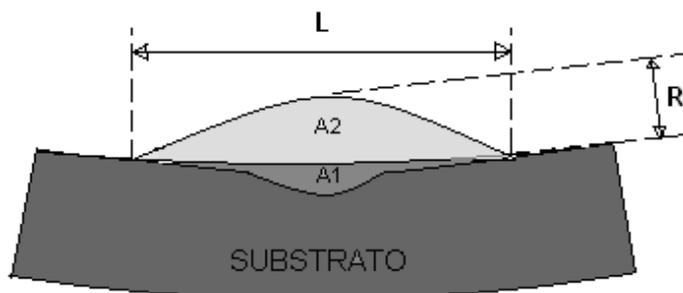


Figura 2. Esquema da seção transversal dos revestimentos.

Como metodologia de pesquisa utilizou-se o planejamento fatorial completo em dois níveis com três repetições do ponto central ($2^K + 3$) que resulta em 11 experimentos, onde K é o número de variáveis de entrada. Foram variados os valores de tensão de soldagem (U), velocidade de alimentação do arame (Va) e a distância bico de contato peça (DBCP). Os valores desses níveis se encontram na Tabela. 3.

Tabela 3. Níveis reais e codificados dos fatores em estudo

Variáveis de entrada	Níveis		
	-1	0	+1
U (volts)	30	35	40
Va (m/min)	6	6,5	7
DBCP (mm)	20	25	30

Na Tabela 4 são apresentados os onze experimentos originados do planejamento fatorial, realizados numa seqüência aleatória.

Tabela 4. Matriz de planejamento experimental $2^3 + 3$ pontos centrais

Experimento	Seqüência aleatória	U (volts)	Va(m/min)	DBCP (mm)
1	3	30 (-1)	6 (-1)	20 (-1)
2	10	40 (+1)	6 (-1)	20 (-1)
3	4	30 (-1)	7 (+1)	20 (-1)
4	6	40 (+1)	7 (+1)	20 (-1)
5	11	30 (-1)	6 (-1)	30 (+1)
6	9	40 (+1)	6 (-1)	30 (+1)
7	1	30 (-1)	7 (+1)	30 (+1)
8	7	40 (+1)	7 (+1)	30 (+1)
9	8	35 (0)	6,5 (0)	25 (0)
10	5	35 (0)	6,5 (0)	25 (0)
11	2	35 (0)	6,5 (0)	25 (0)

Foram mantidos fixos, a velocidade de soldagem ($V_s = 22$ cm/min) e a inclinação da tocha de soldagem ($\theta = 15^\circ$ com a vertical). Todos os experimentos foram feitos utilizando corrente convencional com polaridade reversa (CC+).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para depósito dos cordões de solda isolados, apresentando valores de diluição que variaram de 9,62% a 23,19%, e a relação reforço/largura do cordão (R/L) variando de 0,21 a 0,60 para valores de tensão (U) e corrente média (I_M) variando de 30 volts a 40 volts e 137,32 A a 186,19 A respectivamente. Pode-se também verificar que todos os cordões apresentaram reforços superiores a 3,4 mm.

O valor de diluição não pode ser muito elevado a fim de evitar presença de ferro no revestimento e não pode ser muito baixo, pois pode diminuir a resistência ao arrancamento. Não se tem registros em normas de valores mínimos ou máximos para diluição do metal de base no metal de solda, porém a norma ISO 10423⁽²¹⁾ sugere que o valor máximo para o teor de Fe seja de 10% e que a composição química seja medida a uma distância máxima de 3 mm do metal base. Sendo assim, valores de diluição próximos de 10% são considerados suficientes para aplicações contra a resistência à corrosão. Entretanto, o ideal é produzir um revestimento com menor diluição possível. Com relação à razão R/L, quanto menor for o seu valor mais largo e adequado será o cordão de solda, visto que assim será necessário menos passes para recobrir a área de interesse. O fato é que menores valores de R/L são alcançados para maiores larguras (L) do cordão e isto pode favorecer a relação custo benefício em aplicações como, soldagem de revestimento, onde a largura do cordão tem fundamental importância em relação aos demais parâmetros geométricos.⁽²²⁾ Quanto ao reforço do cordão, a PETROBRAS N -1707⁽²³⁾ recomenda um reforço líquido de 3 mm, por isso deve-se obter um reforço bruto um pouco acima desse valor, afim de permitir uma posterior usinagem que resulte neste valor estipulado para o reforço líquido. Neste aspecto pode-se verificar diretamente pela Tabela 5 que todos os cordões apresentaram este valor adequado.

