

Otimização de Parâmetros do Processo de Soldagem Arco Submerso para Revestimentos Anticorrosivos

Marcos Mesquita da Silva¹, Valmir Rodrigues Batista², Theophilo Moura Maciel², Marco Antonio dos Santos², Taynara Lacerda Brasileiro¹

¹ Instituto Federal da Paraíba - IFPB, Curso Técnico em Petróleo e Gás, Campus Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

² Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Campina Grande, PB, Brasil.

Recebido: 30 Dez., 2015

Aceito: 30 Mar., 2016

E-mail: marcos.silva@ifpb.edu.br (MMS)

Resumo: Neste trabalho foi avaliada a influência das variáveis de soldagem em cordões de solda, aplicados pelo processo Arco Submerso (SAW) com corrente convencional, visando futura aplicação em revestimentos metálicos contra corrosão. Segmentos de tubo de um aço API 5L Gr B foram utilizados como substrato, além da utilização de um metal de adição de liga de níquel, diâmetro de 1,13mm, classificação AWS ERNiCrMo-4 (Hastelloy C-276), e um fluxo do tipo neutro, básico e aglomerado (EN 760: SA AF 2 DC). Foram analisadas as 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 . Porém, para a resposta Reforço/Largura (R/L), o modelo se caracterizou como estatisticamente significativo, não preditivo e contendo uma falta de ajuste. A DBCP, por sua vez, 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 Submerged Arc Weld Process Parameters for Overlay Welding

Abstract: In this work was evaluated the influence of welding variables on weld beads applied by submerged arc process (SAW) with conventional current, aiming future application in overlays against corrosion. Segments of steel API 5L Gr B pipe as substrate, a 1.13mm-diameter electrode wire of nickel alloy, classification AWS ERNiCrMo-4 (Hastelloy C-276) as filler metal, and a flux neutral, basic and crowded were used. The 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. However, for the response reinforcement/width, the model was characterized as statistically significant, but not predictive, and containing a lack of fit. The CTWD was the most significant variable to reducing the dilution.

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

1. Introdução

A soldagem é um dos principais processos de fabricação usada 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]. Segundo Cunha et al. [5] e Batista et al. [6], 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* [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 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 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 da DBCP, 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, possui diversas técnicas que podem auxiliar 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 liga 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 foram segmentos de tubos do aço API 5L Gr B de 12 polegadas de diâmetro nominal (\varnothing_N) e série 80 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 nominal do duto API 5L Gr B (% em peso).

	C (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Nb+Ti+V	Fe
API 5L GR B	0,28	1,20	0,030	0,030	≤ 0,15	Bal.

Fonte: APL 5L [19].

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

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

Fonte: Haynes Wire Company [20].

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 por fim sua superfície foi limpa com acetona. A Figura 1a 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 peça (DBCP).

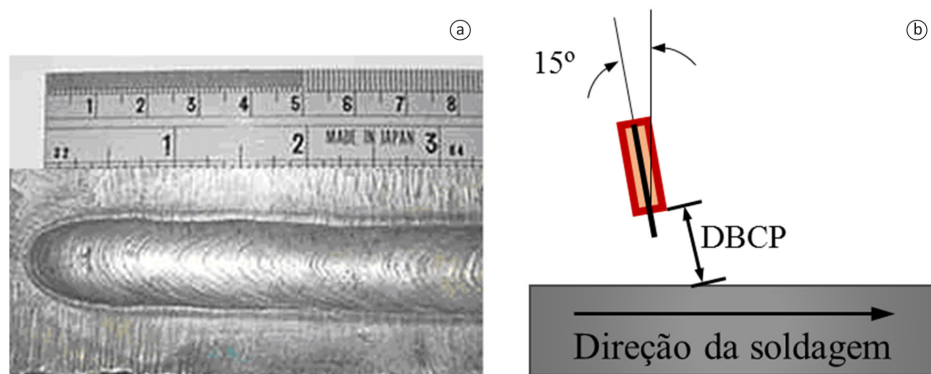


Figura 1. (a) Imagem do cordão de solda e (b) Técnica e procedimento de soldagem.

