

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DE REVESTIMENTOS DO E308-L APLICADOS PELO PROCESSO SAW EM AÇO ESTRUTURAL¹

Raphael Henrique Falcão de Melo²
Mariana Karla Gurjão Pontes³
Jailson Alves da Nóbrega²
Theophilo Moura Maciel²
Marco Antonio dos Santos²

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre a diluição, a geometria (reforço, largura e penetração) e taxa de deposição de revestimentos soldados de aço inoxidável E308-L aplicados em aços estruturais para proteção contra a corrosão. O processo de soldagem utilizado foi o SAW utilizando um arame com diâmetro de 1,2 mm. Como substrato foi utilizado chapas de aço estrutural com espessura de 12,7 mm. Para relacionar a influência das variáveis citadas com os parâmetros de soldagem foi utilizada a técnica de planejamento de experimentos com aplicação de planejamento fatorial em dois níveis. Do ponto de vista das características geométricas a condição ótima dos revestimentos foi obtida com menores valores da tensão (30 V), maiores velocidades de alimentação do arame (7 m/min) e menores velocidades de soldagem (20 cm/min). Os resultados mais satisfatórios foram 11,27% de diluição, 3,92 mm de reforço, 26,75 mm de largura e taxa de deposição de 2,82 kg/h.

Palavras-chave: Revestimentos soldados; E308-L; Planejamento fatorial; SAW.

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF E308-L OVERLAYS APPLIED BY SAW ON STRUCTURAL STEEL

Abstract

The aim of this study is evaluate the influence of welding parameters on the dilution, the geometry (reinforcement, width and penetration) and deposition rate of stainless steel weld overlays applied on structural steel for corrosion protection. The welding process used was the SAW with a wire of diameter of 1.2 mm. As substrate was used structural steel plates with a thickness of 12.7 mm. To relate the influence of the variables mentioned with the welding parameters was used the technique of design of experiments with application of factorial design with two levels. The best bead geometry were obtained with the less voltage values (30 V), greater feed rate (7 m/min) and less welding speed (20 cm/min). The most satisfactory results were 11.27% dilution, 3.92 mm reinforcement, 26.75 mm wide and deposition rate of 2.82 kg / h.

Key words: Weld overlays; E308-L; Design of experiments; SAW.

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

² Engenheiro Mecânico, professor. Depto. de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba, Brasil; raphael.engmec@gmail.com.

³ Engenheira de Materiais, discente. Programa de Pós-Graduação, Ciência e Eng. dos Materiais, UFCG, PB, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As pressões econômicas e o elevado custo do petróleo estão forçando cada vez mais as refinarias do mundo a utilizarem petróleo pesado nos seus processos. A vantagem neste caso está no preço de venda mais baixo (cerca de 80%), quando comparado ao petróleo dito leve.⁽¹⁾

No Brasil, a produção de petróleo com alto índice de acidez naftênica está relacionado diretamente com as bacias produtoras existentes, sendo o tipo de exploração mais difundido a *offshore* a alta profundidade, cujos óleos explorados devido a sua composição química e a presença de diversas impurezas apresentam um elevado grau de corrosividade.^(2,3) Este aspecto exige dos diversos materiais empregados nas unidades de processamento e transporte de petróleo uma elevada resistência a corrosão e em especial à corrosão naftênica.⁽²⁾

Há uma grande variedade de materiais que atendem a estes requisitos, como os aços inoxidáveis e as ligas de níquel. Devido às condições de trabalho estes materiais devem apresentar excelente resistência mecânica, à corrosão, ao desgaste e às altas temperaturas, ou mesmo em alguns casos devem possuir uma combinação de todos estes fatores.⁽⁴⁾

Entretanto, devido ao elevado custo de fabricação de equipamentos ou componentes maciços constituídos por estas ligas, uma alternativa razoável é a aplicação de revestimentos por soldagem, na qual se deposita uma camada de material mais nobre (aço inoxidável ou ligas de níquel) sobre um substrato menos nobre (aços C-Mn e aços de baixa liga). A aplicação destes revestimentos em equipamentos industriais pode ser feita na forma de *clad*, *lining* e *overlay*. Esta última é realizada através da deposição de uma camada de material com características desejáveis (resistência à corrosão ou ao desgaste etc.) sobre um substrato.

Dentre os vários processos de soldagem utilizados para a aplicação de revestimentos podemos destacar o processo de soldagem ao arco submerso (SAW).^(4,5)

Um fator importantíssimo e decisivo sobre a resistência à corrosão dos revestimentos aplicados por soldagem é o nível de diluição do substrato no metal de solda, uma vez que isto implica em uma menor probabilidade de precipitação de microestruturas frágeis e susceptíveis a corrosão na superfície do revestimento. A relação entre o reforço e a largura (r/L) também é bastante importante, já que cordões mais largos proporcionam um melhor espalhamento e uniformidade do revestimento além de otimizar o processo produtivo, em que cordões mais largos revestem os tubos internamente de forma mais rápida.

Diante disso, o presente trabalho tem por objetivo verificar a influência de alguns parâmetros de soldagem sobre as características geométricas e econômicas de revestimentos aplicados pelo processo SAW, lançando mão da metodologia do planejamento experimental fatorial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Consumíveis

Neste trabalho foram utilizados como substrato chapas de aço ASTM A36 e como metal de adição o arame de aço inoxidável AWS E308-L com diâmetro de 1,2 mm. A Tabela 1 apresenta a composição química dos materiais empregados, segundo o

fabricante. Como elemento de proteção foi utilizado um fluxo neutro, básico e aglomerado, especial para soldagem de topo e soldagem de revestimento com arames e fitas de ligas de níquel e aço inoxidável.