Tabela 5. Matriz de planejamento e resultados obtidos

Experimento	U (volts)	Va (m/min)	DBCP (mm)	I_M (A)	U_M (v)	Diluição (%)	R (mm)	R/L (mm/mm)
1	30	6	20	160,38	30,32	17,94	3,91	0,31
2	40	6	20	163,22	43,23	21,86	3,44	0,23
3	30	7	20	175,83	30,34	22,59	3,99	0,31
4	40	7	20	186,19	41,12	23,19	3,64	0,21
5	30	6	30	137,32	30,38	14,43	3,97	0,35
6	40	6	30	138,07	42,17	13,43	4,03	0,31
7	30	7	30	142,83	30,77	9,62	4,9	0,60
8	40	7	30	158,37	40,91	11,18	3,9	0,28
9	35	6,5	25	163,82	35,56	15,42	3,7	0,26
10	35	6,5	25	162,33	35,64	13,63	3,55	0,23
11	35	6,5	25	160,66	35,43	13,20	3,8	0,25

Para a análise dos resultados foi utilizado um software estatístico adotando um nível de confiabilidade dos resultados de 95%. A Tabela 6 mostra os valores de P¹ para cada fator, considerando também as interações entre duas e três variáveis.

Os valores em negrito obedecem à relação $P \leq 0,05$ e denuncia os fatores que são estatisticamente significativos². Porém, nesse trabalho foram ignorados alguns dos efeitos que não são estatisticamente significativos nos modelos, dando origem a novos valores de P e dessa forma alguns efeitos que não eram estatisticamente significativos passaram também a ser, como por exemplo, o efeito da interação Va*DBCP no modelo de D e também U nos modelos de R/L e I_M. Optou-se por não ignorar alguns dos efeitos não estatisticamente significativos, pelo fato de que esses chegaram muito próximo de serem estatisticamente significativos (Tabela 6).

Tabela 6. Valor de P para os fatores e interações

Fatores	Valor de P					
	Para todos os efeitos			Ignorando alguns efeitos		
	D	R/L	I _M	D	R/L	I _M
Média	0,00010	0,00090	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
U	0,33533	0,11194	0,08185	0,17077	0,04129	0,02709
Va	0,92229	0,58888	0,01116	-	-	0,00109
DBCP	0,00796	0,09573	0,00245	0,00014	0,03169	0,00009
U * Va	0,92878	0,24036	0,14607	-	0,14109	0,06640
U * DBCP	0,66540	0,59568	0,80439	-	-	-
Va * DBCP	0,13382	0,45270	0,35030	0,03223	-	0,24301
U * Va * DBCP	0,28755	0,26642	0,56972	0,13019	0,16501	-
R ²	0,94062	0,84363	0,9782	0,93569	0,7678	0,97472
R ² ajustado	0,80205	0,47878	0,92732	0,89281	0,61301	0,94944
MS Residual	3,87127	0,00573	16,3490	2,09631	0,00425	11,3730

Os modelos matemáticos empíricos, codificados de 1^a ordem encontrados, com os seus respectivos parâmetros estatísticos, estão apresentados nas Equações 2, 3 e 4 onde os valores em negrito correspondem às parcelas estatisticamente significativas do modelo, ao nível de 95% de confiança.

$$D = \mathbf{16,37655} + 0,79639*U - \mathbf{4,40655*DBCP} - \mathbf{1,4203*Va*DBCP} + 0,897245*U*Va*DBCP \quad (2)$$

$$R/L = \mathbf{0,306030} - \mathbf{0,05968*U} + \mathbf{0,064261*DBCP} - 0,03907*U*Va - 0,03645*U*Va*DBCP \quad (3)$$

$$I_M = \mathbf{159,0022} + \mathbf{3,68685*U} + \mathbf{8,02885*Va} - \mathbf{13,6288*DBCP} + 2,7897*U*Va - 1,57785*Va*DBCP \quad (4)$$

Nas Tabelas 7 a 9 estão ilustrados os resultados das análises de variância para todas as respostas. Segundo Rodrigues e Lemma,⁽¹⁷⁾ através do teste do F, o modelo é estatisticamente significativo quando $F_{\text{Calculado}} > F_{\text{Tabelado}}$. Para que um

¹ P está relacionado ao nível de significância de uma determinada variável analisada em um modelo de regressão. Para que uma variável seja estatisticamente significativa em um modelo com 95% de confiabilidade, a relação $P \leq 0,05$ deve ser satisfeita.