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

As características geométricas dos revestimentos foram analisadas a partir das seções transversais (Figura 2), onde L é a largura e R ($R_1 - R_2$) a altura do cordão. Os níveis de diluição dos revestimentos foram calculados através das medições das áreas A_1 e A_2 (Figura 2) utilizando um *software* CAD. Assim, os níveis de diluição (D) foram definidos conforme a Equação 1.

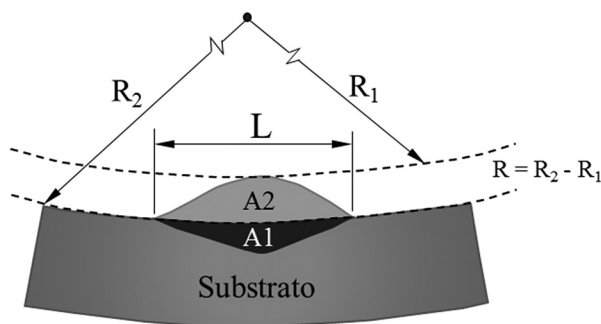


Figura 2. Representação esquemática da seção transversal dos revestimentos.

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 (V_a) e a distância bico de contato peça (DBCP). Os valores desses níveis se encontram na Tabela 3. Estes valores foram escolhidos tendo por base a literatura e, principalmente, testes empíricos realizados quando a máquina de soldagem. A principal preocupação era produzir experimentos válidos (ou sem defeitos exagerados), isto é, escolher parâmetros que realmente produzissem arcos elétricos capazes de produzir uma solda, de modo que não houvesse variáveis de resposta com resultados inválidos (ou sem resultado). Por exemplo, em testes preliminares não houve solda satisfatória com tensões abaixo de 30 volts.

Tabela 3. Níveis reais e codificados dos fatores em estudo.

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

Foram mantidos fixos, a velocidade de soldagem ($V_s=22\text{cm/min}$) e a inclinação da tocha de soldagem ($\theta=15^\circ$ com a vertical). Todos os experimentos foram feitos utilizando corrente convencional (sem pulsação) com polaridade reversa (CC+). Na Tabela 4 são apresentados os onze experimentos originados do planejamento fatorial, realizados numa sequência aleatória.

$$D(\%) = \frac{A1}{A1 + A2} \times 100 \quad (1)$$

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

Experimento	Sequência 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)

A fim de ser possível atingir valores de DBCP elevadas (para o diâmetro de arame de 1,13 mm), por exemplo DBCP = 30 mm, foi projetada uma adaptação na pistola da máquina, ou seja, para ser possível realizar uma soldagem com longo *stickout*. O desafio consistiu basicamente em desenvolver um dispositivo que permitisse variar a DBCP (distância do bico de contato à peça) de modo que fosse possível manter uma Distância do Bocal à Peça (DBP) constante (Figura 3), aproximadamente DBP=15mm para se garantir uma boa qualidade no cordão de solda, quando da soldagem através do processo ao arco submerso. Assim, quando a DBCP é aumentada, o bocal de cobre é deslizado dentro do adaptador de bronze. A fixação deste bocal de cobre foi realizada através de 3 parafusos dispostos no adaptador de bronze (Figuras 3 e 4). Por sua vez, a Figura 4 apresenta o resultado do projeto da Figura 3. O bocal foi obtido a partir de um tubo de cobre e a extremidade cônica do mesmo foi confeccionada através da deformação do tubo dentro de uma matriz (Figura 4) devido a ação de uma prensa hidráulica.