Tabela 1. Composição química (% em peso) dos consumíveis empregados

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	P	S	Fe
E-308-L	0,03	19,5 - 22,0	9,0 - 11,0	0,75	1,0 - 2,5	0,30 - 0,65	0,75	-	-	Balanço
A 36	0,18-0,23	-	-	-	0,30-0,60	-	-	0,03 máx.	0,05 máx.	Balanço

2.2 Procedimento Experimental

As soldagens foram realizadas pelo processo SAW. Utilizando-se uma fonte eletrônica de soldagem e sistema de aquisição de dados para controle dos parâmetros. O procedimento de soldagem foi executado sem restrição, na posição plana. Os parâmetros de soldagem variados nos experimentos foram a tensão (U) e as velocidades de deslocamento da tocha e de alimentação do arame (V_s e V_a) (Tabela 2). Foram mantidos fixos: inclinação da tocha de soldagem ($\theta = 15^\circ$ com a vertical), sentido de soldagem “empurrando”, modo de corrente com polaridade reversa CC+ e DBCP de 20 mm. Utilizou-se também uma sobreposição de L/3 em relação à largura do primeiro cordão (Figura 1), procurando sempre manter a temperatura de interpasse menor ou igual a 100°C .

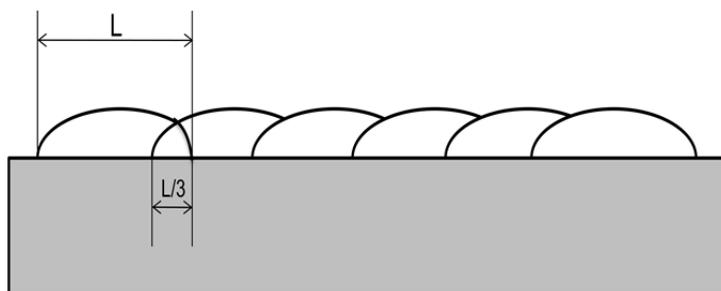


Figura 1. Ilustração da sobreposição entre os cordões.

Tabela 2. Níveis reais e codificados dos fatores em estudo, processo SAW

Variáveis de entrada (k)	Níveis		
	-1	0	1
V_a (m/min)	6,0	6,5	7,0
V_s (cm/min)	20,0	23,0	26,0
U (volts)	30,0	35,0	40,0

Para avaliação das características geométricas foram retiradas 3 amostras da seção transversal de cada chapa revestida, a fim de obtermos valores médios e seus respectivos desvios para a largura (L), reforço (r), penetração (P) e diluição D(%), calculada conforme ilustrado na Figura 2. As amostras, depois de cortadas, foram lixadas com lixas com granulação variando de 200 até a 1.200, polidas com alumina 4, 3 e 2 e, por fim, atacadas quimicamente com Nital a 2%, a fim de revelar a microestrutura do metal de solda, ZTA e metal de base.

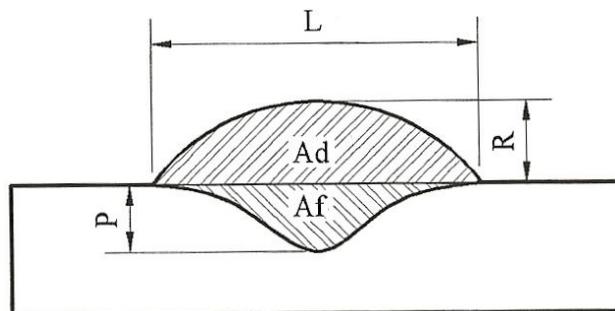


Figura 2. Representação esquemática das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões/revestimentos soldados.⁽⁴⁾

Onde a diluição é dada pela Equação 1.

$$D(\%) = \frac{A_f}{(A_d + A_f)} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Para A_d = Área depositada do cordão; e A_f = Área fundida do metal de base.

O desempenho econômico é um dos fatores de maior relevância na seleção de um processo de soldagem, pois está diretamente ligado aos custos do processo. Existem muitas variáveis capazes de influenciar no desempenho econômico, entre elas podemos citar o tipo de transferência metálica, a composição química, os parâmetros operacionais etc. Os valores de taxa de fusão (TF), taxa de deposição (TD) e da eficiência de deposição (ED) definem as características econômicas do consumível na soldagem a arco elétrico.⁽⁴⁾

A taxa de deposição é a quantidade de massa fundida do arame por unidade de tempo que realmente foi incorporada ao metal de solda, é dada pela Equação 2.

$$TD \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{3,6 \cdot (m_f - m_i)}{t_s} \quad (2)$$

Onde m_f é a massa final da chapa em gramas; m_i é a massa inicial da chapa em gramas; e t_s é o tempo de soldagem em segundos.

A taxa de fusão do arame é a quantidade de massa fundida do arame por unidade de tempo, e pode ser calculada pela Equação 3.

$$TF \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{3,6 \cdot \rho_a \cdot l_a}{t_s} \quad (3)$$

Onde ρ_a é a densidade linear do arame em gramas por metro; l_a é o comprimento do arame consumido em metros; e t_s é o tempo de soldagem em segundos.

A eficiência de deposição é a razão entre as taxas de deposição e de fusão obtidas durante o processo de soldagem (Equação 4).

$$ED = \frac{TD}{TF} \times 100\% \quad (4)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características Geométricas

A Tabela 3 apresenta os valores das características geométricas dos revestimentos: largura (L), reforço (r), penetração (P), diluição (D) e relação reforço largura (R/L) para um único cordão, variando-se a tensão (U), velocidade de alimentação (V_a) e velocidade de soldagem (V_s). A partir destes dados pôde-se fazer uma análise usando o planejamento experimental fatorial para encontrar os melhores parâmetros

de soldagem para a aplicação de revestimentos, tendo como critérios de qualidade as variáveis respostas D, r e L.