² O termo "estatisticamente significativo" significa que as diferenças encontradas são grandes o suficiente para não serem atribuídas ao acaso.

modelo seja não apenas estatisticamente significativo, mas também útil para fins preditivos, $F_{\text{Calculado}}$ deve ser no mínimo quatro vezes maior que F_{Tabelado} .⁽²⁴⁾ Então, os modelos da diluição, D, com 94% das variações explicada pelo modelo e corrente média, I_M com 97% das variações explicada pelo modelo, além de estatisticamente significativos, são também preditivos com 95% de confiança.

Foi verificado também que nos dois modelos, D e I_M , não precisam de ajuste, pois $F_{\text{Calculado}} < F_{\text{Tabelado}}$. Neste caso a regra é oposta a anterior.⁽¹⁷⁾

Quanto ao modelo de R/L, foi constatado uma pequena falta de ajuste através do teste do F, o que já era de se esperar por apresentar um pequeno valor de R^2 . Os valores de F_{Tabelado} podem ser encontrados na Tabela 10, onde m é o grau de liberdade do numerador e n é o grau de liberdade do denominador.

Tabela 7. Análise de variância (ANOVA) para a resposta diluição, D

Fontes de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F_{\text{Calculado}}$	F_{Tabelado}
Regressão	182,99367	4	45,74842	21,82	4,53
Resíduo	12,5778	6	2,096305		
Falta de ajuste	11,8692	4	2,967311	8,38	19,25
Erro puro	0,7086	2	0,354295		
Total	195,5715	10	$R^2 = 0,93569$		

Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) para a resposta altura/largura, R/L

Fontes de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F_{\text{Calculado}}$	F_{Tabelado}
Regressão	0,0843686	4	0,021092	4,96	4,53
Resíduo	0,025514	6	0,004252		
Falta de ajuste	0,024970	4	0,006242	22,93	19,25
Erro puro	0,000545	2	0,000272		
Total	0,109883	10	$R^2 = 0,7678$		

Tabela 9. Análise de variância (ANOVA) para a resposta corrente média, I_M

Fontes de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F_{\text{Calculado}}$	F_{Tabelado}
Regressão	2192,559	5	438,5118	38,56	5,05
Resíduo	56,865	5	11,37304		
Falta de ajuste	51,871	3	17,29027	6,92	19,16
Erro puro	4,994	2	2,497179		
Total	2249,424	10	$R^2 = 0,97472$		

Tabela 10. Pontos de porcentagem da distribuição F, 5%⁽²⁵⁾

n	m																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,40	199,50	215,70	224,60	230,20	234,00	236,80	238,90	240,50	241,90	243,90	245,90	248,00	249,10	250,10	251,10	252,20	253,30	254,30
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,93	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,54	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,20	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,20	2,15	2,10	2,05	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,99	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,35	2,29	2,23	2,18	2,11	2,04	1,95	1,91	1,86	1,81	1,76	1,70	1,65
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,80	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,71	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

Com exceção de R/L, os modelos apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) bem próximos de 1, indicando assim, uma boa concordância entre os valores preditos e os valores experimentais para os modelos D e I_M .

Na Figura 3 a superfície mostra a interação da velocidade de alimentação, V_a e da distância bico de contato à peça, DBCP sobre a diluição, D, onde se observa menores valores de D, em torno de 11% para os valores mais elevados de DBCP, 30 mm, em toda a faixa de velocidade de alimentação, V_a , pois como será visto na Figura 4, a velocidade de alimentação tem pouca influência nos valores de corrente média, I_M , quando se utiliza elevados valores de DBCP e baixos valores de tensão, U.