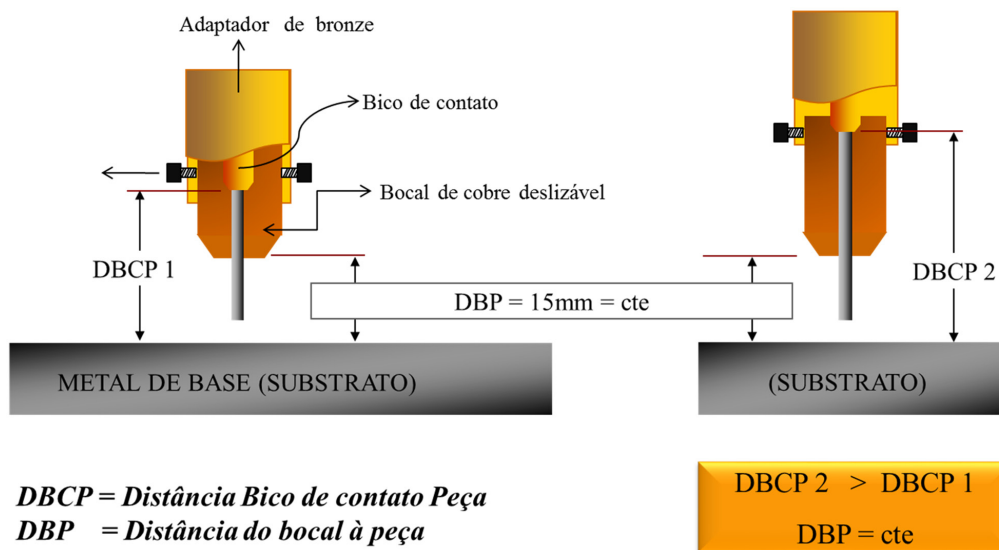


Figura 3. Esquema do dispositivo que permite variar a DBCP mantendo a DBP constante.



Figura 4. Dispositivo confeccionado para possibilitar soldagens com longo *stickout*.

3. Resultados e Discussão

A Figura 5 mostra as seções transversais e, conseqüentemente, as características geométricas de todos os cordões depositados. Todos os cordões obtidos pelo processo de soldagem SAW, neste trabalho, apresentaram excelente qualidade com ausência de discontinuidades.

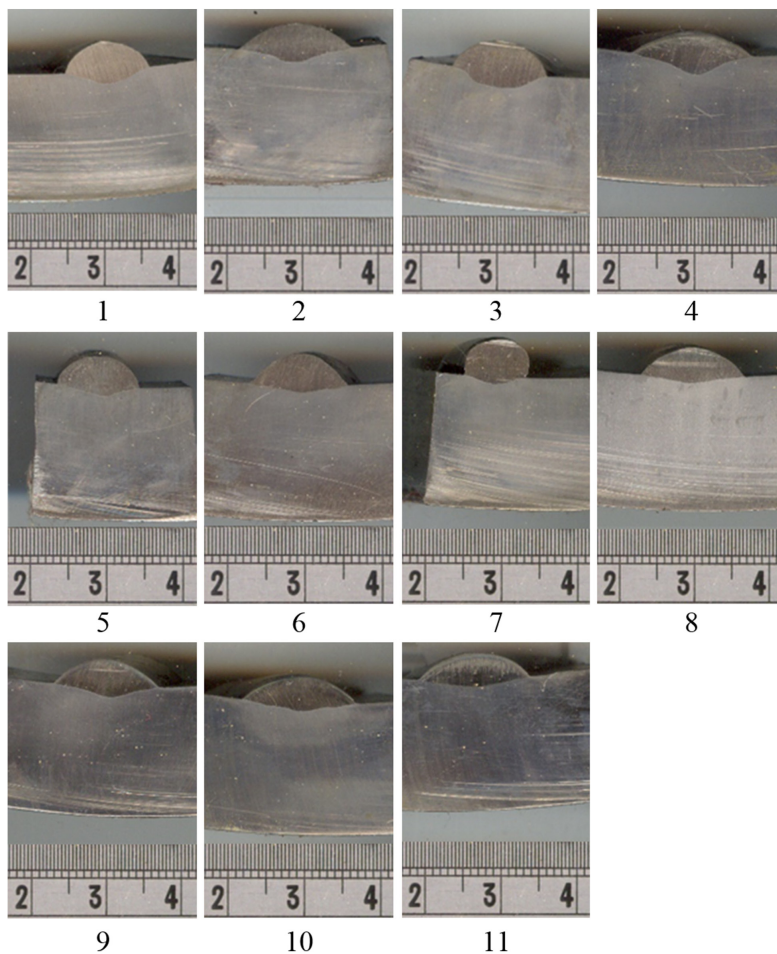


Figura 5. Seções transversais dos cordões de solda dos 11 experimentos realizados.

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. Pode-se também verificar que todos os cordões apresentaram reforços superiores a 3,4 mm.

Tabela 5. Matriz de planejamento e resultados obtidos.