Tabela 3. Matriz de planejamento e resultados obtidos

CP	U	Va	Vs	L(mm)		r(mm)		P(mm)		D(%)		r/L
	(V)	(m/min)	(cm/min)	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ
1	30,0	6,0	20,0	23,00	0,28	4,01	0,11	0,88	0,25	11,61	2,04	0,41
2	40,0	6,0	20,0	27,10	1,08	3,56	0,18	1,38	0,15	22,14	2,56	0,31
3	30,0	7,0	20,0	26,75	0,88	3,92	0,31	0,73	0,02	11,27	0,78	0,34
4	40,0	7,0	20,0	27,39	3,58	3,88	0,22	1,17	0,17	20,28	1,07	0,33
5	30,0	6,0	26,0	23,82	0,29	3,36	0,12	1,03	0,22	19,15	2,28	0,33
6	40,0	6,0	26,0	24,38	1,20	3,01	0,17	1,26	0,03	27,01	1,65	0,29
7	30,0	7,0	26,0	24,90	0,14	3,51	0,13	0,91	0,08	15,65	0,63	0,33
8	40,0	7,0	26,0	27,17	3,36	3,28	0,21	1,36	0,13	24,95	1,83	0,28
9	35,0	6,5	23,0	27,55	0,04	3,34	0,27	0,97	0,11	17,85	2,35	0,28
10	35,0	6,5	23,0	24,34	0,56	3,67	0,20	0,89	0,06	14,22	1,64	0,35
11	35,0	6,5	23,0	26,62	0,58	3,61	0,18	1,29	0,24	20,21	4,38	0,32

μ =média; σ =desvio padrão.

Podemos notar que a diluição D(%) variou entre 11,27% e 27,01%. Valores na faixa de 10% a 15% são considerados ideais para revestimentos metálicos aplicados por soldagem para aplicações como revestimentos duros e revestimentos resistentes à corrosão.⁽⁶⁾ Entretanto, quanto mais próximo de 10% mais garantia se tem de uma maior resistência à corrosão.⁽⁷⁾ O valor do reforço variou de 3 mm a 4 mm. Em tubulações do setor de petróleo e gás o valor líquido mínimo exigido para reforços de revestimentos metálicos é de 3 mm daí a necessidade de obter-se um reforço bruto de aproximadamente 5 mm, para posterior usinagem.⁽⁷⁾ A relação r/L, para um único cordão, deve ser sempre inferior a 0,3, condição imposta como critério de qualidade.⁽⁸⁾ Baixos valores de r/L implicam em maior molhabilidade do cordão de solda (cordões mais largos) aumentando a eficiência do processo produtivo de revestimento de tubos. O ideal seria uma relação em torno de 0,1. Entretanto, valores em torno de 0,3 são considerados razoáveis. Os valores obtidos de r/L variaram de 0,28 a 0,41.

A Figura 3 ilustra que menores valores de diluição resultam em maiores valores da relação r/L, que geralmente é observado na literatura técnica especializada.⁽⁸⁾

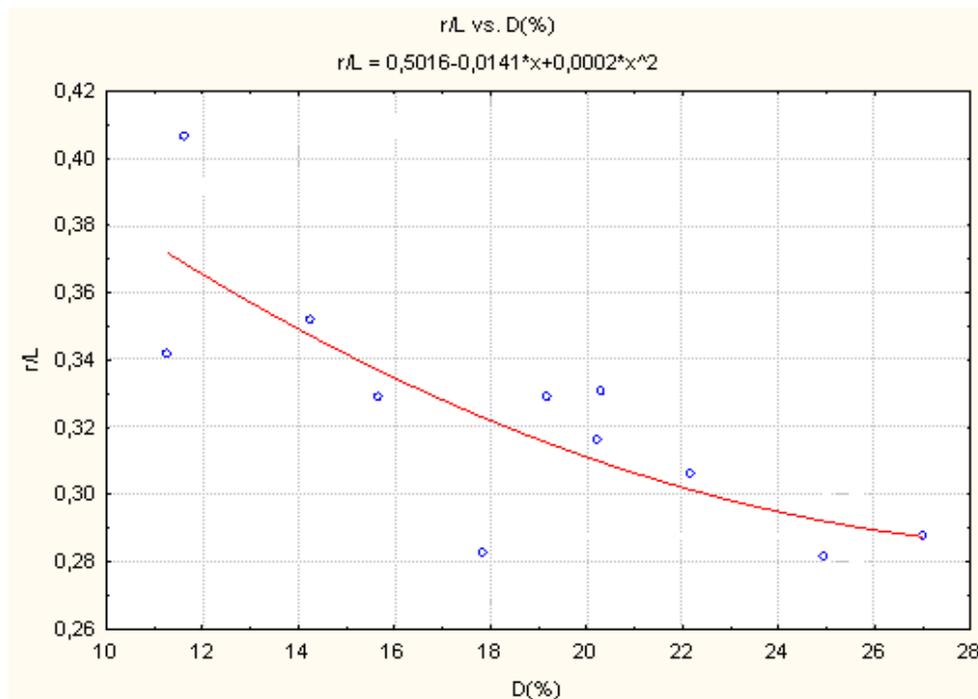


Figura 3. Relação entre r/L e D(%).