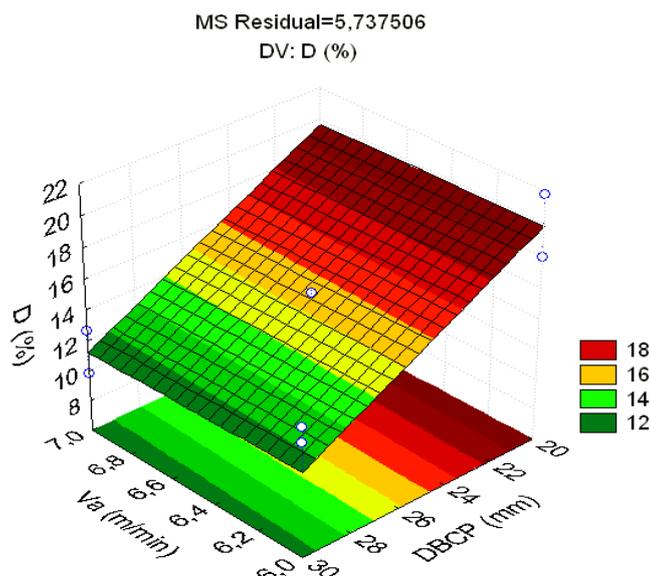


Figura 3.1 Influência da velocidade de alimentação e distância do bico de contato à peça na diluição, fixando a tensão em 30 volts.

Uma forma indireta de diminuir a corrente média de soldagem, I_M , utilizando corrente convencional, é aumentar a DBCP e diminuir a velocidade de alimentação, V_a , e/ou diminuir a tensão, U (Figura 4). Observa-se também que para valores inferiores de DBCP ou valores superiores de U , a velocidade de alimentação terá maior influência na corrente média.

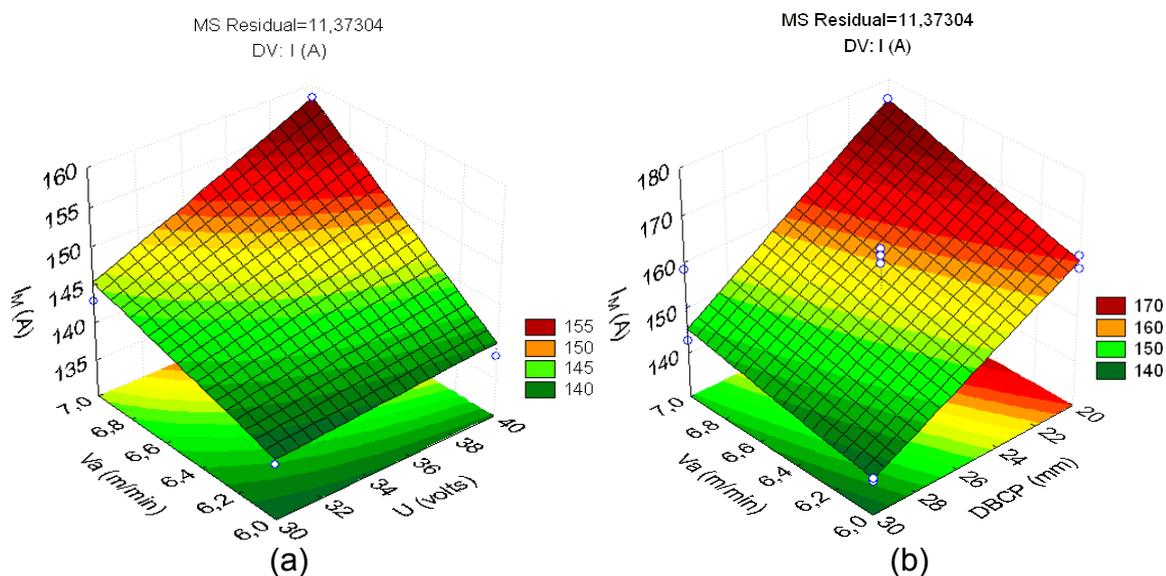


Figura 4. Superfície de resposta: (a) Influência da tensão e velocidade de alimentação na corrente média, fixando DBCP em 30 mm. (b) Influência da velocidade de alimentação e a distância do bico de contato à peça na corrente média, fixando U em 30 A.

Quanto à resposta R/L, apesar de o modelo conter uma pequena falta de ajuste, ele é estatisticamente significativo. Com isso foi possível analisar as superfícies da Figura 5, onde é visto que a razão R/L diminui quando a DBCP é diminuída e a tensão aumentada, atingindo os menores valores, em torno de 0,17 para DBCP de 20 mm e tensão de 40 volts. Como foi mostrada na Tabela 6, a variável velocidade de alimentação, V_a , não foi estatisticamente significativa o que pode ser confirmado

na superfície da Figura 5b pela pequena variação de R/L com a velocidade de alimentação.