Experimento	U (volts)	Va (m/min)	DBCP (mm)	I _M (A)	U _M (volts)	Diluição (%)	R (mm)	R/L (mm/mm)
1	30,00	6,00	20,00	160,38	30,32	17,94	3,91	0,31
2	40,00	6,00	20,00	163,22	43,23	21,86	3,44	0,23
3	30,00	7,00	20,00	175,83	30,34	22,59	3,99	0,31
4	40,00	7,00	20,00	186,19	41,12	23,19	3,64	0,21
5	30,00	6,00	30,00	137,32	30,38	14,43	3,97	0,35
6	40,00	6,00	30,00	138,07	42,17	13,43	4,03	0,31
7	30,00	7,00	30,00	142,83	30,77	9,62	4,90	0,60
8	40,00	7,00	30,00	158,37	40,91	11,18	3,90	0,28
9	35,00	6,50	25,00	163,82	35,56	15,42	3,70	0,26
10	35,00	6,50	25,00	162,33	35,64	13,63	3,55	0,23
11	35,00	6,50	25,00	160,66	35,43	13,20	3,80	0,25

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. 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 [21]. Quanto ao reforço do cordão, a norma Petrobras N-1707 [22] 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. Isto é, constatou-se que todos os cordões apresentaram alturas mínimas superiores a 3,4 mm, em conformidade com a norma Petrobras N-1707.

Para a análise dos resultados foi utilizado um *software* estatístico adotando um nível de confiabilidade dos resultados de 90%. A Tabela 6 mostra os valores de P¹ para cada fator, considerando também as interações entre duas. Escolheu-se esse nível de confiabilidade porque soldagem é um processo complexo.

Os valores em negrito obedecem à relação $P \leq 0,1$ e denuncia os fatores que são estatisticamente significativos. 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 (M_D) e também de U*Va no modelo de I_M (M_{IM})

Os modelos matemáticos empíricos, codificados de 1ª ordem encontrados, com os seus respectivos parâmetros estatísticos, estão apresentados nas Equações 2-4 onde os valores em negrito correspondem às parcelas estatisticamente significativas do modelo, ao nível de 90% de confiança.

$$M_D = \mathbf{16,04455} + 0,63500*U - 0,13500*Va - \mathbf{4,61500*DBCP} - \mathbf{1,63000*Va*DBCP} \quad (2)$$

$$M_{R/L} = \mathbf{0,303636} - \mathbf{0,067500*U} + 0,025000*Va + \mathbf{0,060000*DBCP} - 0,037500*U*Va \quad (3)$$

$$M_{IM} = \mathbf{159,0018} + \mathbf{3,6862*U} + \mathbf{8,0288*Va} - \mathbf{13,6288*DBCP} + \mathbf{2,7887*U*Va} - 1,5762*Va*DBCP \quad (4)$$

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 90% de confiabilidade, a relação $P \leq 0,1$ deve ser satisfeita.

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	0,000024	0,000175	0,000000	0,000000	0,000010	0,000000
U	0,495149	0,062857	0,049064	0,412711	0,043316	0,027102
Va	0,881098	0,397293	0,003682	0,857758	0,380882	0,001095
DBCP	0,005513	0,085479	0,000495	0,000688	0,063727	0,000090
U * Va	0,916105	0,228523	0,101978	-	0,205884	0,066456
U * DBCP	0,590341	0,442102	0,784195	-	-	-
Va * DBCP	0,126644	0,319284	0,298051	0,064644	-	0,243389
R2	0,89564	0,80614	0,97525	0,8864	0,70836	0,97472
R2 ajustado	0,73909	0,51535	0,93813	0,8107	0,51393	0,94944
MS Residual	5,74012	0,00558	13,9160	4,1654	0,0055924	11,3715

Nas Tabelas 7-9 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 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} [23]. Neste trabalho, todos os modelos (M_D , $M_{R/L}$ e M_{I_M}) são estatisticamente significativos com 90% de confiança. No entanto, apenas o modelo M_{I_M} também é preditivo.