Uma combinação ideal entre estes dois parâmetros é bastante difícil de se obter, uma vez que menores valores de diluição são conseguidos com menores valores de corrente que conduzem a maiores valores de r/L.

Com os resultados da Tabela 3, foi realizada uma análise estatística de variância e com isso foi calculado o nível de significância “ α ” dos fatores de controle sobre a largura (L), reforço (r) e diluição D(%). Níveis de significância menores que 0,05 indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 95% em se admitir que este fator de controle esteja influenciando nas variáveis de resposta analisadas. Entretanto optou-se por não ignorar alguns dos efeitos não “estatisticamente significativos”, pelo fato de estarem próximos aos estatisticamente significativos ou manterem influência física sobre o fenômeno que também podem ser consideradas importantes. O que é bastante aceitável, na seleção de variáveis é, provavelmente, melhor aceitar o valor de $\alpha > 0,1$ do que deixar algum fator importante fora.⁽⁹⁾ Segundo Scotti e Ponomarev⁽¹⁰⁾ o julgamento prático do pesquisador deve ser o árbitro final. O mesmo ainda afirma que devemos utilizar o bom senso na interpretação das análises estatísticas. Os valores sublinhados e em negrito na Tabela 4 representam os fatores estatisticamente significativos, aqueles que foram considerados estatisticamente significativos por manterem influência física estreita sobre o fenômeno estão apenas em negrito.

Tabela 4. Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis respostas

Fatores	Valor de α		
	D (%)	L (mm)	R (mm)
Média	0,000014	0,000000	0,000000
U (V)	0,005946	0,049098	0,040737
Va (m/min)	0,322386	0,042288	0,152337
Vs (cm/min)	0,035543	0,244441	0,003771
U*Va	0,992597	0,697258	0,223145
U*Vs	0,746798	0,583449	0,849839
Va*Vs	0,650816	0,969420	0,646659
U*Va*Vs	0,689162	0,143898	0,458654
R ²	0,90911	0,74083	0,92801
Adj	0,77277	0,56805	0,82003
MS Residual	5,91553	1,18336	0,01654

*U*Va; U*Vs; Va*Vs; U*Va*Vs = representam interações entre os parâmetros.*

Os modelos matemáticos empíricos, codificados, com os seus respectivos parâmetros estatísticos, estão apresentados nas Equações 5, 6 e 7 onde foram considerados os valores estatisticamente significativos bem como aqueles que mantêm influência física estreita sobre o fenômeno.

$$D(\%) = 18,576 + 4,588 * U - 0,97 * V_a + 2,68 * V_s \quad (5)$$

$$L = 25,729 + 0,946 * U + 0,989 * V_a + 0,646 * U * V_a * V_s \quad (6)$$

$$r = 3,559 - 0,136 * U + 0,080 * V_a - 0,275 * V_s + 0,066 * U * V_a \quad (7)$$

Na Tabela 5 estão ilustrados os resultados das análises de variância para todas as respostas, mostrando através dos valores de $F_{\text{Calculado}}$ que todos os modelos foram estatisticamente significativos, pois $F_{\text{Calculado}} > F_{\text{Tabelado}}$, mesmo levando em consideração os fatores em que $\alpha > 0,05$ o que indica que a hipótese de que aqueles fatores mantêm influencia física estreita sobre o fenômeno é verdadeira.

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para as respostas D, r e L

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados			Graus de Liberdade			Quadrados Médios			Fcalc		
	D	r	L	D	r	L	D	r	L	D	r	L
Regressão	233,46	0,84	18,33	3	4	3	77,82	0,21	6,11	23,0	18,9	4,7
Resíduo	23,66	0,07	9,07	7	6	7	3,38	0,01	1,30	2	9	1
Total	257,12	0,90	27,40	10	10	10	81,20	0,22	7,40	-	-	-

$F_{3,7}=4,35; F_{4,6}=4,53.$ ⁽⁹⁾

3.1.1 Influência dos parâmetros de soldagem sobre a largura (L)

Conforme a Tabela 4, a tensão (U), a velocidade de alimentação (V_a), e a interação $U*V_a*V_s$ (parâmetro relacionado a energia de soldagem (H)) influenciaram significativamente os valores da largura. As Figuras 4 e 5 ilustram esta influência.

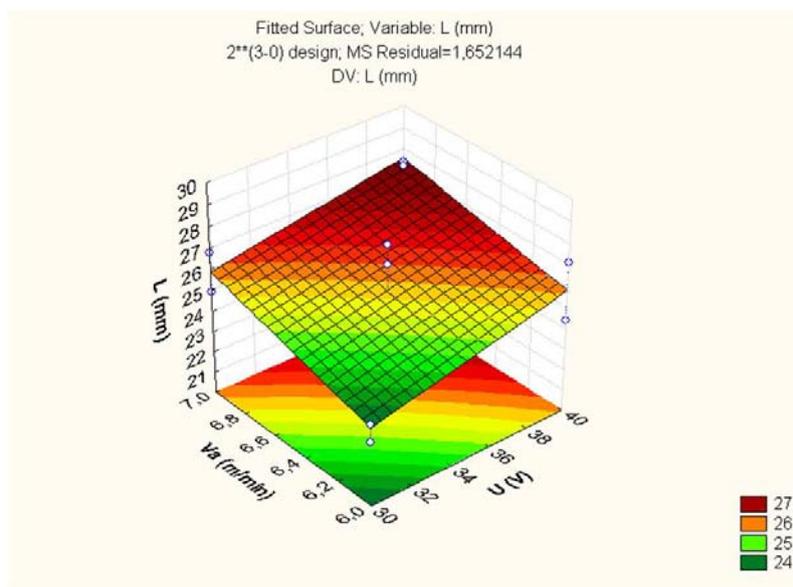


Figura 4. Influência de Va e U sobre a largura dos revestimentos do processo SAW.