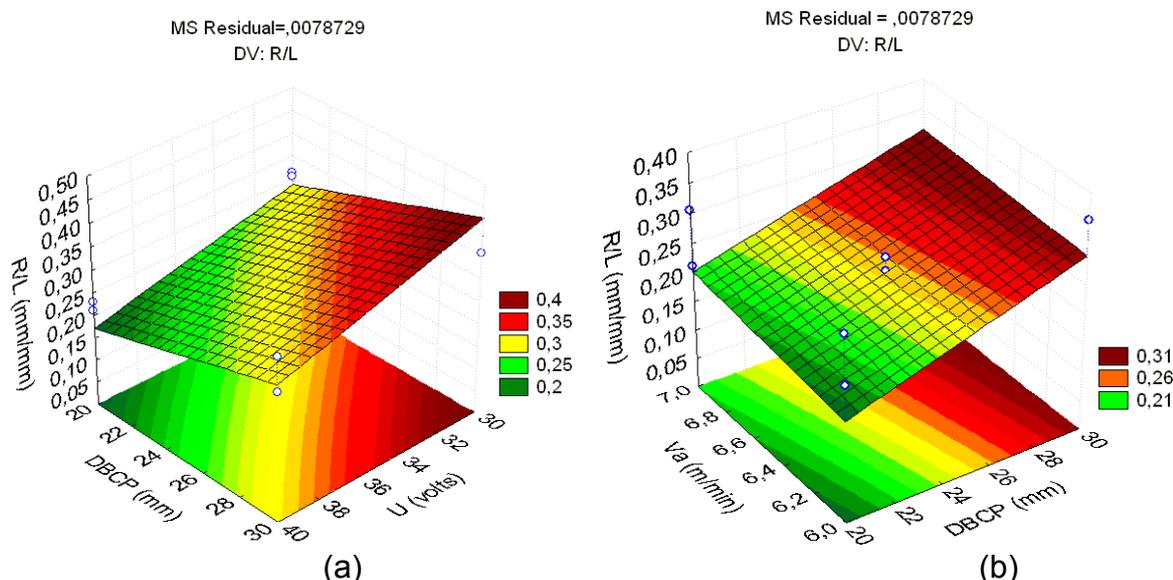


Figura 5. Superfície de resposta: (a) Influência da distância do bico de contato à peça e a tensão em R/L, fixando V_a em 6,5 m/min. (b) Influência da velocidade de alimentação e a distância do bico de contato à peça em R/L, fixando a tensão em 40 volts.

4 CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

- os parâmetros de soldagem utilizados mostraram-se adequados, pois todos os cordões obtidos apresentaram excelente qualidade com ausência de discontinuidades e com suas alturas mínimas superiores a 3,4 mm, em conformidade com a norma ISO 10423;
- após fazer alguns ajustes nos modelos, constatou-se a significância estatística dos fatores distância bico de contato peça (DBCP) e velocidade de alimentação do arame (V_a)*DBCP no modelo D, assim como dos fatores tensão (U) e DBCP no modelo de relação reforço largura, R/L, além de U, V_a e DBCP para o modelo de I_M ;
- a variável DBCP, quando aumentada, aumenta a relação R/L e reduz a corrente média, I_M e a diluição, D, apresentando-se como a variável de maior significância estatística para todas as respostas; e
- os menores valores de D ($\approx 11\%$) foram alcançados para elevados DBCP's e os menores valores de R/L ($\approx 0,17$) foram alcançados para menores DBCP's e elevadas tensões;