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

Fontes de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F _{Calculado}	F _{Tabelado}
Regressão	195,0126	4	48,7531	11,70	3,18
Resíduo	24,9929	6	4,1655		
Falta de ajuste	22,2204	4	5,5551	4,01	9,24
Erro puro	2,7725	2	1,3862		
Total	220,0055	10		R ² = 0,8864	

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 _{Calculado}	F _{Tabelado}
Regressão	0,081500	4	0,0203750	3,64	3,18
Resíduo	0,033555	6	0,0055924		
Falta de ajuste	0,033088	4	0,008272	35,43	9,24
Erro puro	0,000467	2	0,000234		
Total	0,115055	10		R ² = 0,70836	

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 _{Calculado}	F _{Tabelado}
Regressão	2192,430	5	438,486	38,55	3,45
Resíduo	56,858	5	11,372		
Falta de ajuste	51,859	3	17,286	6,92	9,16
Erro puro	4,998	2	2,499		
Total	2249,288	10		R ² = 0,97472	

Foi verificado também que os dois os modelos M_D e M_{IM} não precisam de ajuste, pois $F_{Calculado} < F_{Tabelado}$. Neste caso a regra é oposta a anterior [17].

Quanto ao modelo de R/L ($M_{R/L}$), 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 facilmente na literatura [24].

O modelo M_{IM} apresentou valores de coeficiente de determinação (R^2) bem próximos de 1, indicando assim, uma boa concordância entre os valores preditos e os valores experimentais.

Na Figura 6 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, e para maiores valores de velocidade de alimentação, V_a . No entanto, como mostra a Figura 7, 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 .

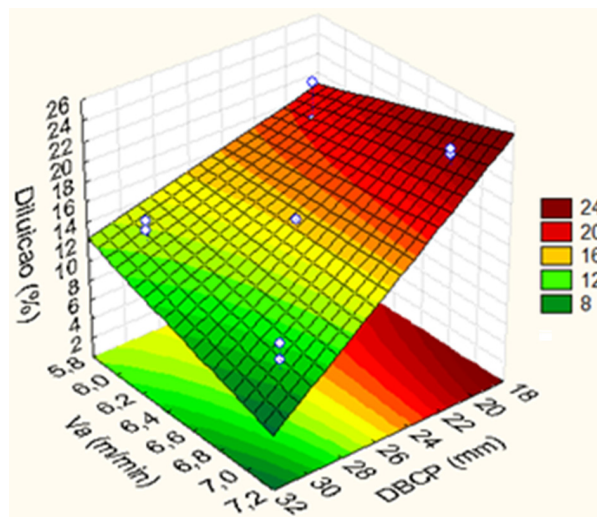


Figura 6. Influência da velocidade de alimentação e distância do bico de contato à peça na diluição, fixando a tensão em 30 volts.

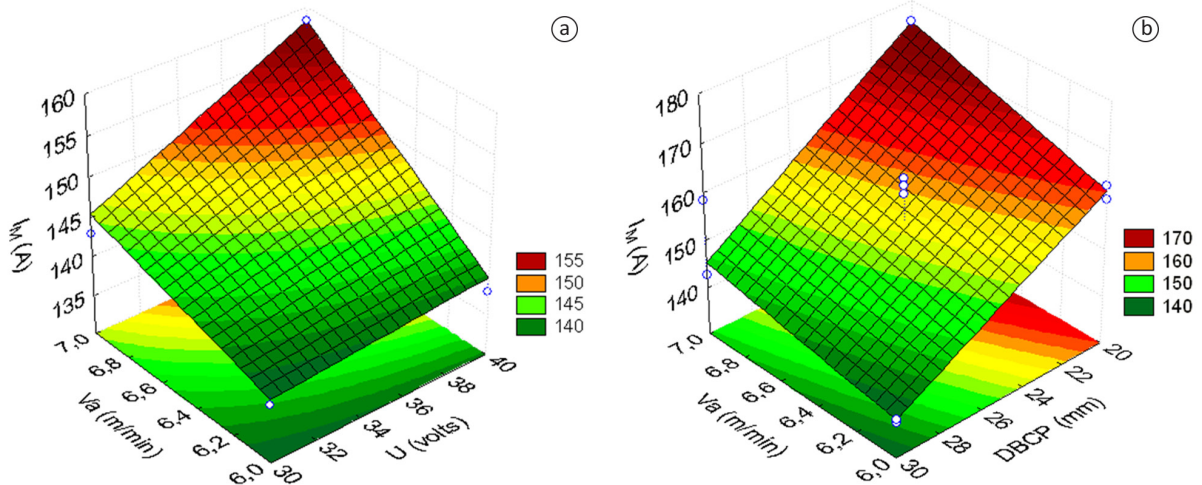


Figura 7. Superfície de resposta: (a) Influência da tensão e velocidade de alimentação na corrente média, fixando DBCP em 30 mm. (b) Influência da velocidade de alimentação e a distância do bico de contato a peça na corrente média, fixando U em 30 volts.