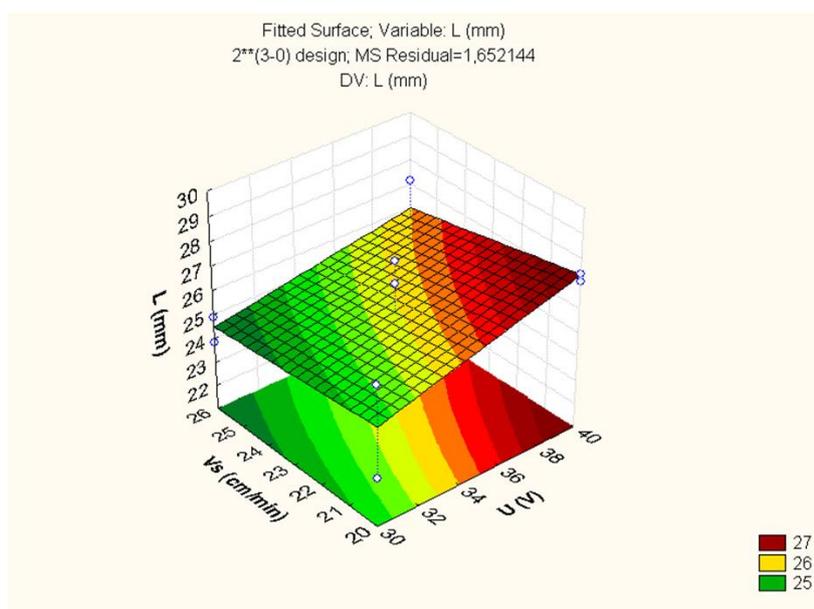


Figura 5. Influência de Vs e U sobre a largura dos revestimentos do processo SAW.

Ao analisar as Figuras 4 e 5, verifica-se que o aumento da tensão proporcionou um aumento da largura do revestimento. Isto se deve ao fato de que, para maiores valores de tensão, tem-se um maior comprimento do arco, resultando em uma coluna de plasma mais ampla em sua extensão.⁽¹⁰⁾

Da Figura 4 nota-se também que maiores valores da velocidade de alimentação do arame levaram a maiores larguras, isto se deve ao fato da velocidade de alimentação influenciar diretamente sobre a taxa de deposição, ou seja, maiores taxas de deposição resultam em uma maior quantidade de material depositado por unidade de comprimento.

Da Figura 5 pode-se inferir que maiores valores de velocidade de soldagem resultaram em menores larguras. Aumentos na velocidade de soldagem promovem uma redução de material depositado por unidade de comprimento e uma redução da energia de soldagem, esta última resulta em uma menor quantidade de calor imposta à peça.⁽¹⁰⁾

3.1.2 Influência dos parâmetros de soldagem sobre o reforço (r)

De acordo com a Tabela 4 e os critérios já estabelecidos a tensão (U), a velocidade de alimentação (V_a), a velocidade de soldagem (V_s) e a interação $U \cdot V_a$ influenciaram significativamente os valores de reforço dos revestimentos. As Figuras 6 e 7 ilustram a influência dos fatores de controle sobre a característica reforço (r).

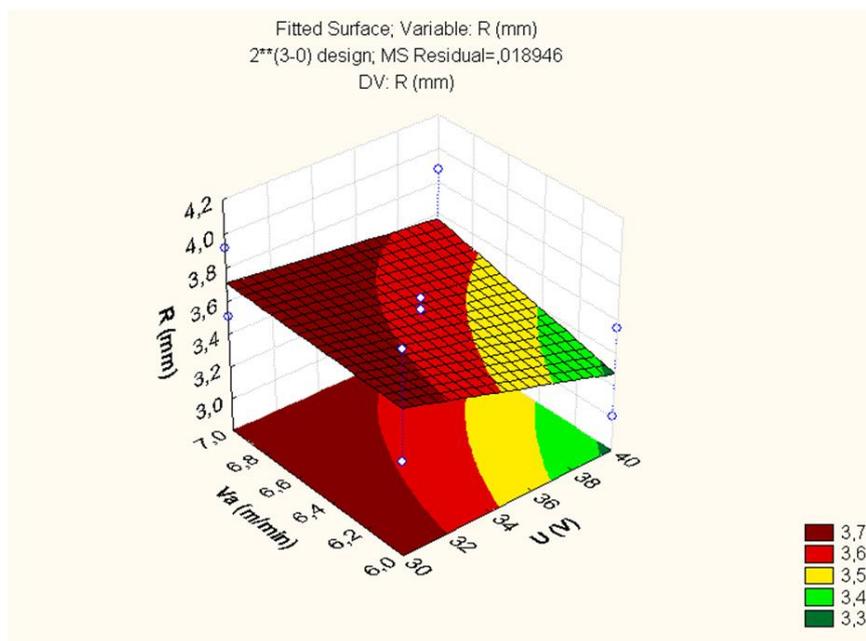


Figura 6. Influência da tensão (U) e velocidade de alimentação (V_a) no reforço.