Agradecimentos

Ao programa Capes/CNPq pela Bolsa de pesquisa, à FINEP, ao Cenpes/Petrobrás pelo suporte financeiro, à Rede Multitarefas de Materiais Avançados do Norte e Nordeste (REMULT) através do Núcleo de União e Revestimentos de Materiais (UNIREV) e à ESAB.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SOLDAGEM (ABS) (Brasil). Construtores Navais Duplicam a taxa de Deposição na Soldagem de Paineis. Revista da Soldagem, São Paulo, Ano V, n. 13, p.15-20, 2009.
- 2 SILVA, et al., Caracterização de Solda de Revestimento de AWS 317L Depositados por GMAW Duplo Arame em Aços ASTM A 516 Gr 60 para Uso na Indústria do Petróleo, Soldagem e Inspeção. São Paulo, v.15, n.3, p.225-233, Jul/Set 2010a.
- 3 SILVA, et al., Efeito da Energia de Soldagem sobre a Microestrutura de Revestimentos AISI 317L Depositados em aços ASTM A516 Gr 60 para Aplicação no Setor de Petróleo e Gás, Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.5, n.2, p.54-60, 2010b.
- 4 TELLES, P. C. S. Materiais para Equipamentos de Processo. 6. ed. Rio de Janeiro: Inteciência, 2003. 276 p.
- 5 CUNHA, M. C. D.; MELO, R. H. F.; BATISTA, V. R.; SILVA, M. M.; MACIEL, T. M. Avaliação dos parâmetros de Soldagem sobre Revestimentos de Liga de Níquel em Duto de Aço API 5L Gr B. Anais do XXXVII Congresso Nacional de Soldagem – Consolda. Natal-RN, 2011.
- 6 BATISTA, V. R.; SILVA, M. M.; MACIEL, T. M.; MELO, R. H. F.; ARAÚJO, F. S.; SANTOS, M. A. Influência dos Parâmetros de Soldagem Sobre as Características de Revestimentos de Liga Níquel Aplicados em Aços API 5L Gr B. Anais do 19^o Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia dos Materiais – CBECiMat. Campos do Jordão-SP, 2010.
- 7 PARANHOS, Ronaldo. Revestimento de Aço Carbono com Aço Inoxidável Austenítico. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/download/12ddc.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2008.
- 8 AHMAD, M. et al. Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276. Journal of Alloys and Compounds, v.390, p.188-193, Aug. 2004.
- 9 LU, J.; CHOI, E. S.; ZHOU, H. D.. Physical properties of Hastelloy C-276 at cryogenic temperatures. Journal of Applied Physics, v. 103, n. 6, p.1-6, 2008.
- 10 AHMAD, M. et al. Surface modification of Hastelloy C-276 by SiC addition and electron beam melting. Journal of Nuclear Materials, v. 336, n. 1, p.120-124, 2005.
- 11 NOURI, M.; ABDOLLAH, A.; MALEK, F.. Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding. Journal of Materials Sciences & Technology, v. 23, n. 6, p.817-822, 2007.
- 12 PALANI, P. K.; MURUGAN, N.. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. Journal of Materials Processing Technology, v. 190, n. 7, p.291-299, 2007.
- 13 WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. SOLDAGEM: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. 494 p.
- 14 PARANHOS, Ronaldo; SOUZA, Antonio Cordeiro. Soldagem a Arco Submerso. Rio de Janeiro: Senai/RJ-CETEC de Solda, 1999. 77 p.
- 15 BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. Statistics for experimenters. New York: John Willey. (1978)
- 16 MONTGOMERY, D. C. Introduction to statistical quality control. 3rd. ed. New York: Wile. 1997. (Disponível na biblioteca da EESC - USP).
- 17 RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos. Campinas-SP. Editado pela AMIC, 2009.
- 18 COSTA, S. C.; RIBEIRO, L. G. Otimização dos Parâmetros de Pulso de um Processo de Soldagem Mig Através de Análise Fatorial em dois Níveis. In: XXI Encontro de Engenharia de Produção, Salvador - Ba, Anais do XXI Encontro de Engenharia de Produção, Salvador-BA: ENEGEP, 2001.
- 19 SILVA, M. M. et al, Avaliação da Microestrutura e da Microdureza de Revestimentos de Ligas de Níquel Aplicados por Soldagem em Tubos de Aços ARBL. Relatório Técnico

- de Pesquisa. Laboratório de Soldagem (LABSOL). UFCG. Reunião do Grupo de Pesquisa: Campina Grande. 78 p. 2010c.
- 20 HAYNES WIRE COMPANY (Estados Unidos). Product Certification. Specification: C-276-0450-12BP-B00. Houston, 2009. 2 p.
- 21 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO-10423: Petroleum and natural gas industries — Drilling and production equipment — Wellhead and christmas tree equipment. Geneva, 2009.
- 22 NASCIMENTO, A. S. Aspectos operacionais e metalúrgicos da soldagem com arame metal cored. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Belém – PA, 2005.
- 23 PETROBRAS. N -1707. Projeto de vaso de pressão com revestimento. Rio de Janeiro - RJ: PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. 1999.
- 24 BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. 2^a Ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1996, 299p
- 25 BALESTRASSI, P. P. e PAIVA, A. P. Estatística Aplicada. Instituto de Engenharia de Produção & Gestão. UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá-MG, 2007.