Na soldagem com corrente convencional não foi possível ajustar a corrente na máquina nos valores desejados, logo não foi possível usá-la no planejamento fatorial como variável de entrada. Sabe-se que ela tem importante influência na penetração e conseqüentemente na diluição, fazendo esta diminuir utilizando valores de corrente cada vez mais baixos [13].

Neste trabalho notou-se que 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 , como mostra a Figura 7. Note também que para valores inferiores de DBCP ou valores superiores de U , a velocidade de alimentação terá maior influência na corrente média.

Quanto à resposta R/L, apesar de o modelo $M_{R/L}$ conter uma pequena falta de ajuste, já que ele apresentou o menor R^2 , ele é estatisticamente significativo. Com isso é possível analisar as superfícies da Figura 8, 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 20mm 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 8b pela pequena variação de R/L com a velocidade de alimentação.

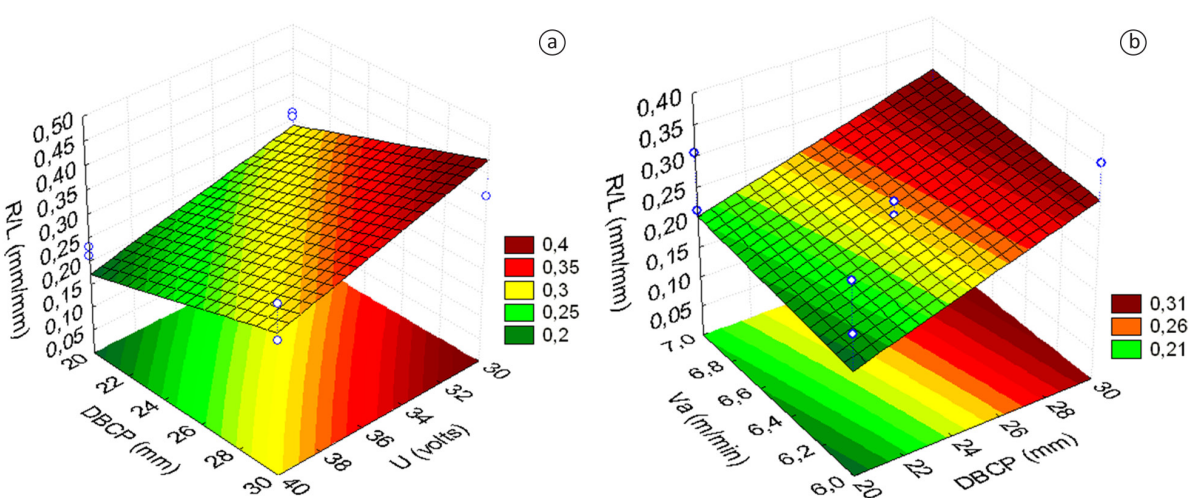


Figura 8. Superfície de resposta: (a) Influência da distância do bico de contato à peça e a tensão em R/L, fixando V_a em 6,5 m/min. (b) Influência da velocidade de alimentação e a distância do bico de contato à peça em R/L, fixando a tensão em 40 volts.

4. Conclusão

As principais conclusões deste trabalho são:

- Todos os cordões apresentaram alturas mínimas superiores a 3,4 mm, em conformidade com a norma PETROBRAS N -1707;
- Neste trabalho constatou-se a significância estatística dos fatores DBCP no modelo M_{D_p} , assim como dos fatores U e DBCP no modelo $M_{R/L}$, além de U, V_a e DBCP para o modelo M_{I_M} ;
- A variável distância do bico de contato à peça, DBCP, quando aumentada, aumenta a relação R/L e reduz a corrente média, I_M e diluição, D , apresentando-se como a variável de maior significância estatística para todas as respostas;
- 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 Multitarefa 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. Construtores navais duplicam a taxa de deposição na soldagem de painéis. *Revista da Soldagem*. 2009;13(1):15-20.
- [2] Silva MM, Oliveira WC, Maciel TM, Santos MA, Motta MF. 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 & Inspeção*. 2010a;15(3):225-233.
- [3] Silva MM, Maciel TM, Santos MA, Motta MF, Lima MSSS. 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*. 2010b;5(2):54-60.
- [4] Telles PCS. *Materiais para equipamentos de processo*. 6. ed. Rio de Janeiro: Inteciência; 2003. 276 p.
- [5] Cunha MCD, Melo RHF, Batista VR, Silva MM, Maciel TM. Avaliação dos parâmetros de soldagem sobre revestimentos de liga de níquel em duto de aço API 5L Gr B. In: *Anais do 37º Congresso Nacional de Soldagem – Consolda; 2011 Out 03-06; Natal, Brasil*. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem; 2011. p. 1-10.
- [6] Batista VR, Silva MM, Maciel TM, Melo RHF, Araújo FS, Santos MA. Influência dos parâmetros de soldagem sobre as características de revestimentos de liga níquel aplicados em aços API 5L Gr B. *Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia dos Materiais – CBECiMat; 2010 Nov 21-25; Campos do Jordão, Brasil*. São Paulo: ABM; 2010. p. 6534-6543.
- [7] Paranhos R. Revestimento de aço carbono com aço inoxidável austenítico [página da internet]. [acesso em 26 maio 2008]. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/download/12ddc.pdf>.
- [8] Ahmad M, Akhter JI, Akhtar M, Iqbal M, Ahmed E, Choudhry MA. Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004;390:188-193.
- [9] Lu J, Choi ES, Zhou HD. Physical properties of Hastelloy C-276 at cryogenic temperatures. *Journal of Applied Physics*. 2008;103(6):1-6. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2899058>.
- [10] Ahmad M, Akhter JI, Iqbal M, Akhtar M, Ahmed E, Shaikh MA, et al. Surface modification of Hastelloy C-276 by SiC addition and electron beam melting. *Journal of Nuclear Materials*. 2005;336(1):120-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.09.010>.
- [11] Nouri M, Abdollah A, Malek F. Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding. *Journal of Materials Science and Technology*. 2007;23(6):817-822.
- [12] Palani PK, Murugan N. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;190(7):291-299. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.035>.
- [13] Wainer E, Brandi SD, Mello FDH. *Soldagem: processos e metalurgia*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda; 1992. 494 p.
- [14] Paranhos R, Souza, AC. *Soldagem a arco submerso*. Rio de Janeiro: Senai/RJ-CETEC de Solda; 1999. 77 p.
- [15] Box GEP, Hunter WG, Hunter JS. *Statistics for experimenters*. New York: John Willey; 1978.
- [16] Montgomery DC. *Introduction to statistical quality control*. 3. ed. New York: John Willey; 1997.
- [17] Rodrigues MI, Lemma AF. *Planejamento de experimentos e otimização de processos*. Campinas: AMIC; 2009.
- [18] Costa SC, Ribeiro LG. Otimização dos parâmetros de pulso de um processo de soldagem Mig através de análise fatorial em dois níveis. In: *Anais do 21º Encontro Nacional de Engenharia de Produção; 2001 Out 17-19; Salvador, Brasil*. Rio de Janeiro: ABEPRO; 2001. p. 1-8.
- [19] American Petroleum Institute. *API 5L: Specification for Line Pipe*. 44. ed. Washington: API; 2007.
- [20] Haynes Wire Company. *Product Certification. Specification: C-276-0450-12BP-B00*. Hendersonville: Haynes Wire Company; 2009. 2 p.
- [21] Nascimento AS. *Aspectos operacionais e metalúrgicos da soldagem com arame metal cored [dissertação de mestrado]*. Belém: Universidade Federal do Pará; 2005.
- [22] Petrobras. N-1707. *Projeto de vaso de pressão com revestimento*. Rio de Janeiro: Petróleo Brasileiro S.A.; 1999.
- [23] Barros BNo, Scarminio IS, Bruns RE. *Planejamento e otimização de experimentos*. 2. ed. Campinas: UNICAMP; 1996. 299 p.
- [24] Balestrassi PP, Paiva AP. *Estatística aplicada*. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá; 2007.