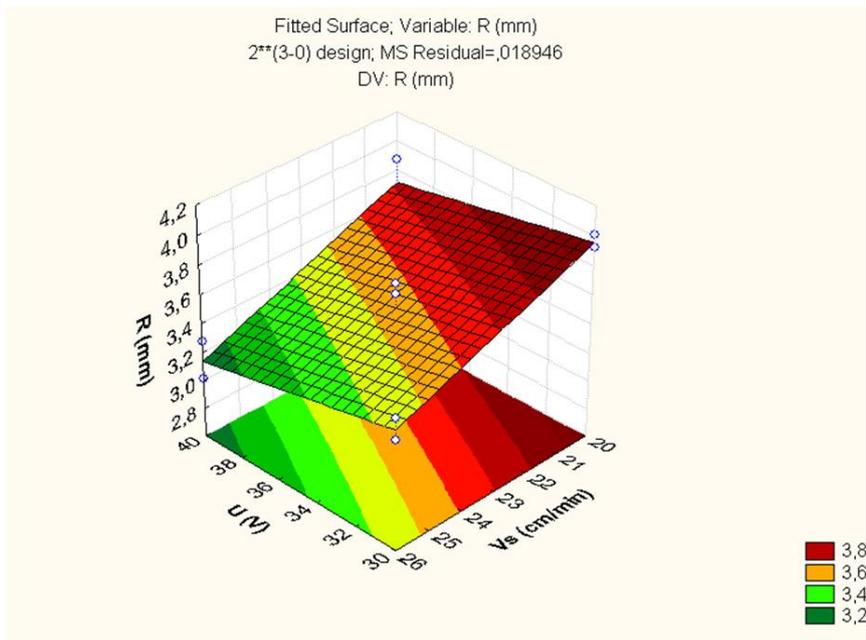


Figura 7. Influência da tensão (U) e velocidade de soldagem (V_s) no reforço.

Das Figuras 6 e 7 pode-se inferir que um aumento da tensão resulta em reforços menores, o que já era esperado, uma vez que o aumento da tensão leva a cordões mais largos devido à coluna de plasma que fica mais ampla em sua extensão, ou seja, o cordão torna-se mais achatado. Sendo assim, o efeito da tensão sobre o reforço é uma consequência do efeito da tensão na largura.

Os maiores reforços foram obtidos com o aumento da velocidade de alimentação. O aumento na velocidade de alimentação resulta em maiores taxas de deposição, logo há uma maior quantidade de material depositado por unidade de comprimento. De acordo com a Figura 7 observa-se uma redução no reforço com o aumento da velocidade de soldagem. Isso se deve ao fato de um aumento na velocidade de soldagem promover uma redução na quantidade de material depositado por unidade de comprimento.⁽¹⁰⁾

3.1.3 Influência dos parâmetros de soldagem sobre a diluição D(%)

A Tabela 4 mostra que a diluição foi significativamente influenciada pela tensão (U), a velocidade de alimentação (V_a) e pela velocidade de soldagem (V_s). Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os comportamentos das variáveis respostas afetadas pelos fatores de controle.

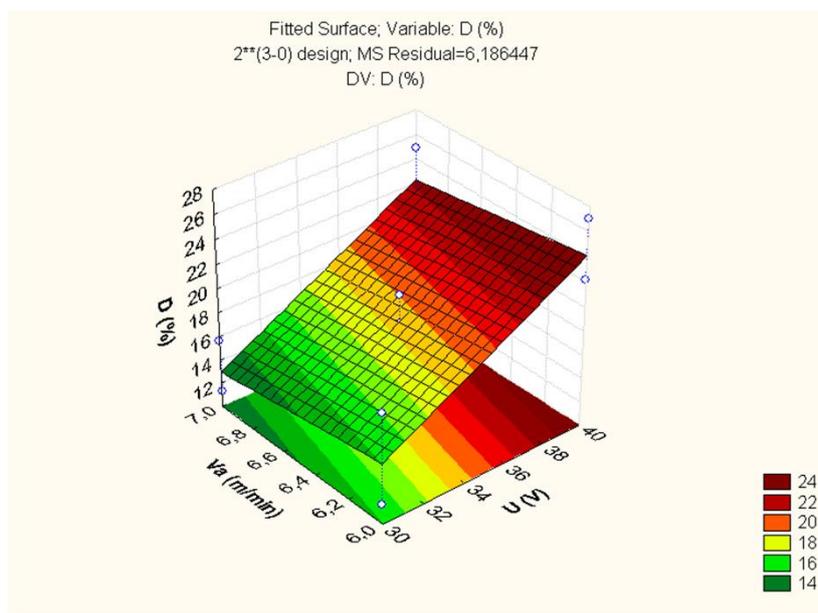


Figura 8. Influência da tensão (U) e velocidade de alimentação (V_a) na diluição.

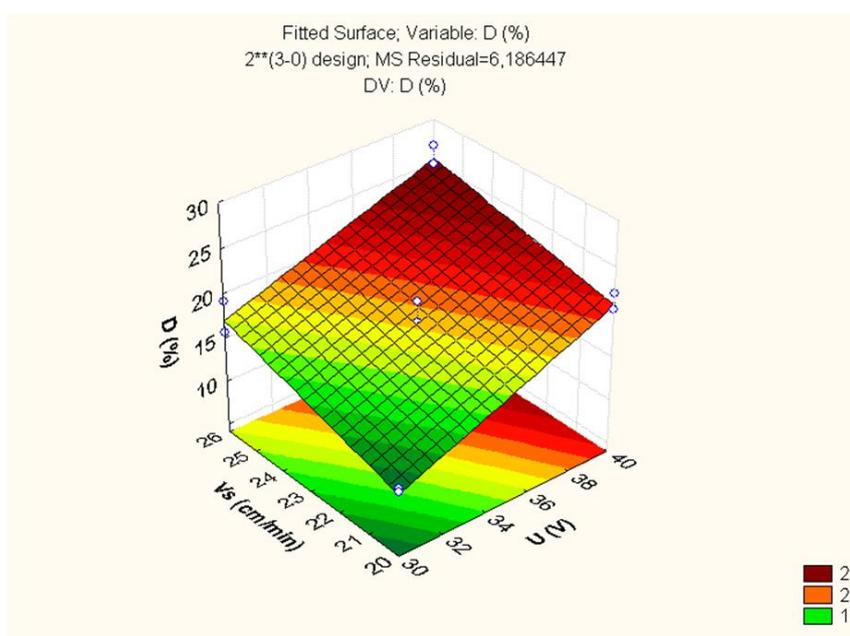


Figura 9. Influência da tensão (U) e velocidade de soldagem (V_s) na diluição.

Como pode ser visto nas Figuras 8 e 9, com o aumento da tensão há um aumento significativo da diluição. Como o aumento da tensão resulta em cordões de solda mais largos e com pequeno reforço, não sendo, portanto capaz de atuar como barreira para o arco elétrico não evitando então que a força deste aja diretamente sobre a poça de fusão, ocasionando assim um aumento significativo da área fundida do metal de base, enquanto que a área depositada do cordão não é afetada significativamente, resultando em maiores valores de diluição.

Maiores valores de velocidade de alimentação (V_a) levam a menores valores de diluição (Figura 8), já que aumentando a velocidade de alimentação há um aumento da quantidade de material depositado que atua como barreira e amortece a força do arco sobre a poça de fusão.

A Figura 9 indica que maiores valores de diluição são obtidos com maiores velocidades de soldagem. Isto se deve ao fato que maiores velocidades de soldagem promovem uma redução maior na área de metal depositado do que na área fundida, ocasionando assim maiores valores de diluição.^(4,11)

3.2 Características Econômicas

A Tabela 6 apresenta os valores da taxa de deposição para os ensaios da Tabela 3, cujos fatores de controle estão listados na Tabela 2. A partir destes dados, pôde-se fazer uma análise de forma análoga a das características geométricas usando o planejamento experimental fatorial. O valor da taxa de deposição é de grande importância, pois de posse dele, futuramente, poderemos realizar cálculos de custos de soldagem.

Tabela 6. Taxa de deposição

CP	Taxa de Deposição (kg/h)			Taxa de Fusão do arame (kg/h)	Eficiência de Deposição
	μ	σ	CV	μ	μ
1	2,38	0,04	0,017	2,81	0,85
2	2,42	0,16	0,066	2,81	0,86
3	2,82	0,05	0,018	3,28	0,86
4	2,75	0,02	0,007	3,28	0,84
5	2,56	0,06	0,023	2,81	0,91
6	2,36	0,11	0,047	2,81	0,84
7	2,85	0,11	0,038	3,28	0,87
8	2,61	0,04	0,015	3,28	0,80
9	2,68	0,13	0,048	3,04	0,88
10	2,63	0,07	0,027	3,04	0,86
11	2,70	0,20	0,074	3,04	0,89

μ =média; σ =desvio padrão.

A eficiência de deposição média do processo SAW foi de 86%, a condição de máxima eficiência para o revestimento CP 5 obtido com menores valores de tensão (U), velocidade de alimentação (V_a) e maiores velocidades de soldagem (V_s) de acordo com a Tabela 3.

Com os resultados da Tabela 6, foi realizada uma análise estatística de variância e com isso foi calculado o nível de significância " α " dos fatores de controle sobre a taxa de deposição (TD). A Tabela 7 apresenta os valores considerados

estatisticamente significativos bem como aqueles que mantêm influência física estreita sobre o fenômeno de forma análoga ao item anterior.

Tabela 7. Nível de significância sobre a taxa de deposição

Fatores	Valor de α TD (kg/h)
Média	0,000000
U (V)	0,024806
Va (m/min)	0,000167
Vs (cm/min)	0,963609
U*Va	0,390309
U*Vs	0,040939
Va*Vs	0,195721
U*Va*Vs	0,751697
R ²	0,9351
Adj	0,89183
MS Residual	0,0031205

O modelo matemático empírico, codificado, com os seus respectivos parâmetros estatísticos, é apresentado na Equação 8 onde foram considerados os valores estatisticamente significativos bem como aqueles que mantêm influência física estreita sobre o fenômeno.

$$TD \left(\frac{kg}{h} \right) = 2,614 - 0,059 * U + 0,164 * V_a - 0,051 U * V_s - 0,029 V_a * V_s \quad (8)$$

Na Tabela 8 observa-se o resultado da análise de variância para a taxa de deposição, que mostra através do valor de $F_{\text{Calculado}}$ que o modelo é estatisticamente significativo, de forma análoga a anterior, pois $F_{\text{Calculado}} > F_{\text{Tabelado}}$.

Tabela 8. Análise de variância (Anova) para a taxa de deposição

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F_{calc}
Regressão	0,2697493	4	0,067437	21,6109
Resíduo	0,018723	6	0,0031205	-
Total	0,288473	10	0,0705575	-

$F_{4,6}=4,53.$ ⁽⁹⁾

A Figura 10 apresenta a influência da tensão e velocidade de alimentação sobre a taxa de deposição.

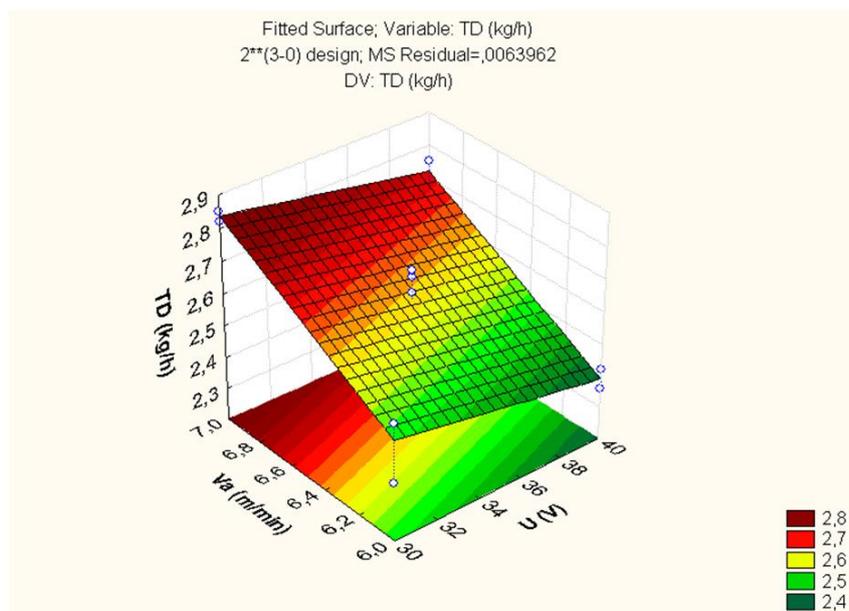


Figura 10. Influência da tensão (U) e velocidade de alimentação (V_a) sobre a taxa de deposição.

Menores valores de tensão (Figura 10) resultam em maiores taxas de deposição. Isso se deve ao fato de que menores tensões diminuem o comprimento do arco elétrico, reduzindo a penetração e aumentando a área de metal depositado contribuindo significativamente no aumento da taxa de deposição. Já maiores velocidades de alimentação nos levam a maiores taxas de deposição, uma vez que aumentos na V_a aumentam a quantidade de material depositado por unidade de comprimento, como já informado anteriormente.

4 CONCLUSÕES

Modelos matemáticos de regressão foram desenvolvidos, utilizando a metodologia do planejamento experimental fatorial em dois níveis, para prever a geometria de revestimentos aplicados pelo processo SAW do E308-L sobre o A36, o que nos leva a concluir que:

- ótimos valores de R^2 foram obtidos mostrando que os modelos de regressão aplicados são precisos e podem ser utilizados por engenheiros de soldagem na otimização do processo de “cladeamento” de chapas e tubos;
- os valores de diluição em torno de 12% indicam a adequação dos parâmetros de soldagem utilizados e o planejamento fatorial utilizado confirmou que estes valores são significativamente influenciados pelo valor de tensão e velocidade de soldagem;
- do ponto de vista das características geométricas a condição ótima dos revestimentos aplicados pelo processo de soldagem ao arco submerso foi obtida com menores valores da tensão (30 V), maiores velocidades de alimentação do arame (7 m/min) e menores velocidades de soldagem (20 cm/min);
- a tensão e a velocidade de alimentação do arame tiveram influência direta sobre todas as características geométricas analisadas. Comportamento semelhante foi observado para a influência da velocidade de soldagem exceto pela influência pouco significativa sobre a largura do revestimento;

- os efeitos interativos entre a tensão (U) e as velocidades de alimentação do arame e de soldagem (V_a e V_s) entenda-se $U \cdot V_a$, $U \cdot V_s$, $V_a \cdot V_s$ e $U \cdot V_a \cdot V_s$, mantiveram influência considerável sobre as características geométricas do cordão, principalmente sobre o reforço (r) e a largura (L); e
- a eficiência de deposição média do processo foi de 86%, chegando ao máximo de 91% e mínimo de 80%.

Agradecimentos

A Capes pela concessão de bolsa de mestrado e ao coordenador do Laboratório de Soldagem pelo auxílio durante a execução do trabalho, do qual este artigo compõe um dos itens investigados.

REFERÊNCIAS

- 1 CAPRA, A. R. **Desenvolvimento de Intermetálicos de Fe/Al através de Aspersão Térmica e Tratamento Posterior**, 2005. Dissertação M. Sc. (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- 2 DOS SANTOS, I. S. Corrosão por Ácidos Naftênicos em Unidades de Destilação Atmosférica e a Vácuo. 1992. Comunicação: **Documento Interno REPLAN/SEIEQ/PETROBRAS**, p 18.
- 3 ABDALLA, F. E. S., 2005, **Aplicação das variantes MAG pulsado e MAG térmico com arame maciço em soldas de revestimento do tipo “lining”**, Dissertação. M.Sc. (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- 4 PESSOA, A. R. P., **Revestimento de Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG com Transferência por Curto-Circuito**. 2009. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.
- 5 SILVA, M. M. **Caracterização Metalúrgica e Tenacidade de Revestimentos em Aços Inoxidáveis 317L Aplicados por Soldagens MIG Manual e Robotizado para Equipamentos do Setor de Petróleo e Gás**. 2009. 110p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.
- 6 WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. D. H.. **SOLDAGEM: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.
- 7 PETROBRAS N – 1707. **Projeto de vaso de pressão com revestimento**. Rio de Janeiro – RJ: PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. 1999.
- 8 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.
- 9 HAALAND, P. D., **Experimental Design in Biotechnology**. Marcel Dekker, INC., N.Y. 1989.
- 10 SCOTTI, A. & PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho**. 1. Ed. São Paulo: Artilebre. 2008. 248p.
- 11 KEJELIN, N. Z.; BUSCHINELLI, A. J. A.; BOHÓRQUEZ, C. E. N.. **Soldagem Dissimilar do Aço X-60 com Inconel 625**. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/soldagem_dissimilar.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2011.